

Научная статья

УДК 338.012; 338.1; 519.876.5

JEL C63, O41, R15

DOI 10.25205/2542-0429-2022-22-1-84-102

## Стационарность и рост в агент-ориентированной модели экономики

Александр Анатольевич Цыплаков

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет  
Новосибирск, Россия

Институт экономики и организации промышленного производства  
Сибирского отделения Российской академии наук  
Новосибирск, Россия

alexander.tsyplakov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9297-3269>

### Аннотация

Статья посвящена разработке блока инвестиций в агент-ориентированной межрегиональной многоотраслевой модели российской экономики. Рассматривается способность модели воспроизводить стационарные состояния экономики и экономический рост при различных режимах внутрифирменных инвестиций в основной капитал. Заданное стационарное состояние может быть достигнуто за счет подбора долей прибыли, идущей на инвестиции. Рост производства обеспечивался за счет уменьшения трудоемкости на 2 % в год в производственных функциях фирм леонтьевского типа при фиксированном уровне трудовых ресурсов. При финансировании инвестиций за счет прибыли фирм в режиме фиксированной доли в модельной экономике наблюдается сбалансированный рост.

### Ключевые слова

агент-ориентированное моделирование, многоотраслевая модель, внутрифирменные инвестиции, экономический рост

### Источник финансирования

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 19-010-00783-ОГН «Агент-ориентированное моделирование процесса инвестирования в пространственной экономике»

### Для цитирования

Цыплаков А. А. Стационарность и рост в агент-ориентированной модели экономики // Мир экономики и управления. 2022. Т. 22, № 1. С. 84–102. DOI 10.25205/2542-0429-2022-22-1-84-102

© Цыплаков А. А., 2022

ISSN 2542-0429

Мир экономики и управления. 2022. Том 22, № 1. С. 84–102

World of Economics and Management, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 84–102

## Stationarity and Growth in an Agent-Based Model of an Economy

Alexander A. Tsyplakov

Novosibirsk State University  
Novosibirsk, Russian Federation

Institute of Economics and Industrial Engineering  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
Novosibirsk, Russian Federation

alexander.tsyplakov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9297-3269>

### Abstract

The paper discusses development of the investments block in an agent-based interregional multisector model of the Russian economy. The ability of the model to reproduce stationary states of the economy and economic growth under various regimes of intra-company fixed capital investment is considered. A given steady state can be achieved by choosing the shares of profits assigned to investment. Output growth was insured by reducing labor intensity by 2 % per year in the Leontief-type production functions of firms with a fixed level of labor resources. When investments are financed from the profits of firms under fixed share regime, the model economy demonstrate a balanced growth.

### Keywords

agent-based modeling, multisector model, intra-company investment, economic growth

### Funding

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research grant no. 19-010-00783-OGN “Agent-based modeling of the investment process in spatial economy”

### For citation

Tsyplakov A. A. Stationarity and Growth in an Agent-Based Model of an Economy. *World of Economics and Management*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 84–102. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2022-22-1-84-102

## Введение

Экономический рост невозможен без ресурсов (трудовых ресурсов, основного капитала), которые бы его обеспечивали. Как следствие, чтобы рост в много-региональной многоотраслевой экономике носил сбалансированный характер, он должен сопровождаться соответствующим изменением пространственной и отраслевой структуры производства. В частности, экономический рост невозможен без увеличения уровня производственных мощностей, а уровень производственных мощностей, в свою очередь, определяется запасами основного капитала. В зависимости от соотношения выбытия основного капитала и валовых инвестиций фирма может увеличивать мощности, поддерживать их на неизменном уровне или же «проедать» их. Таким образом, инвестиции в основной капитал – это одна из ключевых составляющих роста. Основной капитал – один из наименее гибких производственных факторов, поэтому решения об инвестициях в основной капитал имеют, как правило, долгосрочный характер. Инвестиционные решения агентов экономики формируют структуру экономики на годы вперед.

Существующие модели экономического роста и в целом динамические модели экономики обычно исходят из наличия агента-представителя, абстрагируясь от разнородности (гетерогенности) агентов и экономического пространства, наблюдаемой на микроуровне. В условиях российской экономики неоднородность экономической деятельности, особенно пространственная, является важной особенностью при рассмотрении экономического роста.

Как альтернативу традиционной парадигме и традиционным методам моделирования предлагают агент-ориентированный подход, основанный на компьютерных имитациях и конструировании модели «снизу вверх». Такой подход хорошо зарекомендовал себя в экономическом анализе в условиях гетерогенности.

Еще одним преимуществом агентного подхода при моделировании роста является то, что экономические агент-ориентированные модели (АОМ) способны описывать эволюционирующие сложные системы (см., например, [1]). Свойства системы на агрегированном уровне возникают как результат повторяющихся взаимодействий между модельными сущностями (агентами), действующими адаптивно, а не как результат требований рациональности и равновесности, налагаемых разработчиком модели. С точки зрения описания экономической динамики особенность АОМ состоит в том, что такие модели характеризуются истинной, необратимой динамикой: эволюция состояния системы зависит от предыдущей траектории.

В данной статье в рамках агент-ориентированной модели изучаются условия, при которых в децентрализованной многоотраслевой многорегиональной экономике возможны стационарная траектория развития и сбалансированный экономический рост.

Принципиально важным моментом является то, что моделируемая экономика может как расти, так и сокращаться в результате независимых инвестиционных решений отдельных фирм и домохозяйств. Эти же решения обуславливают и изменения в отраслевой и пространственной структуре экономики, поскольку в результате производственные мощности отдельных отраслей и регионов могут расти с разной скоростью или сокращаться.

Исследование проводится на модели, разрабатываемой в Новосибирском государственном университете (НГУ) и Институте экономики и организации промышленного производства СО РАН (ИЭОПП, Новосибирск). Агент-ориентированная многорегиональная межотраслевая модель (АОМММ) – это вычислимая модель экономики России, использующая агент-ориентированный подход. Она характеризуется следующими особенностями: 1) представляет экономику в целом, а не отдельный сегмент; 2) явным образом учитывает пространственное размещение агентов и транспортные издержки; 3) совместима с действующей нормативной моделью и основана на реальной информации о российской экономике.

