

УДК 330.322/.46
JEL D25, E22, D58
DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-5-28

Инвестиции в основной капитал и макроэкономическое агент-ориентированное моделирование

А. А. Цыплаков, Л. В. Мельникова

*Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН
Новосибирск, Россия
Новосибирский национальный исследовательский государственный университет
Новосибирск, Россия*

Аннотация

Значительный прогресс, наблюдаемый в области искусственной экономики, открывает новые возможности моделирования экономического роста. Агент-ориентированные модели (АОМ) позволяют оставить концепцию агента-представителя в прошлом и связать инвестиционные решения экономических агентов на микроуровне с долгосрочным макроэкономическим ростом. Современные АОМ предлагают новые алгоритмы моделирования ожиданий, взаимодействия агентов, технического прогресса, ценообразования, планирования производства. Наша статья анализирует современное состояние моделирования инвестиций в основной капитал в действующих макроэкономических АОМ. Предметом обзора служат группы моделей Eurace, CATS, KS, Jamel, Lagom. Авторы представляют также инвестиционный блок разрабатываемой агент-ориентированной многорегиональной межотраслевой модели (АОМММ). Сравнительный анализ показал, что современные АОМ, как правило, реализуют принцип согласованности потоков и запасов. Моделирование инвестиционного процесса требует детализации товарной номенклатуры, так что принятое первоначально двухсекторное разбиение на инвестиционные и потребительские товары сменяется более развернутыми структурами, откуда возникает проблема учета межотраслевых связей в производстве и потреблении. С этой проблемой справляется леонтьевская производственная функция, что подтверждается ее повсеместным использованием в АОМ. Размер инвестиций фирм чаще выводится из потребности расширения мощностей в соответствии с текущим производственным планом, так что планирование оказывается близоруким, а долгосрочные аспекты в АОМ еще во многом не реализованы. Тем не менее, уже сейчас АОМ воспроизводят многие явления, связанные с экономическим циклом. Разрабатываемая АОМММ обеспечивает горизонтальную согласованность денежных потоков между агентами и анализ результатов средствами таблиц «затраты-выпуск». АОМММ представляет собой шаг вперед в отражении межотраслевых и межрегиональных потоков. Модель воспроизводит рост и сокращение экономики в результате независимых инвестиционных решений отдельных фирм и домохозяйств, что отражается на отраслевой и пространственной структуре экономики. Дальнейшее развитие АОМММ связано с моделированием сбережений, внутрифирменных финансов, денежного рынка, инноваций и технического прогресса.

Ключевые слова

агент-ориентированное моделирование, инвестиционное поведение, корпоративные инвестиции

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., Мельникова Л. В. Инвестиции в основной капитал и макроэкономическое агент-ориентированное моделирование // Мир экономики и управления. 2021. Т. 21, № 1. С. 5–28. DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-5-28

Fixed Investments and Macroeconomic Agent-Based Modeling

A. A. Tsyplakov, L. V. Melnikova

*Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

The significant progress observed in the field of artificial economy opens up new possibilities for modeling economic growth. Agent-based models (ABM) allow leaving the concept of a representative agent in the past and linking investment decisions of economic agents at the micro level with long-term macroeconomic growth. Modern ABMs offer new algorithms for modeling expectations, agent interaction, technical progress, pricing, and production planning.

Our article analyzes the current state of modeling investment in fixed assets in operating macroeconomic ABMs. The subject of the review is the families of models Eurace, CATS, KS, Jamel, Lagom. The authors also present the investment block of the agent-based multiregional input-output model (ABMIOM) being developed.

Comparative analysis demonstrates that modern ABMs, as a rule, implement the principle of stock-flow consistency. Modeling the investment process requires detailing the commodity nomenclature, so that the initially adopted two-sector division into investment and consumer goods is replaced by more detailed structures, which gives rise to the problem of accounting for inter-sectoral relations in production and consumption. The Leontief production function copes with this problem, which is confirmed by its widespread use in ABM. The size of firms' investments is often derived from the need to expand capacity in accordance with the current production plan, so that planning turns out to be myopic, and long-term aspects in ABM are still largely unrealized. Nevertheless, already now ABMs reproduce many phenomena associated with the economic cycle.

The developed ABMIOM provides horizontal consistency of cash flows between agents and analysis of results using input-output tables. ABMIOM represents a step forward in reflecting intersectoral and interregional flows. The model reproduces the growth and contraction of the economy as a result of independent investment decisions of individual firms and households, which is reflected in the sectoral and spatial structure of the economy. Further development of ABMIOM is associated with the modeling of savings, intrafirm finance, money market, innovation and technical progress.

Keywords

agent-based modeling, investment behavior, corporate investments

Funding

Article presents the results of the research project “Agent-based spatial decision support systems at the regional level” carried out with financial support of RFBR, project number 19-410-540002

For citation

Tsyplakov A. A., Melnikova L. V. Fixed Investments and Macroeconomic Agent-Based Modeling. *World of Economics and Management*, 2021, vol. 21, no. 1, p. 5–28. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-1-5-28

Введение

Моделирование долгосрочного экономического роста невозможно без моделирования процесса накопления основного капитала. Влияние инвестиций в основной капитал на национальный экономический рост неоднократно подтверждено в эмпирических исследованиях [1; 2]. В то же время агрегированные инвестиции являются результатом индивидуальных решений фирм, принимаемых ими в целях с целью обеспечения долгосрочной конкурентоспособности.

Методика моделирования воспроизводства основного капитала оказывает существенное влияние на качество разрабатываемых экономических прогнозов. Используемые в настоящее время методики в динамических и межрегиональных межотраслевых моделях позволяют получать долгосрочные прогнозы в отраслевом и пространственном разрезе, но они отличаются высокой степенью агрегации и не увязаны с финансовыми результатами хозяйственной деятельности. Еще один недостаток традиционных моделей – использование неявной посылки об агенте-представителе, что нивелирует разнообразие мотиваций и поведения множества участников экономической деятельности. Один из возможных способов решения этих проблем – так называемый агент-ориентированный подход в моделировании [3; 4].

Агент-ориентированные модели (АОМ) состоят из компьютерных агентов и институциональной среды, в которой они взаимодействуют по определенным правилам. Суть агент-ориентированного подхода – проведение вычислительных экспериментов с такими моделями. Исследователи могут наделять модельных агентов различными чертами, делающими их поведение похожим на реальных агентов, такими как обучение и неполнота информации. В рамках агент-ориентированного подхода исследователь может создавать виртуальные миры с заданными свойствами, экспериментировать с ними и анализировать их поведение при изменении тех или иных условий и параметров.

Современная литература демонстрирует разнообразные подходы к агент-ориентированному макроэкономическому моделированию, среди которых можно выделить наиболее влиятельные. Они представлены в моделях Eurace@Unibi, CATS, KS, Jamel, Lagom, которые и служат предметом данного обзора. При всех отличиях в этих подходах можно выделить общие черты с точки зрения архитектуры моделей и принципов взаимодействия агентов на рынках. В них представлены *агенты* нескольких типов (домохозяйства, фирмы, банки, а также государственные органы), взаимодействующие на *рынках* потребительских товаров, капитальных или инвестиционных товаров, труда, кредитов и ценных бумаг. Это крупно- и среднемасштабные модели в отличие от маломасштабных АОМ, в которых домохозяйства и фирмы взаимодействуют на рынках потребительских товаров и труда.

В данной статье выполнен сравнительный анализ способов моделирования инвестиций в основной капитал в действующих макроэкономических АОМ и представлен инвестиционный блок в агент-ориентированной многорегиональной межотраслевой модели «затраты-выпуск» (АОМММ), в разработке которой принимают участие авторы статьи.

