

На правах рукописи

ЦЫПЛАКОВ Александр Анатольевич

**АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГООТРАСЛЕВОЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭКОНОМИКИ**

Специальность: 5.2.2.

Математические, статистические и инструментальные
методы в экономике

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой
степени доктора экономических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук (ИЭОПП СО РАН)

Научный консультант: **Суслов Виктор Иванович**, член-корр. РАН, доктор экономических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Зоркальцев Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий Лабораторией математического моделирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Байкальского государственного университета

Зулькарнай Ильдар Узбекович, доктор экономических наук, заведующий Лабораторией современных проблем региональной экономики Института социально-экономических исследований Уфимского федерального исследовательского центра РАН

Маракулин Валерий Михайлович, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории методов оптимизации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центральный экономико-математический институт РАН

Защита состоится 14 марта 2025 г. в __:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.154.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук (ИЭОПП СО РАН), по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 17, конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ИЭОПП СО РАН и на официальном сайте по адресу: <https://diss.ieie.su/zashhity/zashhita-dissertacii-cyplakova-aleksandra-anatolevicha.html>

Автореферат разослан « » 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.154.01,
доктор экономических наук

А.Т. Юсупова

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Территориальная, отраслевая, социальная структура российской экономики достаточно сложна и непрерывно меняется. Комплексный характер носят взаимосвязи между частями экономики, причем структура экономических взаимосвязей имеет нетривиальное пространственное измерение. Сложность структуры и пространственная составляющая проявляются в потоках ресурсов между частями экономики. При этом происходящие в ней процессы являются в существенной степени децентрализованными. Не существует какого-то единого органа, который бы определял направления и интенсивность взаимодействий между частями экономики, определял бы уровни цен на товары, объемы производства или потребления отдельных экономических агентов. Это ограничивает применимость для целей анализа моделей, в основе которых лежат задачи оптимизации пропорций экономики. Среди наблюдаемых явлений, которые сложно воспроизвести в рамках таких моделей, можно назвать, например, внутриотраслевую торговлю, когда близкие товары перевозят навстречу друг другу.

Децентрализованное поведение агентов может рассматриваться в неоклассической равновесной парадигме, например, с помощью вычислимых моделей общего равновесия. Потенциально модели общего равновесия способны отразить взаимосвязи между частями экономики, если они действуют через рыночную торговлю и ценовой механизм. Особый интерес с этой точки зрения представляют модели, которые учитывают продуктовую дифференциацию и несовершенную конкуренцию. Однако равновесные модели имеют ряд общих недостатков: они предполагают оптимизирующее поведение агентов и полную информированность; они не могут отразить неравновесную динамику и в целом любую достаточно сложную динамику. В частности, использование равновесного моделирования могут затруднять проблемы несуществования и неединственности равновесия. Кроме того, в рамках равновесной концепции цены используются для балансирования спроса и предложения, но само наличие единых цен на каждом рынке, уравнивающих всю экономику, неизвестно как формирующихся – это очень спорная конструкция. Наконец, во многих популярных равновесных моделях для упрощения анализа вводятся так называемые репрезентативные агенты.

В целом, экономика – это сложная система, состоящая из множества различных взаимосвязанных частей. Решения в экономике принимаются разными лицами, причем у каждого принимающего решения лица могут быть свои особые цели, поведенческие схемы, частная информация и т. д. В то же время, многие прикладные и теоретические модели сильно огрубляют эту сложную картину, рассматривая агрегированные показатели или репрезентативных агентов. При этом экономические явления, для которых принципиально важным

является разнородность отдельных экономических агентов и частей экономики (например, групп населения или отдельных территорий), остаются за рамками анализа. В условиях российской экономики неоднородность экономической деятельности является важным аспектом. Для моделирования экономики России и экономик других стран с обширной территорией особенно важен учет пространственной неоднородности. Кроме того, для анализа социальной политики и в целом влияния государственной политики на благосостояние населения важную роль играет дифференциация домохозяйств по доходам и другим характеристикам.

Все это говорит о том, что для адекватного представления состояния, структуры и развития экономики России требуется соответствующий модельный инструментарий. В качестве альтернативы подходам, опирающимся на агрегирование, общесистемные оптимизационные задачи или концепцию равновесия, предлагается использовать для целей моделирования имитационный подход, основанный на рассмотрении поведения многих автономных экономических агентов – так называемые **агент-ориентированные модели (АОМ)** [Bonabeau, 2002; Tesfatsion, 2006; Макаров, Бахтизин, 2013; Turrell, 2016; Axtell, Farmer, 2022]. В рамках агентного подхода возможно создание вычислимой модели национальной экономики, которая бы отражала ключевые стороны экономической деятельности: производство, потребление, товарные потоки, использование трудовых ресурсов, внешнюю торговлю и т. д. при явном учете пространственного фактора. Отличительным свойством АОМ является то, что эволюция системы представляется как результат индивидуальных действий множества входящих в нее агентов. Здесь открывается перспектива для анализа сложных структурных процессов, происходящих в экономике. Агент-ориентированный подход может связать микроуровень и с мезо- и макроуровнем, а также улучшить наше понимание фундаментальных экономических отношений.

Степень разработанности проблемы. Перспективность агент-ориентированного подхода отмечена рядом известных экономистов-теоретиков. Это, в частности, Кеннет Эрроу (нобелевский лауреат, один из создателей классической теории общего равновесия) (см. его отзыв на обложке [Epstein, 2006]), Алан Кирман (напр. [Gallegati, Kirman, 2012]), Дункан Фоули [Farmer, Foley, 2009], Аксель Лейонхуфвуд [Leijonhufvud, 2006]. В составе исследовательских групп прикладным агент-ориентированным моделированием занимались такие крупные специалисты по государственной экономической политике, как Гэрет Майлз [Hashimzade et al., 2015] и Джозеф Стиглиц [Caiani et al., 2016]. Роль частных цен в процессе сходимости к общему равновесию изучал с помощью агент-ориентированного подхода известный исследователь в области пове-

денческой экономики Герберт Гинтис [Gintis, 2007]. В изучении ряда макроэкономических вопросов с помощью АОМ принимал участие макроэкономист Питер Ховитт [Ashraf, Gershman, Howitt, 2016]. Среди российских экономистов, развивающих агент-ориентированный подход, следует отметить В. Л. Макарова и А. Р. Бахтизина [Макаров, Бахтизин, 2013]. Одну из ранних агент-ориентированных моделей разработал нобелевский лауреат в области экономики Томас Шеллинг [Schelling, 1971]. Близкое по духу агентному моделированию микроимитационное моделирование разработал и многие годы им занимался Гай Оркатт [Orcutt, 1957; Orcutt, Caldwell, Wertheimer, 1976]. Известный исследователь экономического неравенства Энтони Аткинсон участвовал в разработке микроимитационных моделей налогов и пособий [Atkinson et al., 2017]. В целом можно говорить о том, что, хотя АОМ пока не стали частью экономического «мэйнстрима», но они имеют весомую поддержку среди авторитетных ученых.

В настоящее время агент-ориентированные модели широко используются в самых разных областях: дорожное движение [Nguyen et al., 2021], финансовые рынки [Iori, Porter, 2018], рынки электроэнергии [Weidlich, Veit, 2008], макроэкономика [Dawid, Delli Gatti, 2018] и т. д.

Наиболее близки к теме настоящего исследования такие агент-ориентированные модели, которые представляют экономику отдельной страны или группы стран в целом, а не какую-то отдельную часть или отдельное явление. Здесь, безусловно, следует отметить гибридную АОМ ЦЭМИ РАН [Бахтизин, 2008; Макаров, Бахтизин, 2013], которая представляет экономику России. Большой прогресс в последние годы достигнут в развитии так называемых макроэкономических АОМ. В этих моделях подчеркиваются те аспекты, которые традиционно изучаются в макроэкономике, таких как денежная политика центрального банка, инфляция, экономические циклы, экономический рост и т. п. Здесь можно назвать такие семейства моделей как Eurace [Deissenberg, Hoog, Dawid, 2008], Eurace@Unibi [Dawid et al., 2012], модели K+S [Dosi et al., 2010], Jamel [Salle, Seppacher, 2018], Lagom [Mandel et al., 2009]. В целом можно резюмировать, что в рамках этого направления появились стандартизированные подходы к моделированию таких аспектов как ценообразование, краткосрочное планирование производства, формирование ожиданий, взаимодействие агентов, технические изменения в производстве. Вместе с тем, адекватное представление структурных изменений в многоотраслевой пространственной экономике в рамках агент-ориентированных моделей пока представляет собой нерешенную задачу.

Направленность настоящего исследования на агентное моделирование пространственных явлений обусловило использование имеющихся наработок в этой области. Пространственные АОМ широко распространены и относятся к

самым разным областям: эпидемиология [Hunter, Mac Namee, Kelleher, 2018], демография [Benenson, Omer, Hatna, 2002], экология [Mathevet et al., 2003], транспорт [Aziz et al., 2018], землепользование [Filatova, 2015], геомаркетинг [Balać, Ciari, 2014] и т. д. При этом несмотря на преимущества агент-ориентированного подхода в моделировании пространства, существует не так много экономических АОМ в многорегиональной или многострановой постановке. В частности, это многорегиональные АОМ Eurace@Unibi [Dawid et al., 2019], LAGOM Regio [Wolf et al., 2013], многострановые Eurace Open [Petrović et al., 2017], AB-SFC [Caiani, Catullo, Gallegati, 2018] и K+S [Dosi, Roventini, Russo, 2019]. Эти макроэкономические АОМ схожи в том, что регионы или страны в них в пространственном отношении представляют собой точки и не детализируются. Более явно пространство задается в модели PolicySpace [Furtado, 2018], относящейся не к стране в целом, а к отдельной области страны (Бразилии).

С точки зрения моделирования государства и государственной экономической политики наибольший вклад внесли уже упоминавшиеся макроэкономические АОМ, а также микроимитационные модели, такие как EUROMOD [Immervoll, O'Donoghue, 2009]. Макроэкономические АОМ в основном ограничиваются вопросами макроэкономической политики, в особенности денежно-кредитной, а область социальных вопросов, решаемых государством, часто сводится просто к выплате пособий по безработице. Различные аспекты экономической роли государства рассмотрены в нескольких моделях ЦЭМИ РАН, см. напр., [Бахтизин, 2008].

Цель и задачи диссертационного исследования. Данное исследование ставило целью развитие методологии и инструментария моделирования, необходимых для создания многоотраслевой пространственной агент-ориентированной модели экономики России, и разработку такой модели.

Для достижения указанной цели решались следующие конкретные **задачи**:

1. Осуществить сравнительный анализ агент-ориентированного моделирования, сопоставив его с альтернативными методами моделирования. Дать обоснование использования АОМ для моделирования экономических явлений и систем.
2. Осуществить критический анализ методологических основ агентного моделирования. Выделить основные понятия и этапы агент-ориентированного моделирования.
3. Дать критический обзор существующих агент-ориентированных моделей, прежде всего в области моделирования экономики в целом, пространственного моделирования и моделирования государства.

4. Обобщить и развить средства инструментальной и программной поддержки агент-ориентированного моделирования, включая обеспечение ресурсной согласованности экономических АОМ, совершенствование таблиц потоков и запасов для анализа результатов моделирования, построение алгоритмов обучения агентов, построение механизмов торговли и разработку программной архитектуры АОМ.

