

Симонян Артур Арсенович
Государственный академический университет гуманитарных наук

Агентное моделирование цифровой экономики и устойчивое развитие

Аннотация. Цифровая экономика, которая характеризуется доступностью данных о транзакциях между экономическими агентами, создаёт новые возможности для достижения целей устойчивого развития. Традиционные модели, основанные на анализе агрегированных данных, часто оказываются неадекватны для анализа нелинейной, стохастической, гетерогенной и быстро эволюционирующей цифровой экономики. Эта статья является первым этапом описания методологии построения агент-ориентированных моделей на основе транзакционных данных для решения фундаментальной проблемы валидации моделей. Данные о транзакциях в цифровой экономике используются для идентификации внутренних параметров агентов модели. Приоритетным является сбор данных о транзакциях из блокчейн-экономик, хотя описываются и другие источники данных. Построенная на основе таких данных агент-ориентированная модель используется для синтеза управляющих воздействий для целей устойчивого развития.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, АОМ, цифровая экономика, устойчивое развитие,

Simonyan Artur Arsenovich
State Academic University of Humanities

Agent-based modeling of the digital economy and sustainable development

Abstract. The digital economy, which is characterized by the availability of data on transactions between economic agents, creates new opportunities for achieving sustainable development goals. Traditional models based on the analysis of aggregated data are often inadequate for analyzing the nonlinear, stochastic, heterogeneous and rapidly evolving digital economy. This article is the first step in describing a methodology for constructing agent-based models based on transaction data to address the fundamental problem of model validation. Transaction data in the digital economy is used to identify the internal parameters of model agents. Priority is given to collecting transaction data from blockchain economies, although other data sources are also described. The agent-based model built on such data is used to synthesize control actions for sustainable development goals.

Keywords: agent-based modeling, ABM, digital economy, sustainable development,

1. Введение

1.1. Устойчивое развитие

Цели устойчивого развития (ЦУР), принятые государствами-членами ООН в 2015 году, представляют собой всеобъемлющую программу по достижению глобального устойчивого будущего до 2030 года, в т.ч. ликвидацию нищеты, защиту планеты и обеспечение мира и процветания для всех людей [1]. Комплексный и взаимосвязанный характер 17 ЦУР создает значительные вызовы для их количественной оценки, а также для моделирования траекторий их достижения. С экономической точки зрения, ЦУР можно интерпретировать как многокритериальную целевую функцию глобального общества, с учетом множества ограничений (ресурсных, технологических, институциональных).

ЦУР условно можно разделить на три группы:

1. **Экономические цели:** направлены на повышение благосостояния и создание институтов экономического роста (ЦУР 8: Достойная работа и экономический рост, ЦУР 9: Индустриализация, инновации и инфраструктура).

2. **Социальные цели:** сфокусированы на справедливом распределении благ и возможностей (напр., ЦУР 1: Ликвидация нищеты, ЦУР 3: Хорошее здоровье и благополучие, ЦУР 4: Качественное образование).

3. **Экологические цели:** направлены на сохранение и восстановление природного капитала (ЦУР 13: Борьба с изменением климата, ЦУР 15: Жизнь на суше).

Многие проблемы УР (загрязнение, выбросы CO₂) являются классическими отрицательными экстерналиями, требующими интернализации через налоги Пигу или создание рынков (системы торговли квотами на выбросы). Задача исследователя — количественно оценить системные взаимосвязи, компромиссы или синергию между разными ЦУР и смоделировать последствия различных политических вмешательств.

1.2. Цифровая экономика

Цифровая экономика (ЦЭ) не имеет единого универсального определения, однако в широком смысле она понимается как хозяйственная деятельность, основанная на цифровых технологиях, в которой данные являются ключевым фактором производства, а основными организационными структурами выступают цифровые платформы [2]. Ядром ЦЭ являются ИТ-сектор и телекоммуникации. В узком смысле цифровая экономика — это электронная торговля и сервисы, а также платформы. В более широком смысле это цифровая трансформация всех секторов традиционной экономики (банки и финансы в целом, «умное» сельское хозяйство, промышленность 4.0 и т.д.).