Следуя [5], в обзоре инвестиционные товары, соответствующий сектор и действующие в нем фирмы для краткости мы будем называть *К-товары*, *К-сектор* и *К-фирмы*. Потребительские товары, сектор и фирмы соответственно будут называться *С-товары*, *С-сектор* и *С-фирмы*. В описании моделей математические обозначения источников максимально сохранены. Несмотря на существенные различия между моделями, в обзоре используется единая логика. Рассматриваются в первую очередь те рынки и агенты, которые имеют отношение к инвестиционному процессу.

«Микро-макро» модель MOSES

Шведская «микро-макро» модель MOSES (the Swedish micro-to-macro model) представляет собой имитационную модель, которая хотя и не называется агент-ориентированной, но по своей структуре таковой является [6–8]. Эта ранняя постановка предвосхитила агент-ориентированный подход к моделированию инвестиций. Модель предназначена для анализа промышленного роста, поэтому производственный сектор представлен в 11-отраслевой структуре «затраты-выпуск». При этом только четыре отрасли моделируются на микроуровне: переработка сырья, полуфабрикаты, производство инвестиционных товаров и производство потребительских товаров кратковременного пользования. Каждая отрасль состоит из ряда фирм, которые могут закупать товары на всех 11 рынках.

Производственные возможности фирмы описываются границей

$$QFR(L) = QTOP \cdot (1 - \exp(-\gamma L)),$$

задающей множество возможных сочетаний объема производства Q и затрат труда L . Фирмы точно не знают расположение границы, а действуют при выборе Q и L методом проб и ошибок, потому производственный потенциал фирм, как правило, задействован не полностью. Величина $QTOP$ определяет максимальный квартальный объем производства фирмы, достижимый при бесконечных затратах труда. Таким образом, в модели нет в явном виде показателя капитала, а есть некоторый показатель асимптотических производственных мощностей.

Каждый квартал $QTOP$ уменьшается на величину $\rho \cdot QTOP$, где ρ – фиксированная норма амортизации. Также каждый квартал производственные мощности $QTOP$ увеличиваются благодаря инвестициям на некоторую величину $QCHQTOP$. Прирост $QTOP$ зависит, во-первых, от задаваемого экзогенно коэффициента производительности вновь введенного капитала α^* ($INVEFF$), а во-вторых, от размера осуществленных инвестиций $QINV$. Те же два фактора приводят к изменению коэффициента γ . В целом в результате инвестиций производственная граница QFR сдвигается вверх и изгибается.

Инвестиционные расходы фирмы в данном квартале определяется эндогенно через механизм капитализации прибыли (profit-plow-back mechanism). Они складываются из чистого притока денежных средств фирмы и изменения в размере долга фирмы ΔBW за вычетом желаемого изменения в размере ликвидных активов. При этом из притока денежных средств вычитается сумма дивидендов, которая связана с корпоративными налогами экзогенно задаваемым постоянным

коэффициентом. Планируемые инвестиции осуществляются только в том случае, если текущий процент загрузки производственных мощностей выше некоторой пороговой величины, иначе они временно откладываются.

Планируемое изменение долга ΔBW зависит от внутренне-внешней процентной маржи. Оно пропорционально имеющемуся долгу BW с коэффициентом

$$\alpha_{BW} + \beta_{BW} \cdot \left(\frac{\Delta p^k}{p^k} + R^N - r_i \right),$$

где α_{BW} , β_{BW} – экзогенно устанавливаемые коэффициенты, $\Delta p^k / p^k$ – темп прироста цены капитального товара p^k , R^N – рентабельность по отношению к полной величине капитала, r_i – локальная ставка по банковским кредитам для фирмы, зависящая от рыночной ставки r . Эти планы корректируются в зависимости от предложения денег из остальной экономики.

Размер введенного в строй капитала в данном квартале $QINV$ зависит от инвестиционных расходов в предыдущие периоды и экзогенно заданного инвестиционного лага. Вновь вводимый капитал кроме собственной производительности характеризуется также производительностью труда $MTEC$. Экзогенные изменения в коэффициентах производительности для нового капитала моделируют производственные инновации.

Модель Eurace

Eurace – это крупномасштабная агент-ориентированная модель, разработка которой финансировалась Европейским Союзом по проектам EURACE программы FP6-IST и SYMPHONY программы FP7-ICT [9–12]. Основной центр разработки – Университет Генуи.

В модели действуют С-фирмы, производящие однородную продукцию, и единственная К-фирма, которая сама не потребляет капитал. К-фирмы производят, затрачивая только энергию и импортируемое из-за рубежа сырье. Выпуск равен спросу, и поэтому выбора производственного плана и запасов продукции нет. Поставки осуществляются мгновенно. Цены К-товаров p_t^K и цена С-товаров $p_{f,t}^C$ определяются через фиксированные наценки к удельным издержкам.

В С-секторе технологии фирм описываются производственными функциями Кобба – Дугласа. Если фирма f в момент времени t использует $N_{f,t}$ рабочей силы и обладает капиталом $K_{f,t}$, то ее выпуск равен

$$q_{f,t} = \gamma N_{f,t}^\alpha K_{f,t}^\beta,$$

где α – производительность труда, $\beta = 1 - \alpha$ – производительность капитала, γ – общая факторная производительность. Использование производственной функции, характеризующейся возможностью замещения труда и капитала, – это отличительная черта моделей Eurace. Рассматривается однородный по производительности капитал.

Для выбора объема производства сначала определяется желаемый уровень запасов $\hat{I}_{f,t}$ позволяющий удовлетворить ожидаемый спрос $q_{f,t}^{ce}$, оцениваемый по регрессии за несколько прошлых периодов. Плановый выпуск $\hat{q}_{f,t}^C$ вычисляется

на основе эвристического правила поддержания запасов. Это комбинация с коэффициентом $\lambda \in (0; 1)$ производственных потребностей для накопления желаемого уровня запасов $\bar{q}_{f,t}^c = \max[0, \hat{I}_{f,t} - I_{f,t}]$ и фактического выпуска прошлого периода:

$$\hat{q}_{f,t}^c = (1 - \lambda)\bar{q}_{f,t}^c + \lambda q_{f,t-1}^c.$$

При выбранном желаемом выпуске $\hat{q}_{f,t}^c$ нужно выбрать также соотношение между трудом и капиталом. Решается задача минимизации издержек по труду и капиталу при данной ставке заработной платы $w_{f,t}$ и издержках на единицу капитала $c_{f,t}^K = (\bar{r}_{f,t} + \xi^K)p_t^K$, где $\bar{r}_{f,t}$ – средняя цена капитала, ξ^K – норма выбытия капитала за месяц, p_t^K – цена капитального блага. Из производственной функции Кобба – Дугласа размер капитала, соответствующий желаемому выпуску $\hat{q}_{f,t}$, равен

$$\hat{K}_{f,t} = \left(\frac{(1 - \alpha)w_{f,t}}{\alpha c_{f,t}^K} \right)^\alpha \frac{\hat{q}_{f,t}^c}{\gamma}.$$

Планирование инвестиций в новые капитальные блага осуществляется С-фирмами в результате анализа потребности в расширении в рамках текущего производственного плана. Если текущий запас капитала в отсутствие инвестиций достаточен (больше $\hat{K}_{f,t}$), то С-фирма увеличивает использование имеющихся мощностей. Если же нет, то С-фирма покупает новые К-товары, чтобы довести размер капитала до желаемого.