5. Разработать структуру АОМ экономики России и алгоритмы поведения агентов для нее.

6. Провести тестирование отдельных компонентов и модели в целом.

7. Разработать блок государства для АОМ экономики России. Провести исследование возможностей модели для целей анализа государственной экономической политики в области налогообложения и социальной политики.

8. Разработать блок внутрифирменных инвестиций для АОМ экономики России. Провести исследование возможностей модели для моделирования экономической динамики.

Подход к моделированию, методология и методы исследования.

В основе диссертационного исследования лежит агент-ориентированный подход к моделированию [Макаров, Бахтизин, 2013; Axtell, Farmer, 2022]. Экономическая система представляется в виде агент-ориентированной модели, то есть имитационной модели, состоящей из некоторого количества виртуальных автономных агентов, действующих в содержащей их среде. Методом исследования экономической системы является проведение компьютерных экспериментов с агент-ориентированной моделью. Изменяя параметры, меняя сценарии экспериментов, можно делать прогнозы о поведении изучаемой системы в разных условиях [Шеннон, 1978; Fontana, 2006].

Основной результат, представленный в диссертации, – это агент-ориентированная многорегиональная межотраслевая модель «затраты—выпуск» (АОМММ), разрабатываемая автором в сотрудничестве с другими исследователями из ИЭОПП и НГУ. Модель нацелена на отражение процессов, происходящих в российской экономике в целом.

По словам Дж. Фармера и Д. Фоули, «основательная попытка понять экономику в целом с помощью агент-ориентированного моделирования требует интеграции моделей финансового взаимодействия с моделями промышленного производства, недвижимости, государственных расходов, налогов, бизнес-инвестиций, внешней торговли и иностранных инвестиций, а также с поведением потребителей... Создание тщательно проработанной агентной модели экономики в целом, как и моделирование климата, требует огромных усилий. Это требует тесной обратной связи между имитационным моделированием, тестированием, сбором данных и развитием теории» [Farmer, Foley, 2009,

р. 686]. Данная работа не претендует на столь тщательную проработку предлагаемых моделей. В то же время, можно надеяться, что она является продвижением в правильном направлении. В частности, в ней отработаны многие важные детали и «ингредиенты», на основе которых можно в дальнейшем строить более совершенные модели.

Модель АОМММ опирается на балансовые оптимизационные модели, разрабатываемые в ИЭОПП, в особенности на Оптимизационную межотраслевую межрегиональную модель (ОМММ), с ее акцентом на межрегиональные и межотраслевые взаимодействия [Суслов и др., 2022]. Один из вариантов маломерной ОМММ используется для инициализации [Гамидов, Доможиров, Ибрагимов, 2013]. В частности, при моделировании производственных технологий частных фирм и государственных предприятий используются те же самые леонтьевские технологии, а технологические коэффициенты для них основаны на ОМММ и, в конечном счете, таблице затраты–выпуск российской экономики. (Действующий сейчас вариант модели откалиброван по статистическим данным 2015 г.) Также используется похожее разбиение на регионы и производственные секторы. В настоящий момент в модели 6 производственных отраслей и 3 макрорегиона, причем модель допускает дальнейшую детализацию. Существенным отличием АОМММ от балансовых моделей является то, что в ней в явном виде моделируется структура конечного использования, распределение доходов, государственный сектор, включающий производство общественных благ и социальную сферу.

Существенное влияние на конструкцию АОМММ оказали теоретические микроэкономические модели и модели общего равновесия (Эрроу–Дебре). Стационарное состояние, к которому приходит виртуальная агент-ориентированная экономика в долгосрочном плане при неизменности технологий и других фундаментальных параметров экономики, во многом аналогично состоянию общего равновесия в экономической теории, а имитационные эксперименты по сопоставлению сценариев при выходе на стационарность аналогичны теоретическому анализу сравнительной статики. Алгоритмы, отвечающие за поведение агентов, построены с учетом классических микроэкономических моделей, но не включают явные оптимизационные задачи.

В поведении агентов-покупателей в АОМММ также можно найти аналогии с моделями привлекательности в маркетинге [Cooper, Nakanishi, 1988], моделью условного логита [McFadden, 1973] и моделями несовершенной конкуренции в условиях продуктовой дифференциации [Dixit, Stiglitz, 1977; Anderson, de Palma, Thisse, 1992]. При этом в основе продуктовой дифференциации в АОМММ лежит неполная рациональность и несовершенство информации, а не стремление к разнообразию, как в моделях, восходящих к подходу Диксита–

Стиглица. Подход к транспортным издержкам аналогичен тем подходам, которые применяется во многих моделях теории отраслевых рынков, учитывающих пространственный аспект.

Таким образом, с одной стороны, АОМММ опирается на надежный фундамент классической экономической теории, а с другой, принадлежит к классу прикладных моделей, по которыми накоплен большой практический опыт работы в ИЭОПП СО РАН.

При разработке алгоритмов поведения экономических агентов учитывались те наработки, которые имеются в сфере машинного обучения (обучение с подкреплением, использование мягкого максимума [Sutton, Barto, 2018]), а также эконометрические методы (методы экспоненциального сглаживания [Hyndman et al., 2008], нелинейные негауссовские модели пространства состояний [Tanizaki, 1996], модели временных рядов семейств GAS [Creal, Koopman, Lucas, 2013] и DSC [Harvey, 2013]).

Для анализа результатов моделирования в АОМММ используются таблицы потоков, в основе которых лежат известные конструкции: таблицы «затраты–выпуск» [United Nations, 2018], принцип четверной записи [Copeland, 1952], матрица транзакций-потоков [Godley, Lavoie, 2007], матрицы социальных счетов [Макаров и др., 2021].

В анализе последствий государственной политики с точки зрения благосостояний населения с учетом неприятия неравенства используется модифицированная изоэластичная функция общественного благосостояния [Atkinson, 1987] и связанный с ней показатель неравенства Аткинсона [Atkinson, 1970]. Меняя параметры государственной политики, можно анализировать сопутствующие изменения показателя благосостояния при данном параметре неприятия неравенства.

Программная архитектура модели основана на таких принципах, которые облегчают модификации, введение в модель новых блоков и совершенствование существующих. В частности, детальность описания экономики можно усиливать и переходить ко все более подробным алгоритмам поведения агентов и способам их взаимодействия, повышая тем самым степень соответствия между моделью и реальной экономикой.

Научная новизна результатов исследования.

1. Построена агент-ориентированная модель экономики, отличающаяся от существующих моделей тем, что в ней одновременно присутствуют следующие особенности: во-первых, моделируется экономика страны в целом, во-вторых, имеется несколько взаимозависимых отраслей, и в-третьих, учитывается в явном виде размещение агентов в пространстве и принадлежность к регионам.

2. Предложено новое формальное представление для агент-ориентированных моделей: пошаговая формализация с действиями.

3. Для более адекватного моделирования поведения экономических агентов в агент-ориентированной модели разработаны новые алгоритмы обучения. Это метод адаптивных ожиданий с меняющимся коэффициентом, зависящим от показателя опытности, и метод адаптивной регрессии на основе SQ-фильтра.

4. Разработан оригинальный механизм рыночной торговли, основанный на модели выбора поставщика (модели привлекательности), модифицированной с учетом эластичности спроса, и учитывающий несовершенство конкуренции, неполную рациональность и ограниченность информации.

5. Предложена система показателей, позволяющая анализировать результаты работы АОМММ, в частности впервые разработанные сбалансированные таблицы «затраты–выпуск», включающие раздел распределения и перераспределения доходов.

6. Разработана общая программная архитектура АОМ, основанная на объектно-ориентированном программировании агентов с новым для агентного моделирования механизмом рассылки сообщений с помощью двух стеков.

7. Для инициализации отдельных составляющих агент-ориентированной модели впервые широко использован метод систематической выборки.

8. Впервые предложены методы анализа и оптимизации параметров государственной политики в рамках агент-ориентированной модели на основе изоэластичной функции общественного благосостояния.

Информационной базой модели АОМММ послужила малоразмерная модель ОМММ, которая, в свою очередь, основана на данных Росстата, в том числе на таблице «затраты–выпуск». Также использовались данные о географических координатах городов РФ, численности населения городов, статистические данные о количестве предприятий и об отгрузке продукции в разрезе видов экономической деятельности и субъектов РФ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Сопоставление агентного подхода к моделированию экономических систем с другими подходами к моделированию и экономическому анализу (аналитическими моделями, различными агрегированными моделями, моделями, основанными на оптимизации пропорций экономики, прикладными моделями общего равновесия, экспериментами над реальной системой) продемонстрировало наличие целого ряда важных преимуществ агентного моделирования с точки зрения представления многоотраслевой пространственной экономики отдельной страны.

2. Разработанная при участии автора Агент-ориентированная многорегиональная межотраслевая модель (АОМММ) представляет многоотраслевую пространственную экономику отдельной страны и включает такие основные составляющие экономики потребление, производство, внешняя торговля, частный и общественный сектор. Представленный подробный обзор существующих АОМ позволяет говорить о том, что АОМММ обладает важным набором характеристик, не встречающимся у существующих моделей.

3. Изоэластичная функция общественного благосостояния может использоваться для анализа последствий изменений в экономике с точки зрения влияния на общественное благосостояние. За счет наличия параметра неприятия неравенства данная функция позволяет проводить анализ последствий изменений с точки зрения различных взглядов этического характера на социальную справедливость и неравенство. Разложение благосостояния на показатели равномерности и эффективности, а также региональное разложение благосостояния позволяют проводить детализированный анализ отдельных составляющих происходящих изменений.

4. Предложенный в диссертации механизм торговли характеризуется децентрализованным формированием рыночных цен и позволяет в рамках АОМ экономики в целом воспроизводить стационарные состояния, аналогичные состоянию общего равновесия.

5. Агент-ориентированные модели экономики позволяют получать сложную экономическую динамику, сопровождающуюся изменением как макропоказателей, так и отраслевой и пространственной структуры в результате инвестиционных решений агентов на микроуровне.

6. Предложенные в диссертации сбалансированные расширенные таблицы «затраты–выпуск», включающие раздел распределения и перераспределения доходов и имеющие региональную разбивку, позволяют проводить многосторонний структурный анализ результатов моделирования в многоотраслевой пространственной АОМ.

7. Предложенные в диссертации алгоритмы обучения позволяют наделять агентов в АОМ правдоподобным поведением, включающим адаптацию к происходящим внутри модельной экономики изменениям.

8. Предложенная в диссертации схема рассылки сообщений с двумя стеками помогает структурировать в рамках компьютерной программы, реализующей АОМ, последовательность происходящих в модели событий естественным для пользователя образом.

Теоретическая и практическая значимость.

Диссертационное исследование дает целостную картину построения АОМ многоотраслевой пространственной экономики, включая общую конструкцию и отдельные составляющие такой модели, подход к ее инициализации, методы и инструменты анализа результатов работы модели, способы ее использования для анализа государственной политики. Созданные в процессе данного исследования подходы имеют как теоретическое, так и практическое значение для быстро развивающейся и перспективной научной области – агент-ориентированного моделирования экономических систем.