Изучаются и тестируются функциональные возможности инвестиционного блока АОМММ. В целом ставится задача сконструировать в рамках данной модели инвестиционный блок таким образом, чтобы он учитывал ее нацеленность на отражение межотраслевых и межрегиональных потоков в российской экономике. Удачно сконструированный инвестиционный блок позволяет провести

разного рода экспериментальные расчеты, включающие различные сценарии роста экономики, изменения пространственной структуры и т. д.

Рассмотрены два режима для инвестиционного поведения фирм. Первый – режим поддержания первоначальных производственных мощностей – наиболее близок к статическому варианту модели без инвестиционного блока. Предполагается, что каждая фирма имеет некоторый размер первоначальных мощностей и пытается поддерживать этот уровень. Для этого режима анализируется проблема воспроизведения ранее полученных результатов по стационарному варианту модели.

Второй режим инвестиционного поведения позволяет привязать объем инвестиций к финансовым показателям фирмы и тем самым сделать размер фирмы меняющимся. Он основан на том, что объем внутрифирменных инвестиций равен фиксированной доле от валовой прибыли после налогообложения (без вычета амортизации). Проверяется гипотеза, что подбором коэффициентов для этого режима можно добиться выхода большинства фирм на стационарную траекторию, при которой размер мощностей остается практически неизменным, причем объемы выпуска по отраслям и макрорегионам можно сделать достаточно близкими к заданным.

Еще одна исследуемая гипотеза состоит в том, что второй режим позволяет моделировать процессы роста в многоотраслевой и многорегиональной экономике, сопровождаемые изменением ее структуры, причем благодаря гибкости данного режима структурные изменения происходят сбалансированно. Рассматривается режим роста за счет снижения коэффициентов трудоемкости на 2 % в год.

## **1. Динамика производства в макроэкономических агент-ориентированных моделях**

В литературе представлен целый ряд достаточно развитых макроэкономических агент-ориентированных моделей, в которых описываются динамика производства и процессы экономического роста. В частности, это Eugace [2], Eugace@Unibi [3], MABM [4], Кейнс + Шумпетер [5] и Lagom [6].

К ранним экономическим агентным моделям можно отнести модель Р. Нельсона и С. Уинтера, а также модель MOSES. Нельсон и Уинтер являются пионерами так называемой эволюционной экономики. Они предложили имитационную модель шумпетерианского эволюционного экономического роста, в которой в явном виде моделируется поведение фирм на микроуровне [7; 8]. В частности, акцент сделан на следование фирмами установившейся практике (routines).

В статье [9] Г. Элиассон использовал шведскую имитационную микро-макро-модель MOSES [10] для изучения экономического роста, который при общем поступательном характере прерывается периодами экономической неустойчивости. Модель MOSES имеет многоотраслевую структуру, причем часть отраслей моделируется только агрегированно, а часть – на уровне отдельных фирм, поведение которых характеризуются ограниченной рациональностью.

В монографии Р. Маккейна [11] ставится задача с помощью агент-ориентированного моделирования экономического роста объяснить наблюдаемое явление

ние дихотомизации, когда страны или регионы разделяются на «клубы конвергенции» с разной производительностью. Модель отличается тем, что она учитывает, во-первых, пространственные связи между агентами с помощью клеточных автоматов, а во-вторых, феномен обучения в процессе функционирования (learning-by-doing).

В [12] в агентной модели роста получен эффект гистерезиса, основанный на необратимых издержках и рыночных несовершенствах. В данной модели временные потрясения в экономике (например, политика жесткой экономии) порождают перманентный отрицательный сдвиг в уровне производства.

Модель Гуальди и Мандела [13] демонстрирует сложную динамику эндогенного роста в многосекторной экономике, находящуюся под воздействием многих факторов, таких как эволюция производственных сетей, инновации и рост производительности фирм за счет разнообразия производственных факторов.

Ф. Хартинг [14] экспериментально на агент-ориентированной модели исследует, как на долгосрочный экономический рост влияют разные виды стабилизационной политики.

Большинство из указанных моделей представляют рост как эндогенный процесс, происходящий за счет технологических инноваций. Кроме того, важная общая черта многих современных агент-ориентированных макроэкономических моделей – это следование принципу согласованности потоков и запасов (stock-flow consistency), который в настоящее время стал достаточно популярным в макроэкономическом моделировании в целом [15].

Общее представление о макроэкономических АОМ в целом можно получить из обзорной статьи [16]. В [1] представлен обзор моделирования макроэкономической политики в АОМ. В статье [17] проведен подробный сравнительный анализ различных макроэкономических АОМ с акцентом на моделирование инвестиций в основной капитал.

## 2. Описание агент-ориентированной модели

**Общая характеристика.** Модель АОМММ (агент-ориентированная многорегиональная межотраслевая модель «затраты – выпуск») разрабатывается в НГУ и ИЭОПП СО РАН (Новосибирск) под руководством В. И. Суслова [18–20].

В модели существуют следующие основные блоки и группы агентов:

- домохозяйства (стремятся увеличить полезность за счет выбора структуры потребления при данном доходе, предъявляют спрос на потребительские товары, предлагают свой труд фирмам),
- фирмы (стремятся увеличить прибыль за счет выбора цены и производственных мощностей, ориентируясь на ожидаемый спрос, предъявляют спрос на производственные факторы),
  - товарные рынки (реализуют механизм торговли),
  - правительство (собирает налоги, предоставляет общественные блага),
  - рынок труда (уравновешивает спрос и предложение труда, определяет ставку заработной платы).

В описывающих поведение агентов алгоритмах используется обучение на основе адаптивных ожиданий, а также регрессий с меняющимися коэффициен-

тами. Планы агентов (цены и объемы производства фирм, структура потребления домохозяйств) меняются за счет случайных мутаций в соответствии с их целевыми функциями. Таким образом, учитывается неполная рациональность и несовершенная информация.