Планируемые инвестиции $\Delta \hat{K}_{f,t}$ определяются путем максимизации величины

$$-p_t^K \Delta \hat{K}_{f,t} + \sum_m \frac{p_{t+m}^{ce} \Delta q_{f,t+m}}{(1 + \tau)(1 + \bar{r}_{f,t}/12)^m},$$

где τ – налог на добавленную стоимость в потреблении, $\bar{r}_{f,t}$ – среднегодовая стоимость капитала фирмы, $\Delta q_{f,t+m}$ – дополнительный объем производства за счет запланированных инвестиций. Указанная величина представляет собой текущую стоимость предполагаемых дополнительных доходов $p_{t+m}^{ce} \Delta q_{f,t+m}$, возникающих в будущем в месяце $t + m$ в результате инвестиций за вычетом расходов на инвестиции по цене капитальных товаров p_t^K . Инвестиции $\Delta \hat{K}_{f,t}$ ограничены сверху разницей $\hat{K}_{f,t} - K_{f,t}$.

В модели имеется асимметрия в способах определения спроса на капитал и рабочую силу. В то время как спрос на рабочую силу определяется ожиданиями спроса на продукцию, для спроса на инвестиции ожидания спроса на продукцию влияют только на верхнюю границу. Ниже данной границы происходит максимизация ожидаемых дисконтированных денежных потоков. Смысл в том, что, как предполагается, изменить количество труда можно достаточно быстро, а созданные запасы физического капитала нельзя уменьшить из-за их специфичности.

Модель Eurace@Unibi

Семейство моделей Eurace@Unibi [13–17] было создано как универсальный инструмент для макроэкономического анализа и экспериментов с экономической политикой. Основным центром разработки – Билефельдский университет в Германии. В модели действуют С-фирмы и К-фирмы. Интересной особенностью Eurace@Unibi является моделирование различных поколений К-товаров с разной производительностью.

Имеется одна монополия К-фирма, которая сама не потребляет капитал и не ограничена в объеме производства. Технический прогресс моделируется таким образом, что новые, лучшие поколения К-товаров добавляются с течением времени к существующим как результат экзогенного стохастического процесса. Выпуск К-товаров зависит от поступающих заказов, выбора производственного плана нет. Поставки осуществляются мгновенно.

Производство С-товаров представлено единственным сектором, причем возможна горизонтальная дифференциация товаров. Технология производства описывается леонтьевской производственной функцией, в которой используются К-товары разных поколений и труд, дифференцированный по навыкам; капиталовооруженность труда является фиксированной (здесь для простоты равна 1). Выпуск $Q_{i,t}$ фирмы i в период t зависит от запасов капитала $K_{i,t}^v$ разных поколений $v = 1, \dots, V$ и наличия труда $N_{i,t}^v$, обслуживающего капитал соответствующих поколений:

$$Q_{i,t} = \sum_{v=1}^V A_{i,t}^v \min\{K_{i,t}^v, N_{i,t}^v\},$$

где $A_{i,t}^v = \min\{A^v, B_{i,t}\}$ – производительность капитала поколения v A^v , ограниченная средним специфическим уровнем квалификации на фирме $B_{i,t}$. Желаемый уровень выпуска $\tilde{Q}_{i,t}$ определяется оценками потребительского спроса в разных регионах и планируемыми поставками для удовлетворения этого спроса и пополнения запасов товаров в магазинах.

Решение об объеме инвестиций принимается на основе сравнения потенциального $\hat{Q}_{i,t}$ и желаемого $\tilde{Q}_{i,t}$ объемов выпуска. Под потенциальным понимается такой выпуск, который фирма i может обеспечить в данный период t , используя на полную мощность все имеющиеся к периоду t запасы капитала $K_{i,t-1}^v$ разных поколений $v = 1, \dots, V$, унаследованные из прошлого в отсутствие инвестиций:

$$\hat{Q}_{i,t} = \sum_{v=1}^V A_{i,t}^v (1 - \delta) K_{i,t-1}^v.$$

Здесь учитываются амортизация за период с нормой δ и коэффициенты производительности капитала разных поколений $A_{i,t}^v$.

Если накопленного капитала достаточно, т. е. $\hat{Q}_{i,t} > \tilde{Q}_{i,t}$, то инвестиции не производятся. Если же $\hat{Q}_{i,t} < \tilde{Q}_{i,t}$, то капитал фирмы недостаточен, и она принимает решение о его расширении, т. е. об инвестициях. При этом фирма по муль-

тиномиальной модели логит случайно выбирает определенное поколение капитала v^* . Вероятность выбора поколения v задается формулой

$$\rho_i^v = \frac{\exp\left(\gamma^v \log \frac{\hat{A}_{i,t}^v}{P_i^v}\right)}{\sum_{k=1}^V \exp\left(\gamma^k \log \frac{\hat{A}_{i,t}^k}{P_i^k}\right)},$$

где $\gamma^v > 0$ – коэффициент; $\hat{A}_{i,t}^v$ – оцениваемая фирмой будущая производительность данного поколения капитала, в ходе которой фирма учитывает, что навыки рабочих со временем разовьются и что эволюция навыков зависит от того поколения капитала, с которым они работают; P_i^v – цена оборудования поколения v , которая устанавливается К-фирмой на основе средневзвешенных компонентов цены, основанных на расходном и стоимостном методах. Для определения стоимостного компонента цены К-фирма оценивает будущую производительность каждого поколения для некоей фирмы, использующей рабочую силу, обладающую навыками, соответствующими средним для экономики в целом.

В результате при $\hat{Q}_{i,t} < \tilde{Q}_{i,t}$ будут произведены инвестиции в поколение капитала v^* в объеме

$$I_{i,t}^{v*} = \frac{\tilde{Q}_{i,t} - \hat{Q}_{i,t}}{A_{i,t}^{v*}}.$$

Инвестиции меняют запас капитала данного поколения:

$$K_{v*}^{i,t} = (1 - \delta)K_{v*}^{i,t-1} + I_{i,t}^{v*}.$$

В целом описанное определение объема инвестиций в Eugene@Unibi можно охарактеризовать как «близорукое». Но существует версия модели, в которой объем инвестиций С-фирмы определяется не производственными планами, а путем прогнозирования будущих финансовых потоков при разных инвестиционных стратегиях [14].

В данной постановке рассматривается много различных вариантов инвестиционной стратегии $(\tilde{I}, \tilde{v})$, и для каждой рассчитывается прогнозный показатель чистой приведенной стоимости NPV на фиксированном горизонте T^{LT} . Показатель NPV складывается из трех составляющих. Это, во-первых, текущие затраты на инвестиции в момент t , во-вторых, суммарная ожидаемая прибыль будущих периодов, в-третьих, суммарная замена выбытия с нормой δ в предположении, что выбывший капитал будет заменяться в каждом будущем периоде равновеликим капиталом выбранного поколения $\tilde{v}$. Прогнозирование прибыли учитывает прогнозирование динамики характеристик фирмы (цены, производительность и т. д.) и характеристик рынка (цены конкурентов, размера рынка и т. д.). Ожидания фирмы основываются на прошлом опыте и носят адаптивный характер.

Финансирование инвестиций может происходить с помощью заемных средств, но есть ограничения, связанные с сохранением финансовой устойчивости. Если финансовых ресурсов не хватает на выбранное инвестиционное решение, то

в первую очередь корректируется это решение, а затем уже производственные планы.

Инвестиционное решение в модели [14] может быть отложено. Решение о такой задержке принимается по модели капитального бюджетирования с использованием метода реальных опционов.

Модель СС-МABM

Общая характеристика. Модель СС-МABM (сокращение от Macroeconomic Agent-Based Model with Capital and Credit) [18] следует идеологии Комплексных адаптивных тривиальных систем (Complex Adaptive Trivial Systems, CATS)¹. Основные конструктивные элементы модели используют наработки, содержащиеся в монографии [19] и ряде последующих статей Делли Гатти, Галлегати и их соавторов.