Результаты построения АОМММ могут в дальнейшем использоваться по двум основным направлениям. Во-первых, за счет гибкости модельной конструкции можно развивать существующую модель, совершенствуя и обновляя исходную информацию, увеличивая число отраслей, регионов, агентов, совершенствуя алгоритмы поведения агентов, пополняя модель теми аспектами, которые еще не были охвачены, и т. д. Во-вторых, богатый опыт, накопленный при построении АОМММ может быть использован при построении других моделей.

Текст диссертации представляет собой подробное описание агентного подхода к моделированию с точки зрения его использования в экономических приложениях. Изложение последовательно идет от методологического обоснования и базовых понятий к полезным инструментам моделирования и описания целого ряда агентных моделей, включая АОМММ. Описываются методы работы с АОМ на всех этапах моделирования. Таким образом, диссертацию можно использовать для обучения агентному моделированию. Это касается и специалистов, интересующихся прикладным компьютерным моделированием экономических систем, и студентов, занимающихся экономико-математическим моделированием.

Степень достоверности и апробация работы.

Достоверность полученных в диссертационном исследовании результатов и выдвигаемых научных положений обеспечивается использованием официальной статистической информации по РФ, применением апробированных подходов, используемых в прикладных моделях, разрабатываемых в ИЭОПП СО РАН, всесторонним тестированием компонентов разработанной модели, использованием методов калибровки и валидации.

Достоверность и оригинальность научных результатов диссертации подтверждается также тем, что их существенная часть была изложена в публикациях в авторитетных рецензируемых научных изданиях России. Кроме того, отдельные результаты диссертации вошли в отчеты по проектам проведения научных исследований в рамках плана НИР ИЭОПП СО РАН, междисциплинар-

ного интеграционного проекта фундаментальных исследований СО РАН, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 31, по грантам РФФИ (№ 19-010-00783, № 19-410-540002, № 20-110-50606) и РНФ (№ 23-28-01499), где получили положительную экспертную оценку.

По результатам диссертационного исследования делались доклады на международных и общероссийских научных конференциях: 55-й конгресс Европейской ассоциации региональных исследований “World Renaissance: Changing roles for people and places”, Лиссабон, 2015 г.; 2-я международная конференция «Современные эконометрические методы и приложения», Нижний Новгород, 2015 г.; конференция, посвященная акад. РАН А.Г. Гранбергу «Пространственный анализ социально-экономических систем: история и современность», Новосибирск, 2016, 2021, 2023 гг.; 3-й Российский экономический конгресс, Москва, 2016 г.; Апрельская международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества, Москва, 2017, 2019, 2020, 2021 гг. Результаты также обсуждались на методологических и научных семинарах в ИЭОПП, НГУЭУ и ЦЭМИ РАН.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют: области исследования – п. 13 «Агентно-ориентированное моделирование сложных экономических систем», п. 10 «Разработка и развитие математических моделей глобальной экономики, эконометрических и статистических методов отраслевого, межотраслевого, межрегионального и межстранового социально-экономического анализа», п. 4 «Разработка и развитие математических и компьютерных моделей и инструментов анализа и оптимизации процессов принятия решений в экономических системах» специальности 5.2.2 паспорта специальности ВАК.

Публикация результатов исследований. По теме диссертации опубликованы 27 работ общим объемом 25 п.л. (авторские 15 п.л.), в том числе 2 раздела в коллективных монографиях и 16 статей в рецензируемых изданиях, включенных в список ВАК, из них 6 публикаций, индексируемых в системе SCOPUS, и 5 – в системе WoS.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация объемом 394 стр. состоит из Введения, 8 глав, Заключения и списка литературы из 333 наименований и Приложения.

Главы 1–3 имеют методологический и обзорный характер. В главе 1 обсуждается методология агент-ориентированного моделирования и способы описания моделей. В главе 2 дан обзор существующих агент-ориентированных моделей. В главе 3 приведены конкретные примеры разнообразных экономических АОМ. Такие примеры помогают понять, как могут быть устроены экономические АОМ, как их можно описывать, какие эксперименты можно прово-

дить с такими моделями и т. д. Глава 4 посвящена программным и инструментальным аспектам агент-ориентированного моделирования. Главы 5–8 относятся к АОМММ. В главе 5 дано описание модели. В главе 6 приведены экспериментальные расчеты, связанные с тестированием отдельных элементов модели, а также со сходимостью модели к квазиравновесным состояниям. Глава 7 посвящена блоку государства в АОМММ и экспериментам, направленным на анализ последствий бюджетной государственной политики. Глава 8 посвящена моделированию инвестиций в основной капитал и экономической динамики.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Сопоставление агентного подхода к моделированию экономических систем с другими подходами к моделированию и экономическому анализу (аналитическими моделями, различными агрегированными моделями, моделями, основанными на оптимизации пропорций экономики, прикладными моделями общего равновесия, экспериментами над реальной системой) продемонстрировало наличие целого ряда важных преимуществ агентного моделирования с точки зрения представления многоотраслевой пространственной экономики отдельной страны.

Сам по себе вопрос о преимуществах агентного подхода достаточно глубоко освещен в имеющейся литературе. В данном исследовании приводимые в литературе аргументы резюмированы и изложены исходя из целей представления многоотраслевой пространственной экономики отдельной страны. Кроме теоретического обсуждения преимуществ, в диссертационном исследовании предложена конкретная агент-ориентированная модель, которая представляет экономику отдельной страны (России) как многоотраслевую и пространственную, и которая служит наглядной иллюстрацией методологических аргументов.

Благодаря использованию агентного подхода экономическое пространство в предложенной модели имеет достаточно богатую структуру. В частности, в рамках этой модели можно изучать сложные пространственные явления, для которых важно размещение агентов и пространственные взаимосвязи. При этом модель является многоотраслевой и отражает взаимозависимости между отраслями в производстве.

В отличие от аналитических моделей, агент-ориентированный подход позволяет представить экономику страны как сложную систему, включающую множество разных составляющих и характеризующуюся многочисленными связями между отдельными частями. Использование данного подхода позволило отказаться от многих сильных предположений и упрощений, требующихся чтобы охарактеризовать решение и произвести анализ в аналитической модели.

В отличие от большинства теоретических моделей, в агент-ориентированных моделях, как правило, учитывается ограниченная рациональность и ограниченность информации, которые важны для имитации поведения реальных агентов. В диссертации продемонстрировано, как наделить агентов в АОМ адаптивным поведением и способностью к обучению. Агенты реагируют на изменения в экономике, приспосабливаясь к текущей ситуации. Такой подход делает анализ по-настоящему динамическим.

Многие известные теоретические и прикладные модели опираются на равновесную концепцию. Агент-ориентированные модели позволяют моделировать рыночную торговлю без привлечения концепции равновесия. В диссертации предложены механизмы торговли на товарных рынках, которые в явном виде моделируют установление цен и заключение сделок. Состояние, похожее на равновесное – квазиравновесие – может сложиться в агентной модели при неизменности технологий и других параметров. Благодаря тому, что модель не использует довольно ограничительную концепцию равновесия, можно изучать сходимость к (квази)равновесию и неравновесную динамику.

В отличие от агрегированных моделей, АОМ включают в качестве неотъемлемого элемента микроуровень. Как следствие, подобные модели дают возможность изучать такие явления, для которых неоднородность агентов по характеристикам и поведению, а также достаточно сложные взаимосвязи между агентами являются ключевыми аспектами. Этим агентное моделирование принципиально отличается от подходов, основанных на агрегировании и не включающих микроуровень. В диссертации, в частности, изучаются проблемы благосостояния и экономического неравенства, в основе которых лежит неоднородность домохозяйства по доходам.

В отличие от моделей, которые основаны на оптимизации с общесистемными критериями, в АОМ каждый агент автономен и следует своим правилам поведения и целям. Благодаря этому агент-ориентированная модель лучше воспроизводит то, что происходит в реальной рыночной экономике, где нет органа, который бы решал общесистемные оптимизационные задачи и где происходящие процессы являются в существенной степени децентрализованными.

Еще одно важное преимущество агентного моделирования, которое продемонстрировано в диссертационном исследовании, – это то, что благодаря агент-ориентированной модели можно проводить эксперименты не над реальной экономикой, а над виртуальной компьютерной экономикой. Использование имитационных инструментов позволяет избежать отрицательных последствий, к которым могут привести эксперименты над реальной системой. В диссертации приведен ряд примеров анализа экономической политики с точки зрения влияния на благосостояние населения и структуру экономики.

2. Разработанная при участии автора Агент-ориентированная многорегиональная межотраслевая модель (АОМММ) представляет многоотраслевую пространственную экономику отдельной страны и включает такие основные составляющие экономики как потребление, производство, внешняя торговля, частный и общественный сектор. Представленный подробный обзор существующих АОМ позволяет говорить о том, что АОМММ обладает важным набором характеристик, не встречающимся у существующих моделей

Модель АОМММ, т. е. *Агент-ориентированная многорегиональная межотраслевая модель*, разрабатывается в Новосибирском государственном университете и ИЭОПП СО РАН (г. Новосибирск) под общим руководством В. И. Суслова. По замыслу данная модель в общих чертах соответствует экономике России, отражая многорегиональную структуру пространства и другие важные особенности данной экономики.

Модель отличается от известных агент-ориентированных моделей несколькими важными особенностями. Во-первых, она представляет многоотраслевую и многорегиональную экономику в целом, а не, например, отдельный сегмент рынка. Во-вторых, в ней явным образом учитывается пространственное размещение агентов и транспортные издержки. В-третьих, по производственной структуре она совместима с действующей нормативной моделью, Оптимизационной межрегиональной межотраслевой моделью (ОМММ), и основана на реальной информации, таблице затраты–выпуск для экономики России.

В диссертационной работе представлен подробный обзор существующих агент-ориентированных моделей, отражающий такие области как моделирование экономики в целом, моделирование пространства и моделирование государства. Сравнение с существующими моделями позволяет сделать выводы о том, что АОМММ обладает важными уникальными возможностями.

Из агент-ориентированных моделей наиболее близкие аналоги – это, по видимому, модель Г. Гинтиса, а также модели Eurace и Eurace@Unibi. В то же время АОМММ представляет собой шаг вперед по сравнению с существующими моделями, представляющими экономику в целом. Прежде всего, это касается отражения межотраслевых и пространственных потоков в экономике. В АОМММ экономика рассматривается как пространственная и состоящая из нескольких взаимозависимых отраслей.

Основные агенты в модели аналогичны тем агентам, которых выделяют в экономической теории при моделировании рыночной экономики. *Домохозяйства* получают доходы из различных источников и распределяют свой потребительский бюджет между товарами различных отраслей, руководствуясь

своей функцией полезности. *Фирмы* формируют производственные и инвестиционные планы, руководствуется получаемой прибылью, поставляют на товарные рынки потребительские товары, товары промежуточного потребления и капитальные товары, используя в производстве товары промежуточного потребления, труд и основной капитал.

Товарные рынки рассматриваются в модели как вид агентов и выполняют координационные функции, помогая агентам, являющимся продавцами и покупателями, осуществлять торговлю. Через *рынок труда* фирмы получают трудовые ресурсы для своей деятельности. *Правительство* собирает налоги, финансирует производство общественного блага и выплачивает пособия. Также моделируются *внешние рынки*, которые выходят на товарные рынки в качестве покупателей и продавцов, и *валютный рынок*.