АОМММ задумана для моделирования экономики России. Она отличается от других имеющихся агент-ориентированных моделей несколькими особенностями. Во-первых, по структуре она похожа на модели общего равновесия и имитирует многоотраслевую и многорегиональную экономику в целом (а не просто город или один регион). Во-вторых, она позволяет исследовать экономические процессы, имеющие пространственный характер. Домохозяйства и фирмы относятся к одному из трех макрорегионов («Запад», «Центр» и «Восток») и привязаны к точкам на карте России. В алгоритмах взаимодействия агентов учитываются их координаты и соответствующие транспортные издержки. В-третьих, модель близко соответствует нормативной модели – малоразмерному варианту межрегиональной модели «затраты – выпуск» ОМММ – по отраслям, регионам и технологиям.

Принцип согласованности потоков и запасов в АОМММ в явном виде не проводится, но архитектура модели предусматривает горизонтальную согласованность денежных потоков между агентами. Кроме того, для всех товарных рынков выполняются балансы по производству и потреблению. Для анализа результатов работы модели и проверки согласованности разработаны балансовые таблицы, следующие структуре таблиц «затраты – выпуск» (см. [20]). В настоящее время таблица дополнена четвертым квадрантом с отрицательными записями. В такой таблице суммы по столбцам и строкам должны быть нулевые, что отражает согласованность денежных потоков в модели: если один агент получает некоторую денежную сумму, то какой-то другой агент должен ее выплатить.

Модель позволяет проводить исследования по самым разным направлениям. В частности, ранее с помощью нее воспроизводились следующие макроэкономические явления: влияние транспортных издержек на структуру товарных потоков между макрорегионами; изменение благосостояния населения в ответ на изменение ставок налогов; изменение благосостояния населения и показателей экономического неравенства в ответ на изменения структуры социальных пособий.

**Потребление.** Благосостояние домохозяйства измеряется значением его полезности и зависит от потребления обычных частных благ и уровня общественного блага, обеспечиваемого правительством. Полезность рассчитывается по функции Кобба – Дугласа:

$$U_{ht} = \exp \left( \sum_{i=1}^N k_{hi}^c \ln(x_{hit}) + k_h^g \ln(g_{ht}) \right),$$

где  $U_{ht}$  – полезность для домохозяйства  $h$  в момент времени  $t$ ,  $x_{hit}$  – потребление товара  $i$  в момент времени  $t$ ,  $g_{ht}$  – потребление общественного блага в момент времени  $t$ .

Домохозяйство поддерживает буферный запас дохода и выбирает потребительский бюджет по долгосрочному ожидаемому уровню дохода. Домохозяйства стремятся максимизировать полезность при данной величине бюджета  $Inc_{ht}^e$ .

В каждый период домохозяйство выбирает структуру потребления ( $s_{hit}$ ) в процентах и суммы на товары каждой отрасли  $s_{hit}Inc_{ht}^e$ . Полезность при выборе структуры рассчитывается при прогнозных ценах  $\bar{p}_{hit}$ , т. е. берется

$$x_{hit} = s_{hit}Inc_{ht}^e / \bar{p}_{hit}.$$

Функция спроса домохозяйства в данном секторе определяется выделенной на этот товар суммой и имеет гиперболическую форму:  $s_{hit}Inc_{ht}^e/p$ .

**Производство.** Производственная деятельность в текущем варианте модели представлена фирмами частного сектора, принадлежащими к одной из четырех отраслей: «Добыча», «Обработка», «Строительство» и «Услуги». Фирма стремится максимизировать ожидаемую прибыль. Также есть две отрасли, представляющие государственный сектор: транспорт и производство общественного товара. Транспортные услуги производятся государственным предприятием и финансируются за счет централизованно устанавливаемых транспортных тарифов. Общественный товар тоже производится государственным предприятием. В государственном секторе цена устанавливается в виде фиксированной наценки к удельным издержкам.

Продукция фирмы может принимать вид потребительских товаров (С-товаров), товаров промежуточного потребления (I-товаров) или капитальных товаров (К-товаров) в зависимости от целей использования. Если продукцию покупает домохозяйство, она становится С-товаром, а если фирма – то I- или К-товаром. Когда фирма-покупатель приобретает продукцию одной из капиталобразующих отраслей, то делает общую заявку на I- и К-товары. Такой подход позволяет рассматривать отрасли в целом и все фирмы данных отраслей как однопродуктовые.

Есть два вида капитала и два вида К-товаров – условно «Станки и оборудование» и «Здания и сооружения». Первый производится отраслью «Обработка», второй – отраслью «Строительство».

Производство фирмы по аналогии с моделью «затраты – выпуск» описывается левонтьевской производственной функцией, подразумевающей линейность затрат производственных факторов по объему производства:

$$y_{ft} = \min \left\{ \min_i \frac{x_{fit}}{a_{fi}}, \min_c \frac{K_{fct}}{a_{fKc}}, \frac{L_{ft}}{a_{fL}} \right\}.$$

где  $y_{ft}$  – выпуск продукции фирмы  $f$  в период  $t$ ,  $x_{fit}$  – количество затрачиваемого производственного фактора (сырья, материалов и т. д.) из сектора  $i$ ,  $a_{fi}$  – технологический коэффициент,  $K_{fct}$  – запас основного капитала вида  $c$ ,  $a_{fKc}$  – коэффициент капиталоемкости,  $L_{ft}$  – используемое в период  $t$  количество труда,  $a_{fL}$  – коэффициент трудоемкости. Для сырья, материалов и трудовых ресурсов модель предполагает пропорциональность их затрат объему производства  $y_{ft}$  (т. е.  $x_{fit} = a_{fi}y_{ft}$ ,  $L_{ft} = a_{fL}y_{ft}$ ). Эти факторы закупаются в требуемом количестве каждый период. Запасы капитала  $K_{fct}$  используются такие, какие складываются после выбытия и покупки нового капитала в начале периода. Основной

капитал может быть недогружен, и поэтому его запасы  $K_{fct}$  определяют ограничения сверху на объем производства:

$$y_{ft} \leq K_{fct}/a_{fKc}.$$

Эти ограничения можно записать одним неравенством

$$y_{ft} \leq \hat{y}_{ft},$$

где  $\hat{y}_{ft}$  – уровень производственных мощностей фирмы:

$$\hat{y}_{ft} = \min_c \frac{K_{fct}}{a_{fKc}}.$$

Спрос на продукцию отдельной фирмы формируется из спроса на С- и I-товары, а также К-товары, если она принадлежит капиталобразующей отрасли. Фирма ориентируется на некоторую функцию спроса на свою продукцию, которая показывает, как спрос зависит от цены. Функция спроса вычисляется по модели регрессии, коэффициенты которой меняются адаптивно в зависимости от ситуации на рынке.