В экономике цепочка поставок идет только от К-фирм к С-фирмам. В производстве К-товаров потребляется единственный фактор – труд, характеризующийся неизменной производительностью α . Главное отличие от С-фирм состоит в том, что К-товары могут храниться в запасах и переноситься в будущие периоды. Если предложение К-товаров превышает спрос, то они вынужденно складываются, в противном случае фирма может удовлетворить избыточный спрос, используя запасы, накопленные в прошлом.

В производстве С-товаров используется леонтьевская технология производства с затратами труда ($N_{i,t}$) и капитала ($K_{i,t}$). При уровне загрузки производственных мощностей $\omega_{i,t} \in [0,1]$ фирмы i в период времени t ее выпуск равен

$$Y_{i,t} = \omega_{i,t} \min\{\alpha N_{i,t}, \kappa K_{i,t}\}.$$

Здесь α и κ – предельные производительности труда и капитала соответственно, которые предполагаются экзогенными, неизменными и едиными для всех фирм. В целом технический прогресс в данной модели не учитывается. Поскольку в модели труд всегда доступен в избытке, то выпуск С-фирм ограничен капиталом: $Y_{i,t} = \omega_{i,t} \kappa K_{i,t}$.

В каждом периоде С-фирма принимает решение об уровне использования мощности и об инвестициях. В модели есть однопериодный инвестиционный лаг – К-товары, купленные в текущий период, становятся доступными только в следующий период. Если в период t фирма i , имея запас капитала $K_{i,t}$, осуществит инвестиции $I_{i,t}$, то в период времени $t + 1$ запас капитала будет равен

$$K_{i,t+1} = K_{i,t}(1 - \delta\omega_{i,t}) + I_{i,t},$$

где δ – норма амортизации капитала, а $\omega_{i,t}$ – уровень использования производственной мощности в периоде t .

Краткосрочные колебания спроса преодолеваются путем загрузки имеющихся мощностей, тогда как долгосрочные потребности производства удовлетворяются за счет инвестиций. Решение об объеме инвестиций основано на наличном

¹ Подробнее о CATS см. [5].

запасе капитала, желаемом запасе капитала, потребностях возмещения выбытия и желаемом коэффициенте использования капитала $\bar{\omega}$. В свою очередь, желаемый запас капитала основан на адаптивной оценке среднего запаса капитала, который зависит от истории его загрузки в прошлом

Пусть в период t С-фирма планирует произвести в следующем периоде объем $Y_{i,t+1}^*$. Если $Y_{i,t+1}^* < \kappa K_{i,t+1}$, где κ – производительность, то запас капитала $K_{i,t+1}$ достаточен, и, выбрав неполный уровень загрузки $\omega_{i,t+1}^* = Y_{i,t+1}^* / \kappa K_{i,t+1} < 1$, фирма сможет обеспечить желаемый выпуск. В противном случае фирма полностью задействует мощности ($\omega_{i,t+1}^* = 1$), но не выйдет на запланированный уровень выпуска $Y_{i,t+1}^*$, а произведет лишь $\kappa K_{i,t+1}$.

Фактически использованные в среднем запасы капитала $\bar{K}_{i,t-1}$ рассчитываются по адаптивной формуле

$$\bar{K}_{i,t-1} = \nu \bar{K}_{i,t-2} + (1 - \nu) \omega_{i,t-1} K_{i,t-1},$$

где $\nu \in (0,1)$. Желаемый уровень капитала в период t для периода $t+1$ равен

$$\bar{K}_{i,t-1} / \bar{\omega},$$

где $\bar{\omega}$ – целевой уровень долгосрочного использования мощностей. Для замещения выбывающих мощностей в соответствии с нормой δ требуется $\delta \bar{K}_{i,t-1}$ К-товара. Отсюда можно найти объем инвестиций:

$$I_{i,t} = \left(\frac{1}{\bar{\omega}} + \delta \right) \bar{K}_{i,t-1} - K_{i,t}.$$

Модель предусматривает издержки приспособления к изменению запаса капитала. Предполагается, что каждая С-фирма в данный период может приобрести новые К-товары только с некоторой вероятностью $\gamma < 1$. С-фирма должна учитывать, что инвестиции осуществляются нечасто, поэтому в указанной формуле для инвестиций δ заменяется на δ/γ .

В русле описанного подхода находится и «эталонная модель» (a benchmark model), предложенная в [20]. Объем инвестиций С-фирм в данном периоде определяется желаемым темпом прироста производственных мощностей g_{ct}^D , который, в свою очередь, зависит от рентабельности в прошлый период $r_{c,t-1}$ и желаемого коэффициента использования мощностей u_{ct}^D :

$$g_{ct}^D = \gamma_1 \frac{r_{c,t-1} - \bar{r}}{\bar{r}} + \gamma_2 \frac{u_{ct}^D - \bar{u}}{\bar{u}}.$$

Здесь $\bar{r}$, $\bar{u}$ – фиксированные «нормальные» значения рентабельности и использования мощностей, γ_1 , γ_2 – фиксированные коэффициенты. Желаемый коэффициент использования мощностей u_{ct}^D зависит от запаса капитала и желаемого объема производства. Выбранные физические объемы инвестиций умножаются на цены выбранных производителей капитальных благ, и тем самым определяется общий объем инвестиций в денежном выражении.

Модели «Кейнс + Шумпетер»

Под названием «Кейнс + Шумпетер» (KS) известна группа динамических агент-ориентированных моделей, воспроизводящих эндогенный цикл деловой активности с кейнсианскими особенностями [21–24]. Центр разработки этих моделей – Высшая Школа св. Анны в г. Пиза, Италия. Название модели подчеркивает соединение кейнсианских теорий генерации спроса и шумпетерианских теорий экономического роста, основанного на технологиях.

В экономике представлены К-товары разных поколений с различающейся производительностью A_t^T . Отдельная фирма выпускает последнее поколение своей продукции, затрачивая только труд в соответствии с коэффициентом производительности B_t^T . Случайный технический прогресс в форме инноваций и имитации приводит к изменениям в производительности выпускаемого К-фирмой оборудования A_t^T и в ее собственной производительности B_t^T . На данный процесс влияет величина затрат на исследования и разработки (R&D), в которые инвестируется доля выручки от прошлых продаж К-фирм.

Взаимодействие производителей и потребителей К-товаров характеризуется неполнотой информации. К-фирма рассылает некоторому подмножеству С-фирм рекламные буклеты. С-фирмы на основе полученной информации сравнивают предлагаемые варианты оборудования, ориентируясь на цену, качество и срок окупаемости. Поставки приходят в следующем периоде.

В простом варианте алгоритма происходит выбытие капитала с нормой амортизации δ . Инвестиции в возмещение выбывающего капитала равны $I_{i,t}^{\text{repl}} = \delta K_{i,t}$.

В более сложном варианте валовые инвестиции каждой С-фирмы представляют собой сумму инвестиций в расширение и замену мощностей. Общий объем инвестиций основан на сравнении оценки потребностей в капитале $K_{j,t}^d$ с текущим запасом капитала $K_{j,t}$. Для этого С-фирма рассчитывает адаптивную оценку ожидаемого спроса $D_{j,t}^e$ и желаемый уровень запасов готовой продукции $N_{j,t}^d$. При данных фактических запасах готовой продукции $N_{j,t}$ это дает желаемый план выпуска $Q_{j,t}^d$ и тем самым желаемый размер капитала, который при единичной капиталоемкости и полной загрузке мощностей определяется как $K_{i,t}^d = Q_{i,t}^d$. В случае недостатка мощностей фирма инвестирует в расширение. Объем инвестиций в расширение равен $I_{i,t}^{\text{exp}} = K_{i,t}^d - K_{j,t}$.