Некоторыми особенностями ЦЭ являются сетевые эффекты: прямые (функция полезности агента зависит от размера сети), косвенные (полезность блага для агентов-покупателей платформы возрастает с ростом числа агентов-продавцов), нулевые предельные издержки, возникновение естественных монополий на базе платформ с одной стороны и многоплатформенность с другой, и т.п.

В контексте этой работы под ЦЭ понимается экономическая система в которой полностью или частично доступны данные о транзакциях. Это прежде всего блокчейны и их экосистемы, но не только.

В настоящее время данные о транзакциях распределены неравномерно. Большая их сосредоточена в базах данных, преимущественно облачных, которые принадлежат крупным логистическим платформам — маркетплейсам и крупным сетям магазинов. Интеграция всех этих баз данных по требованию законодателя возможна, если будут решены вопросы приватности, безопасности и гарантий соблюдения коммерческой тайны. Такие решения уже существуют и активно развиваются, например, технологии федеративного машинного обучения или перспективные платформы ИИ-агентов. Более того, в рутинном порядке правительственные ведомства РФ, например, имеют доступ к базам транзакций в экономике, например ФНС к безналичным переводам, а операторы СБП к пиринговым транзакциям между физическими лицами. При этом реализуются разнообразные контрольные алгоритмы, но все эти процедуры являются закрытыми, непрозрачными и находятся вне зоны общественного аудита.

1.3. Агентное моделирование и проблема валидации

Классические аналитические и эконометрические модели нередко не в состоянии ухватить всю сложность возникновения макросвойств из микроповедения в ЦЭ. Здесь могут быть полезны методы агентного моделирования (Agent-Based Modeling, ABM) [3]. Возможности агентных моделей включают в себя гетерогенные модели, явное моделирование сетей, анализ макродинамики на основе микроповедения.

Одной из самых известных ABM моделей является SugarScape (Сахарный мир) [4], развивающая идею клеточных автоматов. Она была усовершенствована в различных направлениях и была принята с большим воодушевлением, перспективы похожих моделей даже описывались в фантастических романах [5]. Однако эти модели избегали прикладных

проблем валидации тем, что были просто выделены в отдельную категорию «искусственных обществ» и их исследования были ограничены изучением их внутренних свойств.

Хорошо известно, что АВМ модели трудно валидировать: из-за недостатка данных параметры агентов трудно вычислить оптимальным образом. Валидация затруднена или является нецелесообразной и для других типов моделей, например, аналитических. Однако аналитические модели могут быть проанализированы качественными методами для получения каузальных зависимостей. Но для АВМ моделей каузальный анализ затруднён из-за возможности произвольного выбора параметров агентов. Это затрудняет извлечение каузальных выводов из АВМ модулей и ограничивает их популярность, значимость, теоретическую и практическую полезность.

Эта фундаментальная проблема валидации может быть решена в ЦЭ, где доступны данные о всех (или о значимой доле) транзакций, а также признаки агентов (кошельков) от имени которых эти транзакции сделаны. В практическом плане проблема валидации переходит в задачу идентификации, т.е. определения оптимальных параметров агентов по данным транзакций (и, возможно, их кошельков) и выбранным критериям оптимальности.

Задачу идентификации можно переформулировать как решение обратной задачи для АВМ модели, т.е. определение параметров агентов по данным их транзакций. В то время как прямой задачей является определение эволюции АВМ модели при выбранных параметрах агентов и фиксировании других параметров модели.

Проблема решения обратной задачи хорошо известна в других разделах моделирования, часто такая задача является некорректно поставленной. Есть возможность использовать развитые в соответствующих разделах моделирования техники регуляризации, но стохастический характер АВМ моделей ставит вопрос о принципиальной возможности релевантного решения обратной АВМ задачи. Здесь потребуется уточнить понятие такой релевантности.