Текущие издержки фирмы определяются ее леонтьевской технологией и равны  $y(\sum_i p_{it}a_i + w_t a_L)$ , где  $y$  – выпуск,  $p_{it}$  – цена фактора,  $a_i$  – технологический коэффициент,  $w_t$  – ставка заработной платы. Вместо фактических цен  $p_{it}$  используются прогнозы  $\bar{p}_{it}$ .

Фирма выбирает выпуск  $y_{ft}$  (в пределах имеющихся производственных мощностей  $\hat{y}_{ft}$ ) и цену  $p_{ft}$ , стремясь к увеличению прибыли. При этом она ориентируется на ожидаемый спрос и ожидаемые издержки. Фирма поддерживает запасы готовой продукции на уровне, превышающем на фиксированный коэффициент долгосрочный ожидаемый спрос.

**Товарные рынки и механизм торговли.** Товарные рынки реализуют механизм торговли обычными товарами и услугами. В рамках каждой отрасли существует рынок одного (дифференцированного) товара. На рынке работает некоторый механизм торговли, который устанавливает объемы продаж и покупок – сколько данный покупатель купил у данного продавца.

Фирмы объявляют через соответствующий товарный рынок цены на свою продукцию  $p_{ft}$ . Поскольку фирмы хранят достаточно большие запасы готовой продукции, объемы продаж в обычных условиях ничем не ограничиваются. (Если всё же величина спроса превысила имеющиеся запасы, то происходит рacionamento.)

Агент-покупатель (фирма, государственное предприятие или домохозяйство) до начала торговли определяет свою функцию спроса – какой объем товара он готов купить при данной средней цене. Вид функции спроса домохозяйств описан выше. Спрос со стороны фирм и государственных предприятий неэластичен и определяется выбранным в текущем периоде выпуском.

Агент-покупатель делит свой спрос на небольшие порции и выбирает для каждой порции одного из продавцов с вероятностями, задаваемыми по модели мультиномиального логита, в которой вероятность выбора фирмы-поставщика

зависит от цены, включающей транспортные издержки. Далее покупатель делает соответствующие заявки.

**Другие рынки и сектора.** Рынок труда в текущем варианте модели единый с единой ставкой заработной платы. Предложение домохозяйствами труда фиксировано, а фирмы нанимают труд в зависимости от выбранного выпуска. Рынок труда имеет в основе упрощенный механизм установления ставки заработной платы – аналог вальрасовского нащупывания. При несовпадении спроса и предложения единая ставка заработной платы корректируется в соответствующем направлении. Производство в отрасли «Транспорт» осуществляется единой государственной компанией. Правительство собирает налоги в бюджет. Из бюджета финансируется производство общественного товара и различные пособия. Для потребителей-домохозяйств общественный товар бесплатен. Также имеется пенсионный фонд, из которого получают доходы пенсионеры.

**Инвестиции в основной капитал.** У каждой фирмы  $f$  в период  $t$  есть некоторые однородные запасы капитала  $K_{fct}$  разных видов  $c$  (однородные в том смысле, что нет различия по возрасту и / или технологическим поколениям капитала). Выбытие капитала каждого вида  $c$  в результате использования в производстве определяется некоторым постоянным коэффициентом выбытия  $\delta_c$ . В начале периода  $t$  выбывает  $\delta_c K_{fc,t-1}$ , где  $K_{fc,t-1}$  – запас капитала вида  $c$  на конец предыдущего периода. Остается  $(1 - \delta_c)K_{fc,t-1}$ , потом к этому количеству прибавляется вновь приобретенный фирмой капитал  $D_{fKct}$ , и получается новый запас

$$K_{fct} = (1 - \delta_c)K_{fc,t-1} + D_{fKct}.$$

В модели не учитываются инвестиционные лаги, поэтому все К-товары, которые фирмы приобрели в данном периоде, могут быть сразу же использованы в производстве.

Таким образом, для использования в производстве в период  $t$  фирме  $f$  доступно  $K_{fct}$  капитала вида  $c$ . Выпуск фирмы ограничен неравенствами

$$y_{ft} \leq \frac{K_{fct}}{a_{fKc}},$$

поэтому если фирма планирует производить не меньше, чем  $\hat{y}$ , то ей следует запланировать закупки капитального блага  $c$  в объеме

$$D_{Kct} = \max\{a_{fKc}\hat{y} - (1 - \delta_c)K_{fc,t-1}, 0\}.$$

Значит, если фирма  $f$  хочет в период  $t$  иметь производственные мощности не меньше  $\hat{y}$ , и  $\bar{p}_{fKc,t-1}$  – ожидания по поводу цены капитального блага вида  $c$ , сформированные на основе информации, доступной к концу периода  $t - 1$ , то ожидаемая требуемая сумма инвестиций задается формулой

$$\overline{\text{ReqInv}}_{ft}(\hat{y}) = \sum_{c=1}^{N_c} \bar{p}_{fKc,t-1} \max\{a_{fKc}\hat{y} - (1 - \delta_{fc})K_{fc,t-1}, 0\}.$$

При данном инвестиционном бюджете  $PIInv_{f,t-1}$ , выбранном в период  $t - 1$ , фирма вычисляет плановые мощности  $\hat{y}$ , решая уравнение

$$\overline{ReqInv}_{ft}(\hat{y}) = PIInv_{f,t-1}.$$

Далее исходя из найденного значения  $\hat{y}$  вычисляется спрос на К-товары  $D_{Kct}$ .