Модели Jamel

Модели Jamel (Java Agent-based Macro-Economic Laboratory) представляют собой агент-ориентированные макроэкономические многоотраслевые модели с эндогенными деловыми циклами. Автор характеризует ее как «децентрализованную модель, населенную многочисленными гетерогенными автономными конкурирующими агентами, которые взаимодействуют одновременно на реальном и монетарном уровнях» [25–27].

В исходной постановке существует единственный сектор, производящий однородный С-товар, который можно при необходимости без издержек мгновенно

трансформировать в К-товар. Технология производства у всех фирм описывается целочисленной леонтьевской производственной функцией, в которой используются в качестве факторов капитал и труд: фирма владеет целым числом $k_{j,t}$ идентичных станков и на каждый станок требуется один работник. При наличии работника один станок производит pr^k единиц продукции. Станок действует d^p периодов, после чего выходит из строя. В пределах запасов капитала $k_{j,t}$ выпуск пропорционален числу рабочих, и любые изменения в производстве требуют их найма или увольнения. Произведенная продукция увеличивает запасы готовой продукции $in_{j,t}$. Желаемый уровень запасов продукции фирмы равен $in_{j,t}^T = d^m \cdot pr^k \cdot k_{j,t}$, где d^m – фиксированное число периодов (например, $d^m = 2$), а $pr^k \cdot k_{j,t}$ – объем производства при полной загрузке. Фирма использует запасы продукции для сглаживания выпуска в условиях колебаний спроса. Спрос на труд $n_{j,t}^T$ адаптивно случайно меняется по сравнению с уровнем прошлого периода.

Спрос на однородный продукт могут предъявлять как домохозяйства, так и другие фирмы (для целей инвестиций). В первую очередь удовлетворяются самые крупные заявки. Спрос фирмы находится в рамках выбранного инвестиционного бюджета. Объем инвестиций в капитал выводится из прошлых продаж на основе расчета NPV и целевой доли заемных средств.

Решение о покупке новых машин принимается с целью обновления изношенного капитала и с целью расширения производства. Инвестиции финансируются как за счет собственных доходов от продаж, так и за счет банковских ссуд. При выборе инвестиционного бюджета фирмы руководствуются целевой долей заемных средств в активах. Решение об инвестициях принимается, только если фактическая доля заемных средств оказывается ниже целевого уровня. В рамках выбранного инвестиционного бюджета при данной цене количество покупаемых станков выбирается максимизацией расчетной NPV. При вычислении соответствующих денежных потоков используются текущие цена на продукцию фирмы и ставка заработной платы. Границу сверху на число приобретаемых станков $m_{j,t}$ задает целевой уровень продаж $s_{j,t}^e$, который вычисляется умножением средних продаж за последние несколько периодов $\tilde{s}_{j,t}$ на фиксированный коэффициент расширения $\beta > 1$. В качестве ставки дисконтирования используется безрисковая процентная ставка, скорректированная на среднюю инфляцию за последние периоды.

В постановке модели Jamel, рассмотренной в [28], представлены три сектора: потребительских, промежуточных и инвестиционных товаров. Также в данной постановке моделируются экзогенные технологические шоки.

Модели Lagom

Модели Lagom [29–31] представляют собой макроэкономические мультиагентные модели, построенные с целью улучшения понимания достижения равновесия и определения взаимовыгодных видов климатической политики [32].

Товары и фирмы сгруппированы в сектора. Фирма производит товар соответствующего сектора. Производимая продукция потенциально может использо-

ваться в качестве С-товара, К-товара или I-товара, но могут быть сектора, специализирующиеся на производстве только С-товаров или только К-товаров.

Технология производства у всех фирм в отдельный период описывается леонтьевской производственной функцией с параметрами i, k, λ , где i – вектор удельных затрат I-товаров, k – вектор капиталоемкостей для разных видов капитала (основного и оборотного), λ – трудоемкость. (При мутации технологии становятся случайным образом доступны функции разных типов: леонтьевская, Кобба – Дугласа и функция CES с постоянной эластичностью замещения.) Выпуск равен желаемому выпуску, но ограничен имеющимися запасами I-товаров, капитала и имеющимися трудовыми ресурсами. Производственный процесс длится один период, в течение которого оборотный капитал полностью истрачивается, а основной капитал и запасы I-товаров уменьшаются в соответствии с фиксированными коэффициентами выбытия. Например, для основного капитала величина выбытия равна $\bar{\delta}_s k_s^u$, где k_s^u – капитал, использованный фирмой из сектора s в данный период в производстве, а $\bar{\delta}_s$ – норма выбытия в данном секторе.

Показатель желаемого объема производства меняется адаптивно в зависимости от размера капитала, уровня производственных запасов и ожидаемого спроса. Спрос на К-товары выводится из имеющихся запасов капитала, желаемого выпуска и коэффициентов капиталоемкости. Фирма инвестирует в соответствии с фиксированным нормативом, если уровень использования производственной мощности превысит пороговое значение.

Сначала фирмы суммируют запасы фирм-поставщиков. Отсюда они рассчитывают максимально возможный объем производства, распределяя доступный в каждом секторе объем поставок между оборотным и основным капиталом таким образом, чтобы обеспечить максимальный объем производства. Рассчитанное значение максимального выпуска фирма сравнивает с желаемым выпуском. Если первое превышает второе, то фирма принимает решение реализовать желаемый производственный план. Она подсчитывает необходимое количество оборотного капитала и, если выполняются условия для инвестирования, требуемое количество основного капитала.

Условия для инвестиций в основной капитал возникают, если основной капитал фирмы недостаточен для того, чтобы произвести желаемый объем выпуска, при условии возмещения выбытия основного капитала и с учетом целевого темпа расширения производства.

Моделирование инвестиций в АОМММ

Модель АОМММ (агент-ориентированная многорегиональная межотраслевая модель) разрабатывается в Новосибирском государственном университете и Институте экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск) под руководством В. И. Сулова [33–36]. Модель отличается от известных агент-ориентированных моделей несколькими важными особенностями. Во-первых, являясь пространственной моделью «затраты-выпуск», она представляет многоотраслевую и многорегиональную экономику в целом, а, например, не отдельный сегмент рынка. Во-вторых, в ней явным образом учиты-

ваются пространственное размещение агентов и транспортные издержки. В-третьих, она совместима с действующей нормативной моделью (межрегиональной моделью «затраты-выпуск» ОМММ; см. [37]) и основана на реальной информации.

В модели шесть отраслей: добыча, обработка, строительство, транспорт, услуги и производство общественного товара. Транспортные услуги производятся государственным предприятием и финансируются за счет централизованно устанавливаемых транспортных тарифов. Общественный товар тоже производится государственным предприятием. Есть два вида капитала: условно «Станки и оборудование» и «Здания и сооружения». Первый производится отраслью «Обработка», второй – отраслью «Строительство». Фирмы и домохозяйства распределены географически по карте России и относятся к одному из трех макро-регионов: Запад, Центр и Восток.