Основные типы агентов и их основные взаимосвязи схематически показаны на рис. 1.

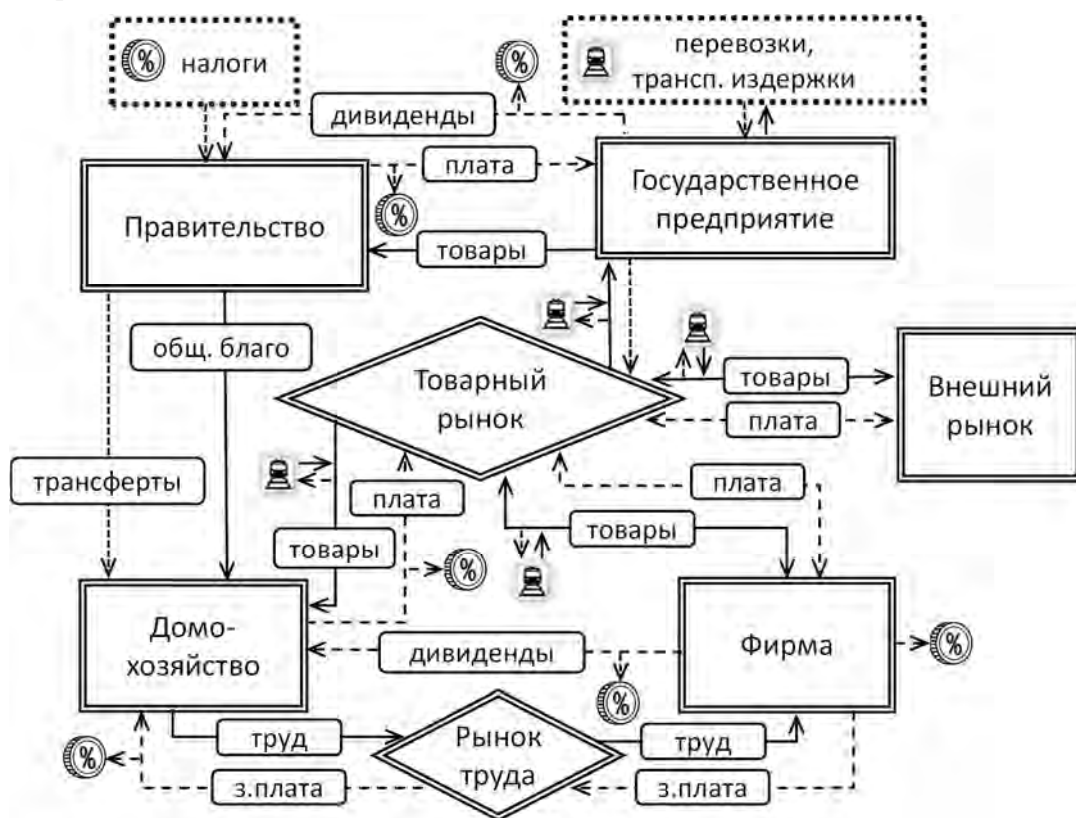


Рисунок 1. Основные агенты и их взаимосвязи в АОМММ

Агенты в модели характеризуются ограниченной рациональностью. Хотя домашние хозяйства и фирмы имеют явные целевые функции (полезность и прибыль), их действия являются не оптимальными, а адаптивными и включают некоторую степень случайного экспериментирования.

Более конкретно, домохозяйства и фирмы совершают выбор из набора случайно сгенерированных планов. Для фирмы это назначаемые цены на продукцию, для домохозяйств – доли дохода, выделенные на потребление разных

товаров. Выбор между планами производится на основе целевой функции агента. При этом используется алгоритм случайного выбора по мягкому максимуму.

При выборе выпуска и цены фирма ориентируется на свою ожидаемую прибыль в текущем периоде и в будущем. При этом фирма принимает во внимание прогноз спроса при данной цене, прогнозы цен производственных факторов и величину своих запасов готовой продукции. Для прогнозирования спроса на продукцию фирмы использован алгоритм адаптивной регрессии, где спрос убывает по собственной цене и растет по ценам конкурентов.

Географическая структура АОМММ привязана к условной карте России. Пространство в модели является непрерывным. Положение агента (домохозяйства, фирма и т. д.) задается широтой и долготой. При инициализации модели используются статистические и географические данные по экономике России. В частности, учитывается численность населения по городам, статистические показатели по экономической деятельности в разрезе регионов. Тем самым модель отражает географическую гетерогенность агентов.

Экономика страны делится на три макрорегиона: Запад, Центр и Восток с границами, определяемыми географическими границами сгруппированных федеральных округов. Каждый макрорегион состоит из обычных регионов, которых в текущей реализации модели 77. Каждый регион содержит города. Наконец, на нижнем уровне находятся фирмы и домохозяйства. Уровень городов и регионов используется в модели на этапе инициализации, для размещения фирм и домохозяйств. Еще имеется 3 внешних рынка со своими координатами. В целом моделирование направлено на многорегиональное экономическое пространство России.

В модели реализована возможность ввести региональные правительства и предприятия, производящие региональные общественные блага. Эти агенты привязаны к макрорегионам. Уровень макрорегионов используется также при составлении статистической отчетности, отражающей работу модели.

Агенты учитывают свои координаты и координаты тех агентов, с которыми взаимодействуют. Ключевым аспектом пространственного моделирования в АОМММ является учет величины транспортных издержек при реализации взаимодействия агентов экономики через товарные рынки. За счет этого создается структура взаимодействий агентов в пространстве.

Стоимость перевозки товара зависит от расположения двух взаимодействующих агентов – ее переменная часть пропорциональна расстоянию между двумя агентами. В текущей реализации модели расстояние считается по длине кратчайшего пути, без учета транспортных сетей. Эти добавочные издержки агенты учитывают при торговле друг с другом. Предполагается, что их выплачивает покупатель.

Применяется двухчастная структура затрат транспорта на перевозку: одна часть затрат пропорциональна перевозимому количеству, а вторая – расстоянию между взаимодействующими агентами и перевозимому количеству. В модели отсутствует дезагрегация по типу перевозимого груза, но затраты транспорта разные для разных отраслей.

Транспорт выделяется как отдельная отрасль. Он производится госпредприятиями (условно – аналог «РЖД»). Транспортные тарифы задаются с помощью фиксированной маржи к издержкам производства соответствующего количества услуг транспорта.

Основной информационный каркас для инициализации в АОМММ – это таблицы затраты–выпуск (ТЗВ) российской экономики. Эти таблицы, представляя входящие и исходящие потоки товаров и услуг по каждому сектору, дают информацию о его связях с поставщиками и потребителями. При соответствующих предположениях их можно использовать как источник информации о технологических коэффициентах в производственной функции.

При инициализации ТЗВ используется не непосредственно, а косвенным образом. Сначала на основе ТЗВ строится малоразмерная ОМММ («полигон»). При этом происходит агрегирование отраслей, а также распределение производства по макрорегионам. Технологии, применяемые в макрорегионах, различаются, что отражает физико-географические различия в условиях производства. Малоразмерная ОМММ и АОМММ имеют сопоставимую региональную и отраслевую номенклатуру. Данные малоразмерной ОМММ используются для инициализации технологических параметров АОМММ.

Материалоемкость и капиталоемкость берется из соответствующих матриц для трех макрорегионов (коэффициентов текущих материальных затрат и коэффициентов капиталоемкости для основного капитала). Общая величина капитала двух видов находится через базовые объемы производства и капиталоемкость. Она делится между фирмами данной отрасли, принадлежащих данному макрорегиону. Коэффициенты текущих материальных затрат для транспорта использованы как коэффициенты транспортных затрат для компоненты, не зависящей от расстояния.

В целом ОМММ служит отправной точкой, источником конструктивных идей и источником информации для АОМММ.

Работа модели организована по периодам. Период соответствует неделе. В течение каждого периода происходит стандартная последовательность событий (в упрощенном варианте, без региональных правительств, пенсионного фонда, внешних рынков и валютного рынка):

- Объявляется начало периода. Некоторые переменные сбрасываются на исходный уровень.

- Рынок труда сообщает об установленной ставке зарплаты.
- Центральное правительство формирует планы на период.
- Объявляются параметры налогов.
- Рынок общественных благ организует их покупку.
- Домохозяйства, фирмы и другие агенты составляют планы на текущий период.
- Рынок труда запрашивает предложение труда.
- Фирмы и другие продавцы выставляют свои товары на соответствующие рынки, объявляя цену и доступное количество.
- Домохозяйства, фирмы и другие покупатели сравнивают имеющиеся варианты (с учетом цен и транспортных тарифов) и делают по ним заказы в пределах доступных количеств.
- Происходит рыночная торговля.
- Исполняются заключенные на товарном рынке сделки, а их участникам сообщают параметры сделок. Выплачиваются соответствующие налоги и осуществляются платежи за перевозки. Рынок сообщает продавцам, каким был спрос на их товары.
- Рынок труда запрашивает у фирм и других производителей использованное количество труда, а также собирает у них средства на выплату заработной платы по действующей ставке. Собранные заработная плата выплачивается домохозяйствам.
- Собирается налог на прибыль.
- Фирмы принимают решение о размере инвестиций, определяют величину дивидендов и выплачивают их собственникам согласно долям собственности.
- Выплачиваются социальные трансферты.
- На рынке труда сопоставляется спрос на труд и предложение труда со стороны домохозяйств и корректируется ставка заработной платы.
- Объявляется конец периода.
- Агенты вычисляют и корректируют различные нужные им показатели. В частности, фирмы корректируют свои функции спроса, все покупатели корректируют свою информацию о ценах, правительство вычисляет бюджетный дефицит.
- Агенты заполняют статистическую отчетность.
- Агент-ориентированная система обрабатывает статистику и представляет свои отчеты пользователю.
- Начинается новый период.

3. Изоэластичная функция общественного благосостояния может использоваться для анализа последствий изменений в экономике с точки зрения влияния на общественное благосостояние. За счет наличия параметра неприятия неравенства данная функция позволяет проводить анализ последствий изменений с точки зрения различных взглядов этического характера на социальную справедливость и неравенство. Разложение благосостояния на показатели равномерности и эффективности, а также региональное разложение благосостояния позволяют проводить детализированный анализ отдельных составляющих происходящих изменений.

В агент-ориентированных моделях в качестве критерия для сравнения разных вариантов государственной политики можно использовать функцию общественного благосостояния (ФОБ, ее часто называют функцией Бергсона–Самуэльсона), зависящую от значений U_h функций полезности отдельных домохозяйств:

$$W(U_1, \dots, U_{N_h}).$$

Это некоторый обобщающий количественный показатель, который призван отражать интересы общества в целом.

В реальной жизни ФОБ можно рассчитать только опосредованно, заменяя ненаблюдаемую полезность на доступный косвенный измеритель благосостояния, такой как реальные доходы домохозяйств. При использовании подобной функции неденежные последствия экономической политики не могут быть учтены, и приходится привносить поправки в анализ. В АОМ же уровень полезности U_h для домохозяйства h наблюдается непосредственно. Поэтому для таких моделей доступна ФОБ указанного вида, и ее можно использовать для более детального и аккуратного анализа различных эффектов, связанных с социальной политикой (в том числе относящихся к достаточно деликатным социальным вопросам).