На текущем этапе разработки модели используется только вариант с финансированием внутрифирменных инвестиций за счет прибыли самой фирмы. Фирма после завершения всех сделок и уплаты налогов получает некоторую величину прибыли, доступной для инвестиций,  $ProfitInv_{ft}$ . Это валовая прибыль после налогообложения (где из валовой прибыли не вычитается амортизация). Если  $ProfitInv_{ft} > 0$ , то фирма вычисляет планируемый объем инвестиций для следующего периода  $PIInv_{ft}$ , такой что  $0 \leq PIInv_{ft} \leq ProfitInv_{ft}$ . Оставшаяся сумма идет на выплату дивидендов собственникам. Если  $ProfitInv_{ft} < 0$ , т. е. фирма временно убыточна, то  $PIInv_{ft} = 0$ , дивиденды не выплачиваются и фирма обращается к правительству за помощью в покрытии убытков. Планирование производится в конце периода, а не в начале, поскольку от принятого решения зависят выплаты собственникам, которые делаются в конце периода.

Вопрос о размере бюджета внутрифирменных инвестиций  $PIInv_{ft}$  в модели пока является открытым. Ниже рассматриваются два простых варианта: поддержание первоначального уровня производственных мощностей фирмы и использование фиксированной доли от  $ProfitInv_{ft}$ . Более сложный алгоритм принятия инвестиционных решений может быть построен на основе прогнозирования цен и спроса на продукцию в зависимости от объема инвестиций и вычисления соответствующих показателей дисконтированных денежных потоков (DCF).

### 3. Моделирование стационарной динамики в АОМММ с инвестициями

В перспективе АОМММ нацелена на моделирование макроэкономической динамики в многорегиональном экономическом пространстве. В связи с этим стоит задача создания полноценного динамического варианта АОМММ, а привнесение динамики требует адекватного представления инвестиционных процессов. В частности, требуется сконструировать и отработать конкретные алгоритмы, по которым действуют агенты, участвующие в инвестиционных процессах.

До начала работы над инвестиционным блоком АОМММ по своей структуре напоминала статическую модель общего равновесия, в которой отсутствовали инвестиции в основной капитал и, следовательно, возможности для роста производственных мощностей. В данной статье отражен переходный этап от статической к динамической модели.

Для проверки работы появившихся в модели новых элементов была проведена серия экспериментов. Прежде всего модель была инициализирована и откалибрована в соответствии с параметрами российского баланса за 2015 г. Соответствующее состояние экономики было принято за исходное для проводимых экспериментов.

Рассматривалось два режима выбора размера инвестиционного бюджета.

1. **Режим поддержания первоначальных мощностей** наиболее близок к статическому варианту модели и позволяет воспроизводить ранее полученные по модели результаты в обновленной модели АОМММ. Предполагается, что каждая фирма  $f$  имеет некоторый размер первоначальных производственных мощностей  $\dot{y}_f$ . Фирма пытается по мере возможности поддерживать производственные мощности на уровне  $\dot{y}_f$ . Для этого, если позволяет величина доступных средств  $\text{ProfitInv}_{ft}$ , она выбирает сумму инвестиций по формуле

$$\text{PIInv}_{ft} = \overline{\text{ReqInv}}_{f,t+1}(\dot{y}).$$

2. **Режим фиксированной доли прибыли** позволяет привязать объем инвестиций к финансовым показателям фирмы и тем самым сделать размер фирмы меняющимся. Сумма инвестиций берется как фиксированная доля  $\kappa_f \in (0; 1)$  от  $\text{ProfitInv}_{ft}$  при условии  $\text{ProfitInv}_{ft} > 0$ :

$$\text{PIInv}_{ft} = \kappa_f \text{ProfitInv}_{ft}.$$

Сначала мы рассмотрим вопрос о том, можно ли с помощью второго режима имитировать результаты, полученные при использовании первого режима, и, следовательно, результаты статической АОМММ. Наша гипотеза состоит в том, что подбором коэффициентов  $\kappa_f$  можно добиться выхода большинства фирм на стационарную траекторию, при которой размер мощностей остается практически неизменным, причем объемы выпуска по отраслям и макрорегионам можно сделать достаточно близкими к заданным.

Более конкретно, фиксированные коэффициенты  $\kappa_f$  для второго режима будем рассчитывать на основе прогона модели в первом режиме. Для каждой отрасли в каждом макрорегионе вычислим среднюю долю прибыли, которая идет на инвестиции (табл. 1). Затем зададим  $\kappa_f$  равными полученным в эксперименте долям в зависимости от того, к какому макрорегиону и к какой отрасли относится фирма  $f$ .

Таблица 1

Доля инвестиций в прибыли в первом режиме  
(среднее за периоды 251–300)

Table 1

Share of investments in profits in the first regime  
(average for periods 251–300)

Регион	Добыча	Обработка	Строительство	Услуги
1	0.990	0.366	0.264	0.277
2	0.503	0.417	0.385	0.277
3	0.383	0.466	0.966	0.395

В табл. 2 представлены результаты расчетов с точки зрения физических объемов производства по регионам и отраслям. Объемы производства для отдельных отраслей в отдельных макрорегионах заметно отличаются, но в целом по трем макрорегионам (строка «Всего») в каждой отрасли отличие небольшое.

Таблица 2

Объемы выпуска в двух режимах  
(во внутримодельных единицах, среднее за периоды 251–300)

Table 2

Output volumes in two regimes  
(in model units, average for periods 251–300)

Регион	Добыча	Обработка	Строительство	Услуги
Первый режим				
1	2257	18200	4626	21495
2	4149	14797	4052	10592
3	8443	13199	3273	9786
Всего	14848	46196	11951	41873
Второй режим				
1	2340 (3.7 %)	18323 (0.7 %)	4610 (–0.3 %)	21537 (0.2 %)
2	4151 (0 %)	14858 (0.4 %)	4185 (3.3 %)	10614 (0.2 %)
3	8410 (–0.4 %)	13275 (0.6 %)	3101 (–5.3 %)	9812 (0.3 %)
Всего	14901 (0.4 %)	46456 (0.6 %)	11897 (–0.5 %)	41963 (0.2 %)

Для первого режима обычно не возникает проблем с достижением стационарности по выпускам. Для второго режима такая проблема может возникнуть. Таким образом, следует изучить характер динамики рядов выпуска. Рисунок 1 подтверждает выход экономики на стационарную траекторию. Исключением является строительство в регионе 3 «Восток», но колебания в этом сегменте практически не сказываются на остальных показателях. Модельный период – это неделя, поэтому 300 периодов, изображенных на графике, соответствуют примерно 5–6 годам.