Производство фирмы по аналогии с моделью «затраты-выпуск» описывается леонтьевской 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:

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

Хотя производственные функции однопродуктовые, продукция может принимать вид С-товаров, I-товаров или К-товаров в зависимости от целей использования (подобно моделям Jamel и Lagom)

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 δ_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 $\text{PlInv}_{f,t-1}$, выбранном в период $t - 1$, фирма вычисляет плановые мощности $\hat{y}$, решая уравнение

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

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

На текущем этапе 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 $\text{ProfitInv}_{ft} > 0$, то фирма вычисляет планируемый объем инвестиций для следующего периода PlInv_{ft} , такой что $0 \leq \text{PlInv}_{ft} \leq \text{ProfitInv}_{ft}$. Оставшаяся сумма идет на выплату дивидендов собственникам. Если $\text{ProfitInv}_{ft} < 0$, т. е. фирма временно убыточна, то $\text{PlInv}_{ft} = 0$, 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 PlInv_{ft} в модели пока является открытым. Возможны два простых варианта: поддержание первоначального уровня производственных мощностей фирмы и использование фиксированной доли от ProfitInv_{ft} . Более сложный алгоритм принятия инвестици-

онных 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).

Заключение

Выполненный обзор основных достижений в области агент-ориентированного макроэкономического моделирования был сфокусирован на проблеме моделирования инвестиций.

Многие из рассмотренных моделей (за исключением модели KS), следуя за общей тенденцией в макроэкономическом моделировании, реализуют свойство *согласованности потоков и запасов* (stock-flow consistency). Это подразумевает закрытость модели в том смысле, что по каждой транзакции сумма реальных и финансовых потоков всех вовлеченных в нее агентов равна нулю, следовательно, нет скрытых притоков или оттоков. Данный принцип считается критически важным для корректности модели, чтобы при создании новой фирмы соответствующие инвестиции не появлялись ниоткуда, а были обеспечены соответствующими финансовыми ресурсами. Если отказаться от данного принципа, то можно столкнуться с неправдоподобной динамикой экономической системы, поскольку даже небольшие расхождения имеют тенденцию накапливаться в процессе работы модели [20, p. 379].

Число секторов варьирует от двух до множества, но преобладающей структурой остается разбиение экономики на два сектора, один из которых является сектором капитальных товаров, а другой – сектором потребительских товаров (К-сектор и С-сектор).

Технология производства в большинстве моделей требует капитал с однородной производительностью, который, как правило, соединяется с трудом в фиксированной пропорции и производит С-товар. В случае если модельеры рассматривают капитал разных поколений и вводят эндогенный способ выбора фирмами покупаемого поколения капитала, возникает возможность эндогенного объяснения экономического роста и технического прогресса, как в моделях KS и Eurace@Unibi.

Размер физических инвестиций С-фирм в большинстве моделей выводится просто из потребности расширения мощностей в соответствии с текущим производственным планом. Соответственно, соображения долгосрочного планирования – а капитал будет использоваться в течение продолжительного периода – не оказывают воздействия на инвестиционные решения, т. е. оказываются близорукими. Исключением является модель CC-MABM, в которой инвестиции определяются целевым уровнем капитала, который рассчитывается на базе исторических объемов потребности в капитале. Тем не менее, долгосрочное планирование здесь не присутствует. Кроме того, разработана версия Eurace@Unibi, в которой объем инвестиций С-фирмы определяется путем прогнозирования будущего с использованием метода реальных опционов [14].

В большинстве моделей потребность фирмы в труде и капитале определяется на основе решения о желаемом масштабе производства, который, в свою очередь, выводится из наблюдаемых исторических объемов спроса на продукт фирмы. Основным определяющим фактором размера инвестиций является спрос при

текущих ценах. При этом возможные изменения факторных цен не играют никакой роли при распределении ресурсов на инвестиции. Потенциальная доходность инвестиций не принимается во внимание при решениях об инвестициях. Модели Eurgace представляют собой исключение. В них факторные цены оказывают влияние на решения о цене и количестве выпуска либо о желаемом уровне фондовооруженности труда.

В рассмотренных моделях рынок инвестиционных товаров имеет более простую структуру по сравнению с рынком потребительских товаров. Как правило, действует предпосылка о том, что К-фирмы не выбирают самостоятельно желаемый объем выпуска К-товаров, а выполняют полученные заказы. При этом сам К-сектор в большинстве моделей не использует основной капитал (за исключением моделей Jamel и Lagom). Также типичным для большинства моделей является отсутствие конкуренции между К-фирмами (за исключением моделей CC-MABM и KS). В процессе ценообразования модельеры используют различные правила: фиксированные наценки; цены на основе ожидаемой ценности К-товара для С-фирм; цены на основе ожидаемого спроса и уровня запасов. В моделях Eurgace@Unibi и KS предусмотрено эндогенное возникновение разных поколений капитала. В первой модели новые поколения капитала возникают в результате случайного процесса, а во второй явным образом моделируются инновации в К-секторе, причем вероятность осуществить инновации зависит от уровня затрат фирмы на исследования и разработки.

Таким образом, в течение последнего десятилетия произошел значительный прогресс в агент-ориентированном макроэкономическом моделировании. Появились всеми признаваемые алгоритмы моделирования ожиданий, взаимодействия агентов, процесса технических изменений в производстве, ценообразования, краткосрочного планирования производства. Вместе с тем адекватное представление инвестиционных процессов в многоотраслевой экономике в рамках агент-ориентированных моделей пока представляет собой нерешенную проблему, поскольку неизбежно требует учета долгосрочного воздействия инвестиций в основной капитал на техническое состояние производства, потенциальный рост и взаимодействия агентов в процессе стратегического планирования.

Рассмотренные модели воспроизводят такие макроэкономические явления, как эндогенный экономический рост, деловые циклы, проциклический характер динамики инвестиций, большую волатильность инвестиций по сравнению с выпуском и потреблением.

Выполненный обзор позволяет оценить позиции разрабатываемой АОМММ в области моделирования инвестиций относительно уже реализованных моделей. В нашей модели принцип согласованности потоков и запасов в явном виде не проводится, но архитектура модели предусматривает горизонтальную согласованность денежных потоков между агентами. Кроме того, для анализа результатов работы модели разработаны балансовые таблицы, следующие структуре таблиц «затраты-выпуск» [36].

В отличие от рассмотренных моделей, АОМММ нацелена на отражение межотраслевых и межрегиональных потоков. В ней реализована 6-отраслевая и 3-региональная структура, допускающая дальнейшую детализацию. Рынок К-товаров представлен двумя видами товаров, которые поставляются во все сектора,

и для производства самих К-товаров используется продукция всех остальных секторов, причем в экономических связях задействованы все регионы. Используемая в АОМММ леонтьевская производственная функция хорошо соответствует такой структуре модели, ведь, как показал данный обзор, для моделирования даже коротких производственных цепочек наиболее приспособлена именно она.

Модель воспроизводит следующие макроэкономические явления:

- влияние транспортных издержек на структуру товарных потоков между макрорегионами [37];
- изменение благосостояния населения в ответ на изменение ставок налогов [38];
- изменение благосостояния населения и показателей экономического неравенства в ответ на изменения структуры социальных пособий [39].

Моделируемая экономика может как расти, так и сокращаться в результате независимых инвестиционных решений отдельных фирм и домохозяйств. Принципиально важным моментом является то, что эти же решения обуславливают и изменения в отраслевой и пространственной структуре экономики.

Дальнейшее развитие АОМММ предусматривает моделирование сбережений домохозяйств, моделирование внутрифирменных финансов, денежный рынок со ставкой процента, моделирование инноваций и технического прогресса.