Важно, что ФОБ может учитывать не только распределительно-индифферентную экономическую эффективность, но и имеющиеся в обществе представления этического характера о социальной справедливости. От функции общественного благосостояния, как правило, требуется, чтобы в соответствии с ней более равномерное распределение было более предпочтительным, чем менее равномерное.

В АОМММ используется *изоэластичная* ФОБ (по-видимому, наиболее подходящий для прикладных моделей вариант):

$$W_v = \left(\frac{1}{N_h} \sum_{h=1}^{N_h} U_h^{1-v} \right)^{1/(1-v)}.$$

Данный показатель представляет собой среднее степенное отдельных полезностей со степенью $1 - v$, где $v \geq 0$. Величину v можно интерпретировать как коэффициент неприятия неравенства. При $v = 0$ ФОБ равняется среднему арифметическому полезностей, что соответствует утилитаристскому (бентамовскому) критерию, отражающему распределительную индифферентность. В пределе при $v \rightarrow 1$ это среднее геометрическое. В этом частном случае изоэластичную ФОБ часто называют функцией Бернулли–Нэша. При $v = 2$ получаем среднее гармоническое полезностей. В пределе при $v \rightarrow \infty$ формула дает минимум из полезностей домохозяйств, что соответствует роулсианскому критерию. Таким образом, изменение параметра v в пределах от 0 до бесконечности позволяет формализовать широкий спектр представлений о соотношении эффективности и справедливости, от чисто утилитаристских до роулсианских.

Формула изоэластичной ФОБ подразумевает сопоставимые между домохозяйствами шкалы полезности. Для обеспечения сопоставимости предполагается, что уровень полезности должен отражать величину благосостояния домохозяйства, близкую по смыслу потребительским расходам. Более конкретно, используется предположение о том, что полезность – положительная величина, и что при прочих равных условиях увеличение расходов ведет к пропорциональному увеличению полезности. Это означает, что при использовании гомотетичных потребительских предпочтений должно выполняться требование положительной однородности первой степени функции полезности по обычным частным благам.

Дополнительный критерий сравнения вариантов политики, тесно связанный с изоэластичной ФОБ, – это индекс неравенства Аткинсона (по полезности):

$$A_v = 1 - W_v/W_0.$$

Здесь $W_0 = \bar{U}$ (средняя полезность по домохозяйствам), по сути, представляет собой утилитаристскую ФОБ. Если полезности всех домохозяйств примерно одинаковые, то показатель A_v близок к нулю, а если самые большие полезности сконцентрированы у небольшого количества людей, то он близок к единице.

Из определения индекса Аткинсона получается представление изоэластичной ФОБ в виде произведения

$$W_v = (1 - A_v)W_0.$$

Здесь дополнение к индексу Аткинсона $1 - A_v$ можно интерпретировать как показатель равномерности распределения полезности, а W_0 – как утилитаристскую (распределительно-индифферентную) эффективность. Процентное из-

менение благосостояния по изоэластичной ФОБ можно представить приближенно как сумму процентного изменения равномерности и процентного изменения эффективности:

$$\% \Delta W_v \approx \% \Delta (1 - A_v) + \% \Delta W_0.$$

Эту формулу можно использовать при анализе изменений благосостояния.

Полезное свойство изоэластичной ФОБ – это ее разложимость на региональные составляющие. Благосостояние в целом по экономике – это взвешенное степенное среднее уровней благосостояния по регионам, где в качестве весов используется число домохозяйств.

Эксперименты с параметрами экономической политики в рамках АОМММ проводятся в виде серии прогонов. Для каждого прогона устанавливаются определенные значения управляющих параметров. Модель запускается на большое число периодов, так чтобы для последнего временного интервала достаточно большой длительности экономика приходила к стационарности (квазиравновесию). Для данного временного интервала рассчитываются средние значения выходных статистик. Далее для проведенной серии расчетов можно изучать влияние изменений в параметрах политики на значения выбранных характеристик.

Для проведения эксперимента удобно задавать изменения параметров политики с помощью управляющего одномерного коэффициента k , принимающего значения по равномерной сетке на отрезке $[k_{\min}, k_{\max}]$. Один из узлов сетки $k = \bar{k}$ при этом соответствует некоторому исходному варианту. Для каждого значения k на сетке проводится прогон модели и вычисляется среднее значение исследуемого показателя.

Для анализа последствий политики с точки зрения разных представлений о неприятии неравенства можно одновременно рассчитывать значения изоэластичной ФОБ $W_v(k)$ при разных значениях параметра v . В основных экспериментах с АОМММ мы использовали $v = 0, 0.5, 1, 2, 3, 5$. Если требуется изучить поведение благосостояния при каком-то конкретном значении v в зависимости от управляющего параметра, то используется $v = 2$. Поскольку величина W_v не имеет естественных единиц измерения и всегда положительна, часто удобно исследовать относительные величины благосостояния

$$\frac{W_v(k)}{W_v(\bar{k})}.$$

Данная относительная величина показывает, сколько процентов составляет полученное при коэффициенте k среднее благосостояние от среднего благосостояния в исходном варианте.

Один из экспериментов, проведенный с АОМММ, состоял в частичной замене всех социальных трансфертов так называемым безусловным базовым до-

ходом (ББД). ББД основан на отказе от принципов избирательности социальной поддержки: каждое домохозяйство гарантированно получает определенную сумму денег без проверки нуждаемости и каких-либо дополнительных условий.

В эксперименте при достаточно больших значениях параметра неприятия неравенства ($v = 1$ и выше) прослеживается общая тенденция к падению благосостояния домохозяйств с ростом доли ББД. В частности, при полной замене имеющихся пособий на ББД благосостояние для $v = 2$ падает до уровня ниже 85% от исходного. Чем выше параметр v , тем этот эффект проявляется сильнее. Таким образом, с точки зрения общества с достаточно высоким уровнем неприятия неравенства безусловный базовый доход не может быть полноценной заменой более адресных мер социальной защиты, направленных на помощь домохозяйствам с низким доходом и другим нуждающимся.

Следующий эксперимент состоял в оптимизации общего уровня налогообложения. Соотношения ставок разных налогов в экспериментах оставались неизменными, менялась только общая налоговая нагрузка на экономику. Ставки НДС, налога на прибыль и подоходного налога умножались на коэффициент пропорциональности k , где $k = \hat{k} = 1$ соответствует исходному уровню. При всех коэффициентах неприятия неравенства v кривые ФОБ растут с ростом коэффициента k до некоторого локального максимума, а затем начинают убывать.

При повышении коэффициента k общественного блага становится больше, суммы трансфертных выплат растут, и утилитаристская ФОБ растет. Однако при большом k налоговая нагрузка становится слишком высокой. Как следствие, падает потребление частных благ домохозяйствами, и этот эффект в конце концов перевешивает. Это объяснение подтверждается разложением процентных изменений ФОБ, поведением потребления и доли государственного сектора в зависимости от k .

Исследовались также последствия изменения доли социальных трансфертов в бюджетных расходах при заданных налоговых ставках. Изменялось соотношение между бюджетными расходами на социальные трансферты и на общественное благо. Доли четырех социальных пособий в бюджете изменялись пропорционально коэффициенту k . Использовались коэффициенты 0.05, 0.25, 0.50, ..., 2.75, 3.00, где базовому варианту соответствовал коэффициент $k = \hat{k} = 1$, обеспечивающий 30%-й удельный вес трансфертов в бюджетных расходах.

С ростом коэффициента пропорциональности k наблюдается существенный рост потребительских расходов в сопоставимых ценах, а также некоторый рост ВВП, при одновременном падении производства общественного блага, а

также снижении неравенства по доходам и по полезности. Рост потребительских расходов и снижение неравенства обеспечивают рост ФОБ с ростом k , но при больших k снижение количества общественного блага перевешивает этот эффект. Для каждого значения параметра неприятия неравенства v есть некоторое оптимальное значение доли социальных пособий. При этом, чем выше v , тем это оптимальное значение выше.

Общий вывод состоит в том, что использование ФОБ позволяет делать выбор между разными вариантами государственной политики.

4. Предложенный в диссертации механизм торговли характеризуется децентрализованным формированием рыночных цен и позволяет в рамках АОМ экономики в целом воспроизводить стационарные состояния, аналогичные состоянию общего равновесия.

В диссертационном исследовании предлагается использовать в АОМ механизм торговли, основанный на алгоритме выбора поставщика (модели привлекательности). В основе предложенного алгоритма выбора лежит целый ряд существующих моделей: 1) модели привлекательности из маркетинга, в частности, модель MCI, 2) эконометрическая модель мультиномиального логита в форме условного логита, 3) модель Диксита–Стиглица отрасли дифференцированного товара, 4) модель Андерсона, де Пальмы и Тисса спроса на дифференцированный товар, основанного на дискретном выборе.

Исходная модель привлекательности с фиксированным спросом модифицирована таким образом, чтобы можно было учесть зависимость спроса от цен. В предложенной модели доля (вероятность выбора) данной разновидности товара (j) пропорциональна неценовой составляющей привлекательности Q_j и степенной функции от цены этой разновидности с некоторой отрицательной степенью $p_j^{-\eta}$. По исходным долям вычисляется средневзвешенная цена $\tilde{p}$. Спрос покупателя зависит от этой цены по заданной функции спроса $D(\tilde{p})$.

Еще одно усовершенствование состоит в том, что общая величина спроса делится на несколько порций небольшого размера и спрос распределяется случайным образом между разновидностями товара согласно мультиномиальному распределению с рассчитанными вероятностями.

Алгоритм выбора поставщика встраивается в АОМ следующим образом. Для организации торговли частными товарами в модель АОМММ вводятся особые агенты – товарные рынки. Домохозяйства, фирмы и другие агенты, покупая и продавая товары одной из отраслей, взаимодействуют через соответствующий товарный рынок.

Каждый период характеризуется определенной последовательностью событий, связанных с торговлей: а) объявление продавцами своих цен и предлагаемых объемов через товарный рынок; б) информирование потенциальных покупателей об имеющихся вариантах; в) обработка покупателями информации об имеющихся вариантах; г) выставление заявок покупателями через рынок; д) принятие товарным рынком решения об объемах покупок; е) информирование покупателей и продавцов о совершенных сделках.

При разработке механизма торговли на рынках учитывалось требование согласованности в использовании экономических ресурсов и тот факт, что агенты, выступающие продавцами и покупателями, должны иметь возможность планировать свои действия. При этом конструкция механизма торговли была скоординирована с остальными элементами модели, а в поведение агентов были заложены принципы, позволяющие функционировать рынкам непротиворечивым образом. Поскольку в модели имеется несколько взаимосвязанных отраслей, то не должно быть прямого зацепления между процессами торговли на разных рынках.

Для работы механизма торговли АОМ строится в соответствии с несколькими конструктивными принципами:

- Фирмы имеют (достаточно большие) запасы готовой продукции, которые и предлагают к продажам на рынке.
- Продавцы в самом начале процесса торговли объявляют свои цены и в дальнейшем эти цены остаются неизменными.
- Домохозяйства заранее распределяют свой бюджет между товарами разных отраслей и не меняют структуру расходов в процессе торговли.
- Из-за наличия в модели особых балансирующих компаний и внешних рынков спрос покупателей всегда удовлетворяется, так что процесс торговли всегда должен заканчиваться за конечное число итераций.