Таким образом, подтверждена гипотеза о том, что инвестиции во втором режиме (режиме с использованием фиксированной доли прибыли) позволяют воспроизводить стационарные состояния в экономике. При этом оказывается, что второй режим приводит к гибкости экономики по отношению к масштабным изменениям параметров государственной политики. В настоящее время с помощью обновленной модели АОМММ с блоком инвестиций проводятся исследования по влиянию структуры и размера государственного сектора на благосостояние населения, для которых подобная гибкость существенна.

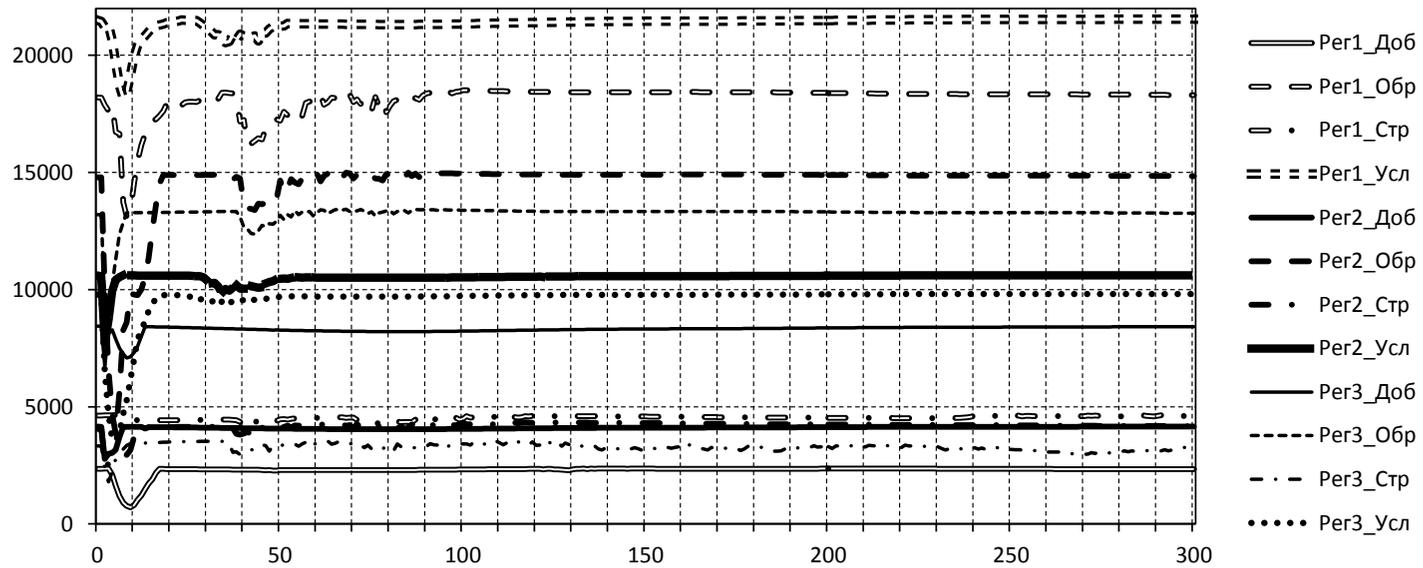


Рис. 1. Динамика выпуска по регионам и отраслям во втором режиме за 300 периодов  
 Fig. 1. Output dynamics by region and sector under the second regime for 300 periods

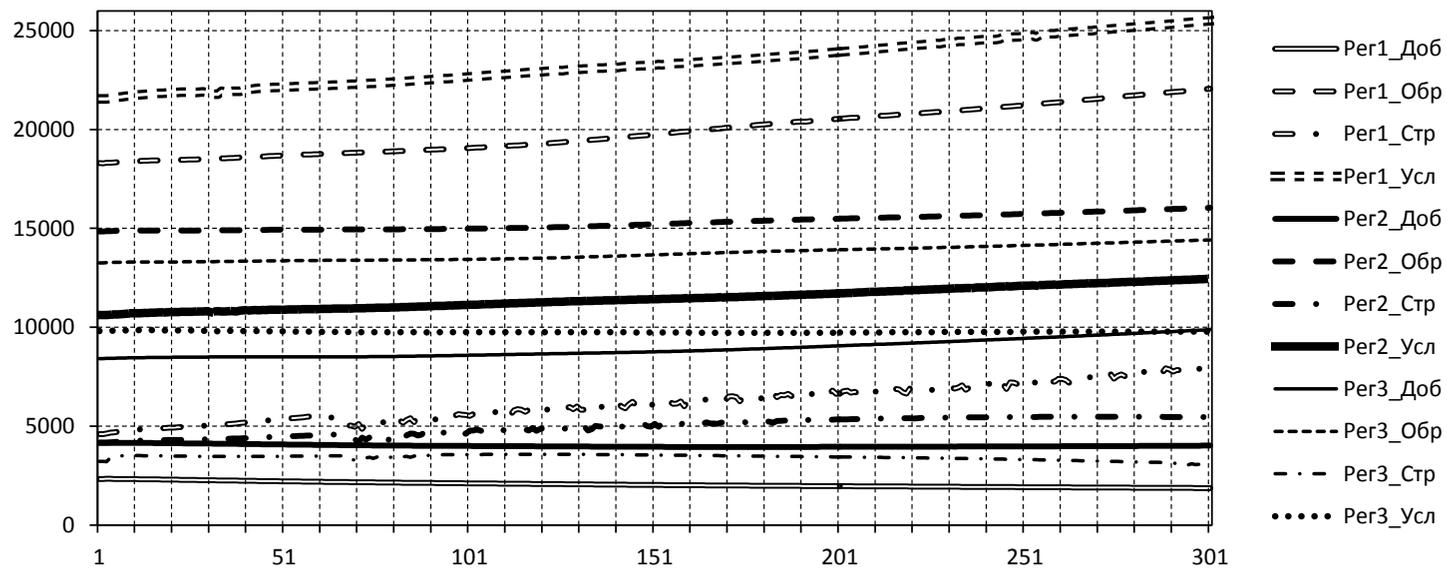


Рис. 2. Динамика выпуска по регионам и отраслям за 300 периодов в эксперименте с ростом  
 Fig. 2. Output dynamics by region and sector for 300 periods in the growth experiment

Еще одна гипотеза, которую хотелось бы изучить, состоит в том, что второй режим позволяет моделировать процессы роста в экономике, сопровождаемые изменением ее структуры, причем благодаря гибкости данного режима структурные изменения происходят сбалансированно.