Список литературы

1. **Abiad A., Furceri D., Topalova P.** The Macroeconomic Effects of Public Investment: Evidence from Advanced Economies. *IMF Working Paper* WP/15/95, 2015, 26 p.
2. **Nunez-Serrano A., Velazquez F. J.** Is Public Capital Productive? Evidence from a Meta-analysis. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2017, vol. 39, no. 2, p. 313–345.
3. **Ballot G., Mandel A., Vignes A.** Agent-based Modeling and Economic Theory: Where Do We Stand? *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 199–220.
4. **Макаров В. Л., Бахтизин А. Р.** Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013. 295 с.
5. **Dawid H., Delli Gatti D.** Agent-Based Macroeconomics. In: Hommes C., LeBaron B. (eds.). *Handbook of Computational Economics*. Amsterdam, North Holland, 2018.
6. **Albrecht J. et al.** MOSES Code. Stockholm, IUI, 1989, 354 p.
7. **Eliasson G.** Modeling the Experimentally Organized Economy: Complex Dynamics in an Empirical Micro-Macro Model of Endogenous Economic Growth. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1991, vol. 16, no. 1–2, p. 153–182.
8. **Eliasson G.** Visible Costs, Invisible Benefits. Springer, 2017, 461 p.
9. **Cincotti S., Raberto M., Teglio A.** The EURACE Macroeconomic Model and Simulator. In: Aoki M., Binmore K., Deakin S., Gintis H. (eds.). *Complexity and*

- Institutions: Markets, Norms and Corporations. New York, Palgrave Macmillan, 2012, p. 81–106.
10. **Ponta L., Raberto M., Cincotti S.** An Agent-Based Stock-Flow Consistent Model of the Sustainable Transition in the Energy Sector. *Ecological Economics*, 2018, vol. 145, p. 274–300.
 11. **Raberto M., Ozel B., Ponta L., Teglio A., Cincotti S.** From Financial Instability to Green Finance: The Role of Banking and Monetary Policies in the EURACE Model. *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, vol. 29, no. 1, p. 429–465.
 12. **Teglio A., Mazzocchetti A., Ponta L., Raberto M., Cincotti S.** Budgetary Rigour with Stimulus in Lean Times: Policy Advices from an Agent-Based Model. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2019, vol. 157, p. 59–83.
 13. **Dawid H., Harting P., Neugart M.** Economic Convergence: Policy Implications from a Heterogeneous Agent Model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2014, vol. 44, p. 54–80.
 14. **Harting P.** Macroeconomic Stabilization and Long-Term Growth: The Role of Policy Design. *Macroeconomic Dynamics*, 2019, p. 1–46.
 15. **Dawid H. et al.** Agent-Based Macroeconomic Modeling and Policy Analysis: The Eurace@Unibi Model. In: Chen S., Kaboudan M., Du Y. (eds.). *The Oxford Handbook on Computational Economics and Finance*. Oxford University Press, 2018, ch. 17, p. 490–519.
 16. **Dawid H., Harting P., Neugart M.** Fiscal Transfers and Regional Economic Growth. *Review of International Economics*, 2018, vol. 26, p. 651–671.
 17. **Dawid H., Harting P., Hoog S. van der, Neugart M.** Macroeconomics with Heterogeneous Agent Models: Fostering Transparency, Reproducibility and Replication. *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, vol. 29, p. 467–538.
 18. **Assenza T., Delli Gatti D., Grazzini J.** Emergent Dynamics of a Macroeconomic Agent Based Model with Capital and Credit. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2015, vol. 50, p. 5–28.
 19. **Delli Gatti D., Gallegati M., Cirillo P., Desiderio S., Gaeo, E.** *Macroeconomics from the Bottom-up*. Berlin, Springer-Verlag, 2011, 124 p.
 20. **Caiani A., Godin A., Caverzasi E., Gallegati M., Kinsella S., Stiglitz J. E.** Agent Based-Stock Flow Consistent Macroeconomics: Towards a Benchmark Model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2016, vol. 69, p. 375–408.
 21. **Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** An Evolutionary Model of Endogenous Business Cycles. *Computational Economics*, 2006, vol. 27, no. 1, p. 3–34.
 22. **Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** The Microfoundations of Business Cycles: an Evolutionary, Multi-Agent Model. *Journal of Evolutionary Economics*, 2008, vol. 18, no. 3–4, p. 413–432.
 23. **Napoletano M., Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** Wage Formation, Investment Behavior and Growth Regimes: An Agent-Based Analysis. *Revue de l'OFCE*, 2012, vol. 124, p. 235–261.
 24. **Dosi G. et al.** Fiscal and Monetary Policies in Complex Evolving Economies. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2015, vol. 52, p. 166–189.
 25. **Seppacher P.** Flexibility Of Wages And Macroeconomic Instability In An Agent-Based Computational Model With Endogenous Money. *Macroeconomic Dynamics*, 2012, vol. 16, no. S2, p. 284–297.

26. **Salle I., Seppecher P.** Stabilizing an Unstable Complex Economy on the Limitations of Simple Rules. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2018, vol. 91, p. 289–317.
27. **Seppecher P., Salle I., Lang D.** Is the Market Really a Good Teacher? *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, vol. 29, p. 299–335.
28. **Seppecher P., Salle I., Lavoie, M.** What Drives Markups? Evolutionary Pricing in an Agent-Based Stock-Flow Consistent Macroeconomic Model. *Industrial and Corporate Change*, 2018, vol. 27, no. 6, p. 1045–1067.
29. **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.
30. **Mandel A.** Agent-Based Dynamics in the General Equilibrium Model. *Complexity Economics*, 2012, vol. 1, p. 105–121.
31. **Wolf S. et al.** A Multi-Agent Model of Several Economic Regions. *Environmental Modelling & Software*, 2013, vol. 44, p. 25–43.
32. **Balint T. et al.** Complexity and the Economics of Climate Change: a Survey and a Look Forward. *Ecological Economics*, 2017, vol. 138, p. 252–265.
33. **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.
34. **Суслов В. И., Доможиров Д. А., Костин В. С., Мельникова Л. В., Ибрагимов Н. М., Цыплаков А. А.** Опыт агент-ориентированного моделирования пространственных процессов в большой экономике // Регион: экономика и социология. 2014. Т. 84, № 4. С. 32–54.
35. **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.
36. **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.
37. **Гамидов Т. Г., Доможиров Д. А., Ибрагимов Н. М.** Равновесные состояния открытой межрегиональной системы, порожденной оптимизационной межрегиональной межотраслевой моделью // Вестник НГУ. Серия: Социально-экономические науки. 2013. Т. 13, № 3. С. 81–94.
38. **Суслов В. И., Новикова Т. С., Цыплаков А. А.** Моделирование роли государства в пространственной агент-ориентированной модели // Экономика региона. 2016. Т. 12, вып. 3. С. 951–965.
39. **Новикова Т. С., Цыплаков А. А.** Социальная политика в многоотраслевой агент-ориентированной модели // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. Т. 13, № 3. С. 129–142.