Предложенный механизм учитывает несовершенство конкуренции, неполную рациональность и ограниченность информации.

В рамках АОМММ предложенный механизм торговли был протестирован в ситуации, когда технологии, предпочтения домохозяйств и прочие параметры экономики не меняются от периода к периоду. В такой ситуации естественно ожидать сходимости к воображаемому стационарному состоянию, которое можно назвать квазиравновесием. Квазиравновесие в АОМ можно рассматривать как аналог обычного общего равновесия для классической Вальрасовской модели, когда на рынках устанавливаются такие цены, которые уравнивают спрос и предложение.

Был проведен ряд компьютерных экспериментов, в которых оценивалась способность модели достигать приближенно стационарного состояния и имитировать работу конкурентных рынков. В этих экспериментах отслеживалась динамика показателей, которые могли бы служить критериями сходимости к квазиравновесию. В частности, это показатели неопределенности спроса и изменчивость цен. Также анализировалась сходимость основных макроэкономических показателей к стационарному уровню.

Эксперименты с АОМММ подтвердили, что экономика на самом деле приближается к стационарности. Как правило, к 300-му периоду отклонения от долгосрочных уровней довольно малы, поэтому ими можно пренебречь при обработке результатов экспериментов с моделью.

5. Агент-ориентированные модели экономики позволяют получать сложную экономическую динамику, сопровождающуюся изменением как макропоказателей, так и отраслевой и пространственной структуры в результате инвестиционных решений агентов на микроуровне.

Модель АОМММ нацелена на моделировании макроэкономической динамики в многорегиональном экономическом пространстве. В связи с этим стояла задача создания полноценного динамического варианта АОМММ, а это требует адекватного представления инвестиционных процессов. В частности, требовалось сконструировать конкретные алгоритмы, по которым действуют агенты, участвующие в инвестиционных процессах.

На уровне отдельной фирмы инвестиции в основной капитал выполняют несколько разных функций, важнейшей из которых является определение будущего размера фирмы. В зависимости от соотношения выбытия основного капитала и валовых инвестиций фирма может увеличивать мощности, поддерживать их на неизменном уровне или же «проедать» их.

На уровне экономики в целом инвестиции в основной капитал определяют разного рода ключевые изменения в экономике, такие как изменения пространственной и отраслевой структуры, экономический рост, технологическое развитие, исчезновение старых и появление новых рабочих мест, размер и распределение потребительских доходов и т. д.

При разработке инвестиционного блока АОМММ ставилась задача сконструировать его таким образом, чтобы учитывалась нацеленность модели на отражение межотраслевых и межрегиональных потоков в российской экономике. Удачно сконструированный инвестиционный блок позволяет провести разного рода экспериментальные расчеты в рамках различных сценариев роста экономики и изменения ее пространственной структуры.

В текущей версии АОМММ в качестве основного используется простой режим капитализации прибыли с финансированием внутрифирменных инвестиций за счет прибыли самой фирмы. Фирма после завершения всех сделок и уплаты налогов получает некоторую величину прибыли, доступной для инвестиций. Из этой величины фиксированная доля k_f идет на инвестиции, а ставшая сумма идет на выплату дивидендов собственникам.

Для целей калибровки и сравнения использовался режим поддержания первоначальных мощностей (первый режим выбора объема инвестиций). Но в качестве основного режима выбора объема инвестиций выступал режим фиксированной доли прибыли (второй режим). Более конкретно, фиксированные коэффициенты k_f для второго режима рассчитывались на основе прогона модели в первом режиме. Для каждой отрасли в каждом макрорегионе вычислялась средняя доля прибыли, которая идет на инвестиции. Затем коэффициенты k_f задавались равными полученным в эксперименте долям в зависимости от того, к какому макрорегиону и к какой отрасли относится фирма f .

Для второго режима (режима фиксированной доли прибыли), в отличие от первого, потенциально могут возникнуть проблемы с достижением стационарности по выпускам. Как показали эксперименты, серьезных проблем с выходом на стационарность при использовании второго режима не наблюдается. При этом оказывается, что второй режим приводит к гибкости экономики по отношению к масштабным изменениям параметров государственной политики. На АОМММ, использующей режим фиксированной доли прибыли, были проведены исследования по влиянию структуры и размера государственного сектора на благосостояние населения, для которых подобная гибкость существенно важна.

Также изучено, позволяет ли второй режим моделировать процессы роста в экономике, сопровождаемые изменением ее структуры. Проверяемая гипотеза состояла в том, что позволяет, причем благодаря гибкости данного режима структурные изменения происходят сбалансированно.

В качестве источника роста был выбран экзогенный технический прогресс, проявляющийся в падении коэффициента трудоемкости для всех фирм постоянным темпом 2% в годовом исчислении. При проведении данного эксперимента экономика инициализировалась стационарным состоянием для второго режима из предыдущего эксперимента. В целом траектории выпуска свидетельствуют об устойчивом росте, причем темпы роста различаются по регионам и отраслям.

Таблица 1. Рост выпуска во втором режиме

	Добыча	Обраб.	Строит.	Услуги
Пер. 1	10.1%	7.5%	13.0%	1.4%
Пер. 2	0.3%	5.4%	12.4%	1.8%
Пер. 3	-1.2%	6.4%	55.2%	4.3%
Всего	1.0%	6.5%	23.3%	2.2%

В табл. 1 показаны приросты выпуска по отраслям за последние 10 периодов по сравнению со стационарным состоянием, по которому инициализировалась экономика. Таблица подтверждает наличие существенных отраслевых и региональных различий в скорости роста. В частности, произошел опережающий рост строительства в регионе 3. В результате этого доля региона 3 в объеме строительства выросла с 24.8% до 31.3%.

Эксперимент показал, что 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 наблюдается довольно ровная динамика основных показателей, без резких колебаний.

6. Предложенные в диссертации сбалансированные расширенные таблицы «затраты–выпуск», включающие раздел распределения и перераспределения доходов и имеющие региональную разбивку, позволяют проводить многосторонний структурный анализ результатов моделирования в многоотраслевой пространственной АОМ.

Для табулирования результатов расчетов по АОМММ и анализа этих результатов с точки зрения пространственной и отраслевой структуры взаимодействий между агентами, а также денежных потоков в государственном секторе, был разработан вариант сбалансированной расширенной таблицы «затраты–выпуск» (ТЗВ). Таблица содержит разделы, относящиеся к распределению и перераспределению доходов, и имеет региональную разбивку.

Сбалансированная расширенная ТЗВ соответствуют взгляду на экономику с точки зрения кругооборотов и потоков ресурсов и связанных с этими потоками тождеств. Для представления кругооборота ресурсов в экономике можно сопоставить некоторые денежные величины всем транзакциям, перемещениям ресурсов, запасам и т. д. При этом каждая транзакция между агентами может быть отнесена к тому или иному классу. Соответствующие агрегированные потоки и запасы за определенный период времени можно представить в табличном виде.

Сбалансированная расширенная ТЗВ опирается на ту же логику, что и матрица транзакций-потоков, используемая в направлении макроэкономики,

опирающемся на согласованность по потокам и запасам. В матрице транзакций-потоков также по строкам отражаются транзакции разных видов, а по столбцам – институциональные сектора экономики. Данная матрица является сбалансированной – характеризуется нулевыми суммами по строкам и столбцам.

С другой стороны, сбалансированная расширенная ТЗВ имеет структуру, напоминающую классическую ТЗВ. Отличие состоит в том, что ключевая цель классической ТЗВ – дать представление о производственной стороне экономики, о промежуточном потреблении продуктов в производстве и т. п. Также отражается производственное потребление трудовых ресурсов, использование произведенной продукции, структура получаемой в производстве добавленной стоимости и другие непосредственно связанные с производством аспекты. При этом за кадром остаются многие другие происходящие в экономике процессы. Например, в обычной ТЗВ не находят отражение подоходные налоги или социальные пособия.

Столбцы в левой части сбалансированной расширенной ТЗВ соответствуют производственным агентам, классифицированным по отраслям и макрорегионам. Столбцы в правой части соответствуют агентам, осуществляющим конечное использование продуктов. Это, в частности домохозяйства с разбивкой по макрорегионам, правительства – федеральное и региональные по макрорегионам, внешние рынки («Экспорт»), валютные рынки, пенсионный фонд. К конечному использованию относится также столбец для инвестиций (валового накопления), не привязанный к конкретной группе агентов. Последний ненулевой столбец относится к рынкам продуктов (товарным рынкам, рынкам общественных благ и рынкам услуг транспорта).

В верхней части таблицы строки отражают транзакции с продуктами, произведенными некоторой отраслью некоторого макрорегиона, а также с общественными благами. В левых столбцах записывается промежуточное использование этих продуктов, в правых – конечное использование, а в столбце для рынков – общие продажи со знаком минус. Аналогичную структуру имеют лежащие ниже строки, относящиеся к продуктам разных отраслей, произведенных за рубежом («Импорт»).

Отдельная строка служит для записи транзакций по косвенным налогам («НДС»).

Следующая группа строк относится к составляющим валовой добавленной стоимости и распределению доходов. Это строки, соответствующие оплате труда, производственным субсидиям со знаком минус и валовой прибыли. В ту же группу входит балансирующая строка, отражающая не транзакции между агентами, а изменение запасов денег (ΔM). Составляющие валовой добавленной стоимости записываются в левых столбцах, а получаемые доходы (оплата

труда, дивидендные выплаты, налог на прибыль) записываются со знаком минус в правых столбцах.

Кроме того, в таблицу введены строки для перераспределения доходов. Сюда входит подоходный налог, социальные трансферты домохозяйствам, пенсии, межбюджетные трансферты.

Наконец, ниже идет строка, соответствующая продажам продукции производственными агентами. Такие продажи записываются в левой части таблицы и в столбце экспорта со знаком минус. В столбце товарных рынков те же продажи записываются со знаком плюс.

Общий вид расширенной сбалансированной ТЗВ для АОМММ показан на рис. 2.