Общий размер трудовых ресурсов является ограничивающим фактором для роста, так что при постоянстве этого размера и используемых технологий экономика в долгосрочном периоде переходит к стационарности. Чтобы создать условия для экономического роста можно предусмотреть увеличение трудовых ресурсов или же изменения в производственных технологиях. Здесь мы пойдем по второму пути, а именно будем считать, что коэффициенты трудоемкости  $a_{fL}$  для всех фирм падают постоянным темпом 2 % в годовом исчислении. Такой подход позволяет на текущем этапе разработки модели ввести технический прогресс как экзогенный и не вдаваться в детали инновационных процессов.

На рис. 2 приведены графики рядов выпуска для эксперимента с экономическим ростом за счет производительности труда. При проведении данного эксперимента экономика инициализировалась стационарным состоянием для второго режима из предыдущего эксперимента. В целом траектории выпуска свидетельствуют об устойчивом росте, причем скорость роста различаются по регионам и отраслям.

В табл. 3 показаны темпы прироста выпуска по отраслям за последние 10 периодов по сравнению со стационарным состоянием, которым инициализировалась экономика. Таблица подтверждает наличие существенных отраслевых и региональных различий в скорости роста. В частности, произошел опережающий рост строительства в регионе 3. В результате доля региона 3 в объеме строительства выросла с 26.1 до 31.2 %.

Таблица 3

Рост выпуска во втором режиме, %

Table 3

Output growth under the second regime, %

Регион	Добыча	Обработка	Строительство	Услуги
1	9.3	7.0	13.7	1.4
2	0.1	5.6	12.3	1.9
3	-1.3	5.8	45.4	4.1
Всего	0.8	6.2	21.5	2.2

Рост в экономике в рассматриваемом режиме происходит достаточно сбалансированно, а именно более быстрый рост в капиталобразующих отраслях обеспечивает достаточным капиталом все отрасли и приводит к сбалансированности рынка труда. Создаваемые в процессе роста производственные мощности оказываются почти полностью загруженными. В целом динамика основных показателей довольно ровная, без резких колебаний.

## Заключение

По результатам проведенных модельных расчетов можно сделать вывод о том, что добавление блока инвестиций расширяет возможности модели без потери свойств, заложенных в предыдущих версиях. Была подтверждена гипотеза, что подбором коэффициентов для режима фиксированной доли прибыли можно добиться выхода большинства фирм на стационарную траекторию, при которой размер мощностей остается практически неизменным, причем объемы выпуска по отраслям и макрорегионам можно сделать достаточно близкими к заданным. Более того, второй режим приводит к гибкости экономики по отношению к масштабным изменениям параметров государственной бюджетной политики.

В эксперименте с ростом экономики за счет уменьшения трудоемкости наблюдается стабильная (без резких колебаний) поступательная динамика выпуска. При этом темпы роста существенно различаются по регионам и отраслям. В частности, наблюдается опережающий рост строительства в макрорегионе «Восток». Как и ожидалось, рост в экономике в рассматриваемом режиме происходит достаточно сбалансированно с точки зрения отраслевой структуры: более быстрый рост в отраслях, производящих К-товары, обеспечивает рост мощностей во всех отраслях, причем мощности остаются практически полностью загруженными. На рынке труда при этом сохраняется баланс спроса и предложения.

В целом введение в модель инвестиций в основной капитал, зависящих от финансовых показателей фирмы, приводит к тому, что моделируемая экономика может как расти, так и сокращаться в результате независимых инвестиционных решений отдельных агентов. Принципиально важным моментом является то, что эти же решения обуславливают и изменения в отраслевой и пространственной структуре экономики.

## Список литературы

1. **Fagiolo G., Roventini A.** Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Models Redux: New Developments and Challenges Ahead. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2017, vol. 20, no. 1, article no. 1.
2. **Dawid H. et al.** Skills, Innovation, and Growth: An Agent-Based Policy Analysis. *Jahrbucher fur Nationalokonomie & Statistik*, 2008, vol. 228, iss. 2/3, pp. 251–275.
3. **Dawid H., Harting P., Neugart M.** Fiscal transfers and regional economic growth. *Review of International Economics*, 2018, no. 26, pp. 651–671.
4. **Assenza T., Delli Gatti D., Grazzini J.** Emergent Dynamics of a Macroeconomic Agent Based Model with Capital and Credit. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 2015, no. 50, pp. 5–28.
5. **Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** Schumpeter meeting Keynes: a policy-friendly model of endogenous growth and business cycles. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 2010, no. 34, pp. 1748–1767.