2. Материалы и методы

АВМ модель этой статьи построена на основе модели SugarScape из пакета Mesa с некоторыми модификациями. Другие возможные расширения этой модели будут описаны в разделе 5. Опишем подробнее параметры агентов модели и кратко правила взаимодействия Агент-Агент и Агент-Среда, а затем кратко объектную структуру модели

Каждый агент в модели характеризуется следующими параметрами:

- Зрение: $v \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- Запас благ (сахар и специи): $w_1, w_2 \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$
- Метаболизм сахара, т.е. количество сахара, которое агент потребляет за $m_1 \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ каждый такт времени:
- Метаболизм специй, т.е. количество специй, которое агент потребляет за $m_2 \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ каждый такт времени:
- Богатство агента, это функция Кобба-Дугласа на основе имеющихся запасов двух благ (сахар, специи) и их метаболизмов:

$$W(w_1, w_2) = w_1^{m_1/(m_1+m_2)} w_2^{m_2/(m_1+m_2)}$$

- Правило движения агента **М**, выбирается соседняя ячейка оптимальная по видимости:

$$\max_{s \in N_v} W(w_1 + x_1^s, w_2 + x_2^s)$$

Модель также характеризуется правилом торговли **Т**, которое определяет условие обмена благ между двумя случайными агентами в одной ячейке, условием смерти агента, когда его богатство падает до минимального уровня, правилом восстановления ресурсов сетки. Стандартная модель имеет сигнатуру G1, что означает восстановление уровней

ресурсов ячейки сетки sugar, spice на одну единицу на каждом шаге до максимального значения в соответствии с заданной картой ландшафта из файла sugar-map.txt и массива sugar_distribution.

Модель включает объект grid, который представляет по умолчанию сетку 50x50. Она состоит из списка объектов — ячеек, которые имеют свойства: spice, sugar, координаты ячейки coordinate, связи с соседними ячейками connections, список агентов, находящихся в этой ячейке agents.

Также модель включает объект agents, который является списком агентов, действующих на данном шаге. Каждый из агентов имеет такие свойства: unique_id, sugar, spice, vision, metabolism_sugar, metabolism_spice, список цен prices, список торговых партнеров trade_partners, ссылку на ячейку сетки cell где находится агент.

Введём разделение параметров агентов на внутренние и внешние. К внешним параметрам отнесём количества благ агента (сахар, специи), его местоположение в определённой ячейке, т.е. координаты, а также начальное положение и начальные значения благ. К внутренним параметрам отнесём зрение и метаболизмы. Внешние параметры считаем доступными, наряду с транзакциями. Обратная задача заключается в определении внутренних параметров агентов по их транзакциям и внешним параметрам. Сразу следует отметить, что определение внутренних параметров агента невозможно, если этот агент не участвовал в транзакциях.

Следует отметить, что получение информации о транзакции не предусмотрено по умолчанию. Выделение таких данных потребовало модификации кода классов Trader, SugarscapeG1mt.

Модификация модели заключается в введении косвенного налогообложения торговых сделок между агентами. Полученные ресурсы могут быть использованы для решения социальных или экологических задач устойчивого развития.

Начальной задачей является формирование датасета торговых транзакций по базовым данным и идентификация модели, т.е. определение свободных параметров агентов по данным транзакций.

После этого моделирование налогообложения сделок позволит определить влияние этого фактора на макроагрегаты системы.

Для разработки кода моделей и проведения экспериментов использовались следующие пакеты и инструменты: Mesa 3.2 (Python), Mesa-frames 1.26 (Python), Polars 1.33 (Rust), Streamlit 1.39 (Python).

Модели и результаты экспериментов выложены на github: <https://github.com/abm-design>

3. Результаты

Целью исследования является доказательство каузального влияния экзогенных факторов на макроагрегаты модели и определение характера этого влияния. Как выбрать макроагрегаты характеризующие модель? Прежде всего следует выбрать число выживших агентов на каждом шаге (демография), затем распределение их богатства (социальное неравенство), затем диаграмма рассеяния затем характеристики торговой экономики модели.

Приведём некоторые результаты моделирования прямой задачи.

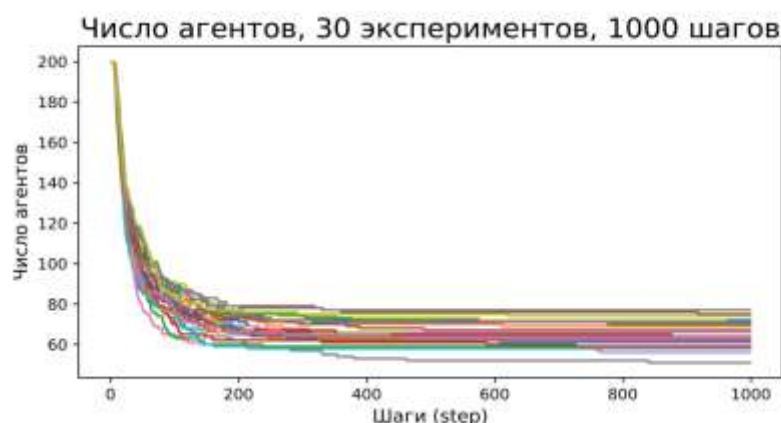


Рис. 1. Число выживших агентов.