	R1, S1	R1, S2	R1, S3	R1, S4	R1, S5	R2, S1	R2, S2	R2, S3	R2, S4	R2, S5	R3, S1	R3, S2	R3, S3	R3, S4	R3, S5	F.Pub.C	R.Pub.C	Total IC	Hb, R1	Hb, R2	Hb, R3	Fed.Gvt	R.Gvmt	R.Gvmt	R.Gvmt	Pens.	Invest.	Export	FXMark	Total FC	Tt Output	Tt Output	Balance	
R1, S1	52	393	111	0	18	53	304	13	8	9	110	419	4	0	9	4	11	1416	438	305	201	0	0	0	0	0	0	0	1278	2694	-2694	0		
R1, S2	141	1428	383	0	431	173	1668	419	438	265	348	1168	198	0	223	131	331	7743	1293	911	623	0	0	0	0	0	2381	129	0	5337	13081	-13081	0	
R1, S3	9	30	47	0	143	10	25	39	46	77	18	24	20	0	93	39	99	718	505	324	188	0	0	0	0	0	2621	158	0	3795	4513	-4513	0	
R1, S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
R1, S5	126	1227	289	0	2448	132	569	242	831	387	203	380	103	0	290	191	486	7904	4394	2899	1561	0	0	0	0	0	495	0	9349	17254	-17254	0		
R2, S1	65	501	13	0	24	72	401	14	10	11	142	534	6	0	10	6	14	1822	566	404	260	0	0	0	0	0	422	0	1652	3474	-3474	0		
R2, S2	123	1239	332	0	376	153	1496	381	382	239	317	1060	179	0	204	115	299	6896	1145	822	564	0	0	0	0	0	2120	114	0	4766	11662	-11662	0	
R2, S3	6	20	30	0	97	7	24	39	31	68	17	25	19	0	89	32	82	886	343	279	182	0	0	0	0	0	2159	126	0	3090	3676	-3676	0	
R2, S4	64	404	99	0	398	83	355	98	207	126	218	310	54	0	152	62	160	2789	1646	1146	915	0	0	0	0	0	584	0	4291	7081	-7081	0		
R2, S5	56	535	131	0	1085	65	322	140	358	205	117	219	59	0	161	94	239	3787	1966	1544	875	0	0	0	0	0	250	0	4635	8422	-8422	0		
R3, S1	131	986	27	0	48	144	836	29	20	23	330	1171	14	0	26	11	30	3826	1129	814	594	0	0	0	0	0	923	0	3460	7286	-7286	0		
R3, S2	96	981	265	0	297	121	1185	302	302	188	260	865	146	0	162	93	239	5504	901	650	458	0	0	0	0	0	1687	93	0	3788	9292	-9292	0	
R3, S3	2	8	11	0	37	3	9	14	11	25	9	12	10	0	48	13	34	246	127	98	98	0	0	0	0	0	915	60	0	1299	1544	-1544	0	
R3, S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
R3, S5	40	374	95	0	772	45	264	112	255	158	185	244	70	0	248	82	219	3162	1415	1137	1305	0	0	0	0	0	293	0	4150	7311	-7311	0		
F.Pub.Good	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
R.Pub.Good	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tt Domestic	910	8127	1733	0	6175	1061	7458	1841	2900	1779	2275	6432	881	0	1714	873	2240	46399	15869	11334	7825	2880	3392	2212	1770	0	11882	3980	0	61143	107543	-107543	0	
Import, S1	1	10	0	0	0	1	7	0	0	0	2	11	0	0	0	0	0	35	10	7	5	0	0	0	0	0	9	0	31	66	-66	0		
Import, S2	33	328	87	0	99	40	383	95	99	61	86	276	48	0	55	31	79	1800	292	211	149	0	0	0	0	0	558	30	0	1240	3041	-3041	0	
Import, S3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1	8	4	3	3	0	0	0	0	0	32	3	0	45	53	-53	0	
Import, S4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	136	98	69	0	0	0	0	0	0	60	0	363	363	-363	0		
Import, S5	4	42	10	0	80	5	23	10	26	14	13	19	5	0	17	8	18	294	153	110	95	0	0	0	0	0	31	0	390	684	-684	0		
Tt Import	38	380	98	0	181	46	414	106	126	76	102	306	53	0	73	39	99	2138	596	429	321	0	0	0	0	0	590	134	0	2069	4206	-4206	0	
Total IC	948	8507	1831	0	6356	1107	7872	1947	3026	1855	2377	6738	935	0	1787	913	2338	48537	16464	11763	8146	2880	3392	2212	1770	0	12472	4114	0	63212	111749	-111749	0	
VAT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2964	2117	1466	-9441	1331	868	694	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Employees	1197	1554	1261	0	4321	680	1207	787	2155	2833	777	1252	385	0	2995	1392	3566	26362	-9559	-6016	-6393	0	0	0	0	-4394	0	0	0	-26362	0	0	0	
Subsidies(-)	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	
Gross OS	561	2998	1418	0	6548	1687	2568	940	1900	3721	4119	1287	225	0	2516	575	1470	32533	-6683	-7009	-2544	-862	-1405	-932	-627	0	-12472	0	0	-32533	0	0	0	
AM	-11	22	3	0	29	0	14	2	0	13	14	15	0	0	13	0	113	-40	-30	-34	-20	2	1	7	0	0	0	0	0	-113	0	0	0	
Gross VA	1746	4574	2682	0	10808	2367	3789	1729	4055	6567	4910	2554	609	0	5524	1967	5035	59006	-16282	-13056	-8970	-880	-1402	-931	-619	-4394	-12472	0	0	-59006	0	0	0	
Income Tax	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2111	1693	1162	0	-2111	-1693	-1162	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Unem. Bnfts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-601	-281	-199	303	427	194	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Child Bnfts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-579	-288	-214	303	427	194	155	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Welf. Bnfts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1653	-767	-605	850	1196	544	435	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Pov. Bnfts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
UBI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Pa.W. Bnfts	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Other Transf	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Pensions	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2425	-1183	-786	0	0	0	0	0	0	4394	0	0	0	0	0	0	
Interbudget	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4511	-2540	-918	-1053	0	0	0	0	0	0	0	
Other Redistr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1473	-720	-470	-376	0	93	0	0	0	0	0	
Tt Redistr.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-3146	-825	-642	7441	-3321	-2149	-1845	4394	93	0	0	0	0	0	0	0	
Tt Output	2694	13081	4513	0	17254	3474	11662	3676	7081	8422	7286	9292	1544	0	7311	2880	7374	107543	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4206	0	4206	111749	-111749	0	0
Tt Output(-)	-2694	-13081	-4513	0	-17254	-3474	-11662	-3676	-7081	-8422	-7286	-9292	-1544	0	-7311	-2880	-7374	-107543	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4206	0	-4206	-111749	111749	0	0
Balance	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Рисунок 2. Расширенная ТЗВ для АОМММ – полная таблица

Сбалансированная расширенная ТЗВ представляет собой инструмент структурного анализа результатов расчетов по АОМ, давая общую картину происходящего в модельной экономике. Помимо этого, таблица служит средством проверки согласованности в модели: расчеты сумм по строкам и столбцам ведутся по разным принципам независимо друг от друга, но в результате они должны совпадать.

7. Предложенные в диссертации алгоритмы обучения позволяют наделять агентов в АОМ правдоподобным поведением, включающим адаптацию к происходящим внутри модельной экономики изменениям.

В АОМ агент, который принимает решения на основе поступающей к нему извне информации, должен уметь делать две вещи. Во-первых, он должен

как-то усвоить полученную информацию, изменив свои переменные состояния. Во-вторых, он должен принять решение о том, какое действие ему предпринять на основе уже усвоенной им информации.

Самые простые правила поведения агентов в АОМ могут носить чисто описательный характер, но для адекватного описания поведения основных экономических агентов важным представляется использование алгоритмов на основе некоторой целевой функции, которую агент максимизирует. Если бы виртуальный агент обладал информацией о всех привходящих обстоятельствах и мог просчитать влияние своих действий на значение целевой функции (выигрыш), то он потенциально мог бы выбирать действия, дающие максимальный выигрыш. В экономической теории такое оптимизирующее поведение агентов рассматривается в рамках равновесных конструкций вальрасовского или теоретико-игрового типа, однако для АОМ такой подход напрямую неприменим. В частности, сложности здесь связаны с неизвестными или непредсказуемыми действиями других агентов. Кроме того, может быть важен не только ближайший выигрыш агента, но и выигрыши, которые он будет получать в течении многих периодов в будущем.

В связи с этим, приходится наделять агентов упрощенными адаптивными правилами поведения, учитывающими несовершенство информации и неполную рациональность. Агенты в АОМ не должны получать слишком большой объем информации и не должны быть неправдоподобно разумными.

Для задания поведения агента в АОМ предлагается взять за основу исходную целевую функцию этого агента и дополнить ее некоторой моделью, описывающей текущее состояние окружающего мира (т. е. остальных агентов и поддерживающей агентов системы) и прогнозирующей изменение состояния окружающего мира в будущем. Модель характеризуется некоторыми меняющимися по периодам $t = 1, \dots, T$ параметрами a_{it} . Если параметры меняются в зависимости от окружающей обстановки, то поведение агента будет адаптивным. Предполагается, что в течение каждого периода t происходит ряд событий:

1) Каждый агент получает информацию об окружающем мире y_{it} . На основе полученной информации он обновляет свою внутреннюю модель мира, корректируя параметры a_{it} .

2) Каждый агент решает на основе внутренней модели с параметрами a_{it} , какое действие x_{it} выбрать в текущем периоде.

3) Каждый агент выполняет выбранные действия x_{it} , что приводит к изменению состояний агентов и системы в целом.

Например, для прогнозирования значения переменной y_t в следующем периоде подходит формула адаптивных ожиданий

$$\tilde{y}_{t+1} = \tilde{y}_t + \alpha_t(y_t - \tilde{y}_t),$$

с постоянным коэффициентом α_t . Для большей гибкости при использовании в

рамках АОМ в данном исследовании предложено использовать **формулу адаптивных ожиданий с меняющимся коэффициентом, зависящим от показателя опытности W_t** :

$$W_{t+1} = (1 - \varphi)W_t + 1,$$

$$\alpha_t = \frac{1}{W_{t+1}}.$$

где $\varphi \in [0; 1)$ – параметр забывчивости. С помощью параметра φ можно регулировать накопление опыта агентом.

В модифицированном алгоритме Эрева–Рота [Гайворонская, Цыплаков, 2018] идея адаптивных ожиданий с показателем опытности используется для формирования ожиданий относительно взаимосвязанных показателей – величин выигрышей при выборе действий из дискретного множества действий. Данный алгоритм использовался в АОМ российского оптового рынка электроэнергии.

Для ситуации, когда требуется формировать ожидания агента с использованием дополнительных переменных, в исследовании предложен более сложный алгоритм обучения – **SQ-фильтр**. В его основе лежит модель пространства состояний. SQ-фильтр можно рассматривать как приближенный алгоритм фильтрации, который эквивалентен полноценной процедуре фильтрации в случае гауссовской линейной модели пространства состояний. Он обобщает известный фильтр Калмана на случай нелинейной и/или негауссовской плотности измерения.

Для целей применения в АОМ общий SQ-фильтр конкретизирован для случая линейной регрессии с меняющимися параметрами $y_t = X_t\beta_t + \varepsilon_t$, где y_t – наблюдение, содержащее информацию об окружающем мире, X_t – объясняющие переменные регрессии. Предполагается, что в регрессии как ее коэффициенты β_t , так и дисперсия ошибки $\text{var}(\varepsilon_t) = e^{h_t}$ могут меняться во времени. Для ошибки берется распределение Стьюдента (с κ степенями свободы), чтобы сделать алгоритм робастным возможным выбросам.

В результате преобразований и упрощений получены формулы для рекуррентного получения агентом оценок меняющихся параметров:

$$\beta_{t+1} = \beta_t + \frac{(\kappa - 2)(\kappa + 3)\xi_t}{\kappa(\kappa - 2 + \xi_t^2)} e^{h_t/2} c_t^{-2} P_{\beta t} X_t^T,$$

$$c_t = \sqrt{\frac{(\kappa - 2)(\kappa + 3)}{\kappa(\kappa + 1)} e^{h_t} + X_t P_{\beta t} X_t^T},$$

$$P_{\beta, t+1} = P_{\beta t} - P_{\beta t} X_t^T c_t^{-2} X_t P_{\beta t} + \Omega_{\beta},$$

$$h_{t+1} = h_t + \rho \frac{\kappa \xi_t^2 - \kappa + 2}{\kappa - 2 + \xi_t^2}.$$

Здесь Ω_β – ковариационная матрица в уравнении перехода, лежащим в основе изменения коэффициентов β_t , $P_{\beta t}$ – оценка ковариационной матрицы коэффициентов β_t , ρ – коэффициент сглаживания для логарифма дисперсии ошибки.