6. **Mandel A. et al.** Agent-Based Dynamics in Disaggregated Growth Models. Documents de travail du Centre d'Economie de la Sorbonne 10077, 2010, 34 p.
7. **Nelson R., Winter S.** An Evolutionary Theory of Economic Change. Cambridge, MA, Belknap, 1982.
8. **Nelson R., Winter S., Schuette H.** Technical change in an evolutionary model. *The Quarterly Journal of Economics*, 1976, no. 90, pp. 90–118.
9. **Eliasson G.** Modeling the experimentally organized economy: Complex dynamics in an empirical micro-macro model of endogenous economic growth. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 1991, no. 16 (1–2), pp. 153–182.
10. **Albrecht J. et al.** MOSES Code. Stockholm, IUI, 1989.
11. **McCain R. A.** Agent-based Computer Simulation of Dichotomous Economic Growth. Kluwer Academic Publisher, 2000.
12. **Bassi F., Lang D.** Investment hysteresis and potential output: A post-Keynesian – Kaleckian agent-based approach. *Economic Modelling*, 2016, no. 52, pp. 35–49.
13. **Gualdi S., Mandel A.** Endogenous growth in production networks. *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, no. 29, pp. 91–117.
14. **Harting P.** Macroeconomic Stabilization and Long-Term Growth: The Role of Policy Design. *Macroeconomic Dynamics*, 2019, no. 25, pp. 1–46.
15. **Nikiforos M., Zezza G.** Stock-Flow Consistent Macroeconomic Models: A Survey. *Journal of Economic Surveys*, 2017, no. 31, pp. 1204–1239.
16. **Dawid H., Delli Gatti D.** Agent-Based Macroeconomics. In: Hommes C., LeBaron B. (eds.). Handbook of Computational Economics. Amsterdam, North Holland, 2018, pp. 63–156.
17. **Цыплаков А. А., Мельникова Л. В.** Инвестиции в основной капитал и макроэкономическое агент-ориентированное моделирование // Мир экономики и управления. 2021. Т. 21, № 1. С. 5–25. DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-5-28
18. **Суслов В. И., Доможиров Д. А., Ибрагимов Н. М., Костин В. С., Мельникова Л. В., Цыплаков А. А.** Агент-ориентированная многорегиональная модель «затраты – выпуск» российской экономики // Экономика и математические методы. 2016. Т. 52, № 1. С. 112–131.
19. **Доможиров Д. А., Ибрагимов Н. М., Мельникова Л. В., Цыплаков А. А.** Интеграция подхода «затраты – выпуск» в агент-ориентированное моделирование. Часть 1. Методологические основы // Мир экономики и управления. 2017. Т. 17, № 1. С. 86–99.
20. **Доможиров Д. А., Ибрагимов Н. М., Мельникова Л. В., Цыплаков А. А.** Интеграция подхода «затраты – выпуск» в агент-ориентированное моделирование. Часть 2. Межрегиональный анализ в искусственной экономике // Мир экономики и управления. 2017. Т. 17, № 2. С. 15–25.

## References

1. **Fagiolo G., Roventini A.** Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Models Redux: New Developments and Challenges Ahead. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2017, vol. 20, no. 1, article no. 1.

2. **Dawid H. et al.** Skills, Innovation, and Growth: An Agent-Based Policy Analysis. *Jahrbucher fur Nationalokonomie & Statistik*, 2008, vol. 228, iss. 2/3, pp. 251–275.
3. **Dawid H., Harting P., Neugart M.** Fiscal transfers and regional economic growth. *Review of International Economics*, 2018, no. 26, pp. 651– 671.
4. **Assenza T., Delli Gatti D., Grazzini J.** Emergent Dynamics of a Macroeconomic Agent Based Model with Capital and Credit. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 2015, no. 50, pp. 5–28.
5. **Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** Schumpeter meeting Keynes: a policy-friendly model of endogenous growth and business cycles. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 2010, no. 34, pp. 1748–1767.
6. **Mandel A. et al.** Agent-Based Dynamics in Disaggregated Growth Models. Documents de travail du Centre d'Economie de la Sorbonne 10077, 2010, 34 p.
7. **Nelson R., Winter S.** An Evolutionary Theory of Economic Change. Cambridge, MA, Belknap, 1982.
8. **Nelson R., Winter S., Schuette H.** Technical change in an evolutionary model. *The Quarterly Journal of Economics*, 1976, no. 90, pp. 90–118.
9. **Eliasson G.** Modeling the experimentally organized economy: Complex dynamics in an empirical micro-macro model of endogenous economic growth. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 1991, no. 16 (1–2), pp. 153–182.
10. **Albrecht J. et al.** MOSES Code. Stockholm, IUI, 1989.
11. **McCain R. A.** Agent-based Computer Simulation of Dichotomous Economic Growth. Kluwer Academic Publisher, 2000.
12. **Bassi F., Lang D.** Investment hysteresis and potential output: A post-Keynesian – Kaleckian agent-based approach. *Economic Modelling*, 2016, no. 52, pp. 35–49.
13. **Gualdi S., Mandel A.** Endogenous growth in production networks. *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, no. 29, pp. 91–117.
14. **Harting P.** Macroeconomic Stabilization and Long-Term Growth: The Role of Policy Design. *Macroeconomic Dynamics*, 2019, no. 25, pp. 1–46.
15. **Nikiforos M., Zezza G.** Stock-Flow Consistent Macroeconomic Models: A Survey. *Journal of Economic Surveys*, 2017, no. 31, pp. 1204–1239.
16. **Dawid H., Delli Gatti D.** Agent-Based Macroeconomics. In: Hommes C., LeBaron B. (eds.). Handbook of Computational Economics. Amsterdam, North Holland, 2018, pp. 63–156.
17. **Tsyplakov A. A., Melnikova L. V.** Fixed Investments and Macroeconomic Agent-Based Modeling. *World of Economics and Management*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 5–28. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-5-28
18. **Suslov V. I., Domozhirov D. A., Ibragimov N. M., Kostin V. S., Melnikova L. V., Tsyplakov A. A.** Agent-Based Multiregional Input-Output Model of the Russian Economy. *Economics and Mathematical Methods*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 112–131. (in Russ.)
19. **Domozhirov D. A., Ibragimov N. M., Melnikova L. V., Tsyplakov A. A.** Integration of Input – Output Approach into Agent-Based Modeling. Part 1. Methodological Principles. *World of Economics and Management*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 86–99. (in Russ.)

20. **Domozhirov D. A., Ibragimov N. M., Melnikova L. V., Tsyplakov A. A.** Integration of Input – Output Approach into Agent-Based Modeling. Part 2. Interregional Analysis in an Artificial Economy. *World of Economics and Management*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 15–25. (in Russ.)

### Информация об авторе

**Александр Анатольевич Цыплаков**, кандидат экономических наук, доцент  
SPIN 77431  
Scopus Author ID 57192156252

### Information about the Author

**Alexander A. Tsyplakov**, Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor  
SPIN 77431  
Scopus Author ID 57192156252

*Статья поступила в редакцию 19.12.2021;  
одобрена после рецензирования 26.01.2022; принята к публикации 26.01.2022  
The article was submitted 19.12.2021;  
approved after reviewing 26.01.2022; accepted for publication 26.01.2022*