References

1. **Abiad A., Furceri D., Topalova P.** The Macroeconomic Effects of Public Investment: Evidence from Advanced Economies. *IMF Working Paper* WP/15/95, 2015, 26 p.
2. **Nunez-Serrano A., Velazquez F. J.** Is Public Capital Productive? Evidence from a Meta-analysis. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 2017, vol. 39, no. 2, p. 313–345.
3. **Ballot G., Mandel A., Vignes A.** Agent-based Modeling and Economic Theory: Where Do We Stand? *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 2015, vol. 10, no. 2, p. 199–220.
4. **Makarov V. L., Bakhtizin A. R.** Social Modelling – A New Computer Breakthrough (Agent-Based Models). Moscow, Ekonomika, 2013, 295 p. (in Russ.)
5. **Dawid H., Delli Gatti D.** Agent-Based Macroeconomics. In: Hommes C., LeBaron B. (eds.). *Handbook of Computational Economics*. Amsterdam, North Holland, 2018.
6. **Albrecht J. et al.** MOSES Code. Stockholm, IUI, 1989, 354 p.
7. **Eliasson G.** Modeling the Experimentally Organized Economy: Complex Dynamics in an Empirical Micro-Macro Model of Endogenous Economic Growth. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 1991, vol. 16, no. 1–2, p. 153–182.
8. **Eliasson G.** Visible Costs, Invisible Benefits. Springer, 2017, 461 p.
9. **Cincotti S., Raberto M., Teglio A.** The EURACE Macroeconomic Model and Simulator. In: Aoki M., Binmore K., Deakin S., Gintis H. (eds.). *Complexity and Institutions: Markets, Norms and Corporations*. New York, Palgrave Macmillan, 2012, p. 81–106.
10. **Ponta L., Raberto M., Cincotti S.** An Agent-Based Stock-Flow Consistent Model of the Sustainable Transition in the Energy Sector. *Ecological Economics*, 2018, vol. 145, p. 274–300.
11. **Raberto M., Ozel B., Ponta L., Teglio A., Cincotti S.** From Financial Instability to Green Finance: The Role of Banking and Monetary Policies in the EURACE Model. *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, vol. 29, no. 1, p. 429–465.
12. **Teglio A., Mazzocchi A., Ponta L., Raberto M., Cincotti S.** Budgetary Rigour with Stimulus in Lean Times: Policy Advices from an Agent-Based Model. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 2019, vol. 157, p. 59–83.
13. **Dawid H., Harting P., Neugart M.** Economic Convergence: Policy Implications from a Heterogeneous Agent Model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2014, vol. 44, p. 54–80.
14. **Harting P.** Macroeconomic Stabilization and Long-Term Growth: The Role of Policy Design. *Macroeconomic Dynamics*, 2019, p. 1–46.
15. **Dawid H. et al.** Agent-Based Macroeconomic Modeling and Policy Analysis: The Eurace@Unibi Model. In: Chen S., Kaboudan M., Du Y. (eds.). *The Oxford Handbook on Computational Economics and Finance*. Oxford University Press, 2018, ch. 17, p. 490–519.
16. **Dawid H., Harting P., Neugart M.** Fiscal Transfers and Regional Economic Growth. *Review of International Economics*, 2018, vol. 26, p. 651–671.

17. **Dawid H., Harting P., Hoog S. van der, Neugart M.** Macroeconomics with Heterogeneous Agent Models: Fostering Transparency, Reproducibility and Replication. *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, vol. 29, p. 467–538.
18. **Assenza T., Delli Gatti D., Grazzini J.** Emergent Dynamics of a Macroeconomic Agent Based Model with Capital and Credit. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2015, vol. 50, p. 5–28.
19. **Delli Gatti D., Gallegati M., Cirillo P., Desiderio S., Gaeo, E.** Macroeconomics from the Bottom-up. Berlin, Springer-Verlag, 2011, 124 p.
20. **Caiani A., Godin A., Caverzasi E., Gallegati M., Kinsella S., Stiglitz J. E.** Agent Based-Stock Flow Consistent Macroeconomics: Towards a Benchmark Model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2016, vol. 69, p. 375–408.
21. **Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** An Evolutionary Model of Endogenous Business Cycles. *Computational Economics*, 2006, vol. 27, no. 1, p. 3–34.
22. **Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** The Microfoundations of Business Cycles: an Evolutionary, Multi-Agent Model. *Journal of Evolutionary Economics*, 2008, vol. 18, no. 3–4, p. 413–432.
23. **Napoletano M., Dosi G., Fagiolo G., Roventini A.** Wage Formation, Investment Behavior and Growth Regimes: An Agent-Based Analysis. *Revue de l'OFCE*, 2012, vol. 124, p. 235–261.
24. **Dosi G. et al.** Fiscal and Monetary Policies in Complex Evolving Economies. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2015, vol. 52, p. 166–189.
25. **Seppacher P.** Flexibility Of Wages And Macroeconomic Instability In An Agent-Based Computational Model With Endogenous Money. *Macroeconomic Dynamics*, 2012, vol. 16, no. S2, p. 284–297.
26. **Salle I., Seppacher P.** Stabilizing an Unstable Complex Economy on the Limitations of Simple Rules. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2018, vol. 91, p. 289–317.
27. **Seppacher P., Salle I., Lang D.** Is the Market Really a Good Teacher? *Journal of Evolutionary Economics*, 2019, vol. 29, p. 299–335.
28. **Seppacher P., Salle I., Lavoie, M.** What Drives Markups? Evolutionary Pricing in an Agent-Based Stock-Flow Consistent Macroeconomic Model. *Industrial and Corporate Change*, 2018, vol. 27, no. 6, p. 1045–1067.
29. **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.
30. **Mandel A.** Agent-Based Dynamics in the General Equilibrium Model. *Complexity Economics*, 2012, vol. 1, p. 105–121.
31. **Wolf S. et al.** A Multi-Agent Model of Several Economic Regions. *Environmental Modelling & Software*, 2013, vol. 44, p. 25–43.
32. **Balint T. et al.** Complexity and the Economics of Climate Change: a Survey and a Look Forward. *Ecological Economics*, 2017, vol. 138, p. 252–265.
33. **Suslov V. I., Domozhirev 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, p. 112–131. (in Russ.)

34. **Suslov V. I., Domozhirov D. A., Ibragimov N. M., Kostin V. S., Melnikova L. V., Tsyplakov A. A.** Agent-Based Modeling of Spatial Processes in world Economy. *Region: Economics and Sociology*, 2014, no. 4, p. 32–54. (in Russ.)
35. **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, p. 86–99. (in Russ.)
36. **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, p. 15–25. (in Russ.)
37. **Gamidov T. G., Domozhirov D. A., Ibragimov N. M.** Equilibrium States of Open Interregional System based on interregional intersectoral optimization model. *Vestnik NSU. Series: Social and Economic Sciences*, 2013. vol. 13, no. 3, p. 81–94. (in Russ.)
38. **Suslov V. I., Novikova T. S., Tsyplakov A. A.** Simulation of the Role of Government in Spatial Agent-Based Model. *Ekonomika regiona = Economy of Region*, 2016, vol. 12, iss. 3, p. 951–965. (in Russ.)
39. **Novikova T. S., Tsyplakov A. A.** Social Policy in a Multi-Regional Agent-Based Model. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 2020, vol. 13, no. 3, p. 129–142. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию 03.12.2020

Принят к печати 12.01.2020

The article was submitted 03.12.2020

Accepted for publication 12.01.2020

Сведения об авторах

Цыплаков Александр Анатольевич, кандидат экономических наук, доцент, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия); старший научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия)

alexander.tsyplakov@gmail.com

ORCID 0000-0002-9297-3269

SPIN РИНЦ 77431

Scopus Author ID 57192156252

Мельникова Лариса Викторовна, кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН (Новосибирск, Россия); доцент, Новосибирский государственный университет (Новосибирск, Россия)

melnikova@ieie.nsc.ru

ORCID 0000-0001-7427-7289

SPIN РИНЦ 6832-7464,
Scopus Author ID 56501765400
WoS Researcher ID I-7883-2015

Information about the Authors

Alexander A. Tsyplakov, Candidate of Sciences (Economics), Associated Professor, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation); Senior Researcher, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation)

alexander.tsyplakov@gmail.com
ORCID 0000-0002-9297-3269
SPIN РИНЦ 77431
Scopus Author ID 57192156252

Larisa V. Melnikova, Candidate of Sciences (Economics), Leading Researcher, Institute of Economics and Industrial Engineering SB RAS (Novosibirsk, Russian Federation); Associated Professor, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation)

melnikova@ieie.nsc.ru
ORCID 0000-0001-7427-7289
SPIN РИНЦ 6832-7464,
Scopus Author ID 56501765400
WoS Researcher ID I-7883-2015