Алгоритм адаптивной регрессии был протестирован в модели искусственного фондового рынка Санта-Фе при предсказании рыночной цены и хорошо зарекомендовал себя. Он также успешно работает в АОМММ при предсказании спроса на продукцию фирмы. В целом экспериментальные расчеты с использованием предложенного алгоритма показали, что с помощью него можно наделять агентов правдоподобным поведением, не «перегружая» их при этом чрезмерно сложными расчетами.

8. Предложенная в диссертации схема рассылки сообщений с двумя стеками помогает структурировать в рамках компьютерной программы, реализующей АОМ, последовательность происходящих в модели событий естественным для пользователя образом.

Для реализации АОМММ и других АОМ в виде компьютерной программы предложен ряд решений, помогающих сделать процесс написания и модификации программного кода АОМ более удобным и гибким. Была разработана общая программная архитектура АОМ, основанная на объектно-ориентированном программировании с механизмом рассылки сообщений.

Среди исследователей и практиков, занимающихся АОМ, сложился консенсус, что для реализации АОМ в виде кода естественно использовать принципы объектно-ориентированного стиля программирования, включающего такие элементы как абстракция, инкапсуляция, модульность и иерархия. В частности, инкапсуляция хорошо согласуется с автономностью, характеризующей агентов. Агент в программе представляется как единый объект, объединяющий переменных состояния агента и методы (процедуры), реализующие его поведение. В рамках предлагаемой нами архитектуры программа, реализующая АОМ, включает три базовых класса: 1) агент, 2) агент-ориентированная система (агент особого вида), 3) диспетчер сообщений. Система и диспетчер существуют в единственном экземпляре. Агент-ориентированная система содержит всех агентов и является владельцем диспетчера сообщений.

Каждый класс агентов в АОМ – наследник некоторого родительского класса агентов, и в целом все агенты – наследники абстрактного базового класса «Агент». Здесь проявляется иерархия и наследование, характерные для объектно-ориентированного стиля программирования. Например, при использовании сообщений для управления агентами каждый агент должен знать, как можно отправить сообщение нужному адресату, т. е. он должен знать о диспетчере сообщений. Кроме того, должна существовать ответственность агента получать сообщения и некоторым образом реагировать на них. Значит, каждый

из агентов, являющийся наследником базового класса «Агент», будет обладать данной функциональностью. Разница лишь в том, что каждый класс может по-разному реализовывать данную ответственность, т. е. реагировать на полученное сообщение.

Рассылка сообщений используется в ряде существующих агент-ориентированных моделей и платформ: модель ASPEN, агент-ориентированная платформа FLAME, на которой реализованы модели Eurace и Eurace@Unibi. Так, в Eurace@Unibi сообщения выставляются на общую доску сообщений. Агенты ежедневно проверяют доску объявлений, собирая относящиеся к ним сообщения. Также «сообщения» являются стандартным понятием в объектно-ориентированной парадигме программирования, где часто отождествляются с методами объектов. Сообщение воздействует на объект, вызывая определенную реакцию. В то же время в предлагаемой нами программной архитектуре сообщения играют особую роль, не являясь просто вызовом методов объектов.

При выполнении того или иного метода (процедуры) агент воздействует на других агентов при помощи рассылки сообщений этим агентам. Здесь принципиально важно, что сообщения рассылаются лишь после того, как тот метод, в рамках которого они созданы, уже завершился и вернул управление диспетчеру. Разосланные сообщения попадают к агентам-получателям и, в свою очередь, запускают их методы. Таким образом, деятельность одного агента приводит по принципу домино к побуждению к действиям других агентов.

В этом механизме отправитель сообщения после отправки уже не влияет на дальнейшую обработку сообщения. Все решения о том, как реагировать на сообщение, принимаются агентом-получателем. Тем самым, зацепление (т. е. алгоритмическая взаимозависимость) между агентами становится минимальным, что важно как с точки зрения использования объектно-ориентированного подхода к программированию, так и с точки зрения последовательного проведения принципа автономного поведения агентов в АОМ.

Структура рассылаемых сообщений включает следующие 4 поля: 1) получатели сообщения, 2) тип сообщения – это метод агента-получателя, которому передается сообщение, 3) содержание сообщения, 4) отправитель сообщения. Агенты в модели помечены уникальными идентификаторами, которые позволяют указывать их в качестве получателей индивидуальных сообщений. Также реализована рассылка сообщений группам агентов (например, Домохозяйствам, Фирмам) и агент-ориентированной системе в целом. Если получатель – группа агентов, то диспетчер рассылает сообщения соответствующим агентам в цикле.

Сообщения пересылаются через посредство диспетчера сообщений. Объект-диспетчер имеет два стека для хранения сообщений: стек исполнения и

промежуточный стек. Когда агент отправляет сообщение, оно попадает в промежуточный стек. Там хранятся сообщения, которые отправлены группой агентов (или отдельным агентом) на текущем этапе исполнения. До конца этапа сообщения только добавляются, но не убираются. Когда исполняется метод очередного агента, отправленное сообщение добавляется на вершину стека. По окончании текущего этапа исполнения управление возвращается к диспетчеру, который дальше работает с имеющимися у него сообщениями в двух стеках.

В промежуточном стеке сообщения располагаются в перевернутом порядке (ранее высланные находятся ниже). После того, как управление возвращается к диспетчеру, сообщения перекадываются из промежуточного стека в стек исполнения. При этом их порядок опять переворачивается. Затем берется верхнее сообщение из стека исполнения и отправляется получателю (получателям).

При использовании двух стеков сообщения можно добавлять в стек в естественном порядке, поскольку сначала они добавляются в промежуточный стек, а затем перемещаются в стек исполнения, и при этом их порядок меняется на противоположный. Таким образом, достигается удобство, естественность и поэтапность при программировании АОМ. Благодаря этому разработка достаточно сложной модели становится доступной даже человеку, не обладающему профессиональными навыками программиста.

В целом на примере программного кода АОМММ было продемонстрировано, что с точки зрения организации последовательности событий и процессов при работе АОМ большие преимущества может дать предложенный механизм рассылки сообщений между агентами, реализованный в виде двух стеков.

Компьютерный код, построенный на указанных принципах, написан автором на языке программирования Lua. Код включает общую библиотеку для создания агент-ориентированных моделей, а также созданную с использованием библиотеки программную реализацию АОМММ. Вместе с другими программными продуктами, написанными автором, этот данный код образует платформу, предназначенную для агент-ориентированного моделирования.

Заключение

В диссертации агентный подход к моделированию экономических систем предстает как полезный инструмент, который позволяет исследователю работать с процессами и явлениями, включающими пространственные эффекты, гетерогенность и стохастику, конструировать искусственные «миры» с реалистичным поведением агентов и богатой структурой, изучать их свойства посредством вычислительных экспериментов.

Конечно, работа с агент-ориентированными моделями требует вычислительных ресурсов и достаточно подробной информации для инициализации агентов и модельной системы. Ранее эти трудности замедляли развитие агент-ориентированного моделирования, но с увеличением мощности компьютеров и доступностью больших данных данный инструментарий стал востребованным. Сейчас это уже серьезная альтернатива другим, более привычным подходам.

Предложенная здесь модель – АОМММ – во многом носит пробный характер. Осталось еще много открытых вопросов. В то же время, в процессе моделирования накоплен большой опыт по разработке конкретных алгоритмов, модельных конструкций, статистических показателей и прочих элементов, которые могут обогатить арсенал экономистов, занимающихся агентным направлением. Проведенное исследование внесло вклад в понимание того, как такие модели должны быть устроены, какими конструктивными особенностями должны обладать.

Среди прочего в диссертации представлены новые алгоритмы обучения, механизм рыночной торговли, представляющий собой развитие модели привлекательности поставщика, сбалансированные таблицы «затраты–выпуск», включающие раздел распределения и перераспределения, программная архитектура АОМ, включающая механизм рассылки сообщений с помощью двух стеков, алгоритмы поведения основных экономических агентов и др. Эти разработки расширяют существующий инструментарий агентного и другого прикладного моделирования в экономике.

С помощью АОМММ был проведен ряд экспериментальных расчетов. Раскрыты возможности использования функций общественного благосостояния для анализа изменений в государственной политике. Продемонстрировано, как с помощью изоэластичной ФОБ можно оптимизировать параметры государственной политики. В рамках динамической постановки, продемонстрировано, что моделируемая экономика может изменяться в результате независимых инвестиционных решений отдельных фирм, основанных на их финансовых показателях. Принципиально важным моментом является то, что эти же решения обуславливают и изменения в отраслевой и пространственной структуре экономики.

В целом можно сделать вывод, что агент-ориентированное моделирование в экономике – это актуальное научное и прикладное направление, для успешного развития которого в будущем есть все предпосылки.

III. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. 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. DOI: 10.17059/2016-3-28.
2. 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.
3. 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. DOI: 10.17059/2016-3-28.
4. 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.
5. 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.
6. Гайворонская Е. А., Цыплаков А. А. Использование модифицированного алгоритма Эрева—Рота в агент-ориентированной модели рынка электроэнергии // Журнал Новой Экономической Ассоциации. 2018. № 3 (39). С. 55–83. DOI: 10.31737/2221-2264-2018-39-3-3.
7. Новикова Т. С., Цыплаков А. А. Социальная политика в многоотраслевой агент-ориентированной модели. // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз, Т. 13. 2020. №3, С. 129–142. DOI: 10.15838/esc.2020.3.69.9.
8. Суслов В. И., Костин В. С., Иванов Е. Ю., Ибрагимов Н. М., Новикова Т. С., Цыплаков А. А. Проблемы создания мультиагентной системы поддержки принятия решений на субфедеральном уровне // Мир экономики и управления. 2020. Т. 20, № 3. С. 5–26. DOI: 10.25205/2542-0429-2020-20-3-5-26.
9. Новикова Т. С., Цыплаков А. А. Разработка социальной политики на основе сочетания агент-ориентированного и межотраслевого подходов. // Журнал новой экономической ассоциации. Т. 52. 2021. № 4. С. 12–36. DOI: 10.31737/2221-2264-2021-52-4-1.

10. 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.
11. Tsyplakov A.A., Melnikova L.V., Ibragimov N.I. Agent-Based Modeling of Spatial Economic Systems: a Review. Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences 2021 14(12): pp. 1910–1919. DOI: 10.17516/1997-1370-0869. URL: <http://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145038>
12. 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.
13. Суслев В. И., Цыплаков А. А., Новикова Т. С. Перераспределение ресурсов между частным и общественным сектором пространственной экономики: агент-ориентированный подход. // Экономика региона. 2023, 19(3), 612-628. DOI: 10.17059/ekon.reg.2023-3-2.
14. Цыплаков А. А. Адаптивная регрессия для агент-ориентированного моделирования // Экономика и математические методы. – 2023. – Т. 59. – №4 С. 111-125. DOI: 10.31857/S042473880028256-0
15. Новикова Т. С., Цыплаков А. А. Агент-ориентированный подход к обоснованию государственной пространственной политики. // Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки. 2024, 17(3), 607–620. EDN: UUXQVX