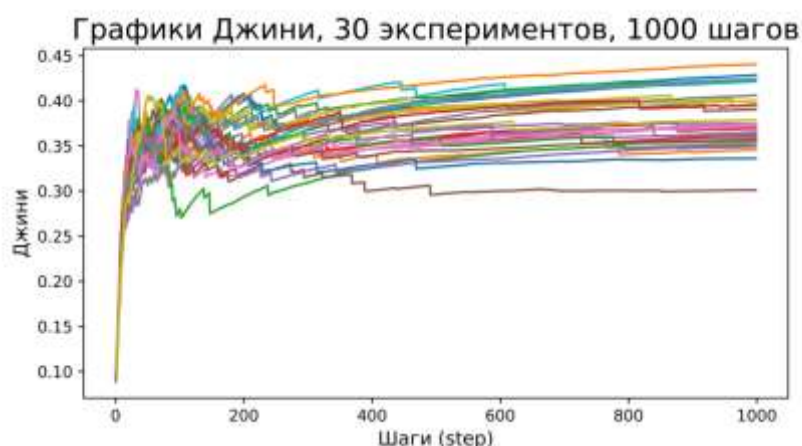


Рис. 2. Коэффициент Джини.

Результаты решения обратной задачи (задачи идентификации) будут представлены в следующей работе, также как и результаты моделирования устойчивого развития.

4. Обсуждение

Модель SugarScare является, вероятно, самой известной АВМ моделью и изучена очень хорошо. Тем не менее она является весьма перспективной и обладает большим потенциалом. Сюда относятся разные варианты решения обратной задачи, а также непосредственное применение модели SugarScare к моделированию блокчейн-экономики. Множество агентов, занятых фармингом и обменом концептуально весьма похоже на сообщество инвесторов в DeFi или DeFAI протоколы.

Результаты представленные в разделе 3, а также смежные с ними позволяют сделать вывод о том, что функционирование системы агентов в АВМ модели приводит к макроагрегатам системы в виде стохастических винеровских процессов, что хорошо согласуется с реальными экономиками. Изучение эффектов каузальных зависимостей позволит сделать теоретически и практически полезные выводы о функционировании АВМ моделей, а решение обратных задач по определению внутренних параметров АВМ моделей позволит решать прикладные задачи.

5. Выводы и направления будущих исследований

Эта работа является частью цикла публикаций, которой готовится в рамках диссертационного исследования и основан на решении проблемы валидации АВМ моделей для цифровых экономик. Основой этого подхода является тот или иной вариант решения задачи идентификации параметров агентов. Это даёт возможность доказывать корректность (валидность) моделей и решать смежные задачи, например, изучать траектории развития или давать оценку эффективности политических стимулов в целях устойчивого развития, а также решать другие задачи управления экономическими системами.

Список источников

1. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: Resolution adopted by the General Assembly / United Nations. — 2015.
2. OECD. Digital Economy Outlook 2020 / OECD Publishing. — 2020.
3. Tesfatsion, L. Agent-Based Computational Economics: A Constructive Approach to Economic Theory / L. Tesfatsion // Handbook of Computational Economics. — 2006. — Vol. 2. — P. 831–880.
4. Epstein, J.M. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up / J.M. Epstein, R.L. Axtell. — 1996.
5. Иган, Г. Город перестановок / Г. Иган // Лаборатория фантастики: сайт. — URL: <https://fantlab.ru/work49736> (дата обращения: 07.09.2025).

Сведения об авторе

Симонян Артур Арсенович, аспирант, Государственный академический университет гуманитарных наук, г. Москва, Россия

Information about the author

Simonyan Artur Arsenovich, Postgraduate student, State Academic University of Humanities, Moscow, Russia