

# Системная динамика и агентное моделирование

Тема. Исследовательские проекты

Дисциплина для магистрантов  
специальности «Математика и компьютерные науки»  
профилизации «Компьютерная математика системный анализ»

доц. Лаврова О.А.

механико-математический факультет, БГУ, Минск

2024

# Выполнение проекта I

Необходимо:

1. выбрать тему исследовательского проекта. Над проектом могут работать два человека
2. составить **план работ** по проекту (формулировка *содержательной постановки задачи* в процессе моделирования)
  - формулировка цели моделирования (Для чего Вы создаете имитационную модель? Какую проблему Вы хотите решить?)
  - установление границ системы, определение среды, ограничений
  - описание данных для моделирования. Рекомендовано использовать, по возможности, реальные данные
  - описание поведения системы
  - методы и метрики для анализа результатов экспериментов при моделировании
3. сделать презентацию **плана работ** по проекту **на семинаре в октябре** на 40 минут

# Выполнение проекта II

Необходимо:

1. выбрать тему исследовательского проекта
2. составить план работ по проекту (содержательная постановка задачи)
3. сделать презентацию плана работ по проекту **на семинаре в октябре**
4. сформулировать **имитационную модель** и осуществить компьютерную реализацию имитационной модели в AnyLogic/Mesa/RePast/др. (Начните с простого. Далее постепенно добавляйте нужные детали в имитационную модель и тестируйте ее до тех пор, пока ваша основная цель не будет достигнута)
5. представить реализацию **имитационной модели на семинаре в декабре** в форме презентации на 40 минут

# Основные темы исследовательских проектов

1. Имитационное моделирование потоков:
  - **логистика**, использование ГИС-карт в качестве среды агентной модели
  - транспортный трафик, пешеходное движение
  - планирование аэропортов, вокзалов
2. Имитационное моделирование процессов самоорганизации в социальных системах
3. Имитационное моделирование распространения эпидемий

# Дополнительные темы

- имитационные игры
- моделирование процессов обучения и адаптации
- интеграция имитационного моделирования с технологиями машинного обучения
- статистические методы для анализа данных имитационных экспериментов
- агентное моделирование для задач оптимизации

# Демонстрационные модели в AnyLogic

Более 16000 моделей (сентябрь 2024 г.),  
классифицированы по категориям: например, Healthcare (669 моделей), Transportation and Logistics (592), Supply Chains (341), Artificial Intelligence (63), Social and Eco Dynamics (233), Finance (85) etc.

<https://cloud.anylogic.com/models>

# Логистика

Суть процесса моделирования заключается в **отображении движения** во времени и пространстве **потоков дискретных объектов**, которые аналогичны объектам, наблюдаемым в реальной действительности (транспортные средства, грузы, товары)

На абстрактном уровне такие модели можно изображать в виде **систем массового обслуживания**

Компьютерная реализация основана на парадигмах **дискретно-событийного моделирования** и **агентного моделирования**

# Логистика: материалы

- Демонстрационные примеры AnyLogic
- Модель цепочки поставок, презентация «Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic», слайды 323—383, AnyLogic
- В.Н. Михайлов. Имитационное моделирование: Учебно-методическое пособие. 2016. Лабораторная работа 3. Комбинированное моделирование, стр. 129—161.
- Толуев, Ю.И. Моделирование и симуляция логистических систем / Ю.И. Толуев, С.И. Планковский / Курс лекций для высших технических учебных заведений. – Киев: «Миллениум», 2009.
- Рожков, М.И. Разработка имитационных моделей управления запасами в цепях поставок / М.И. Рожков – Москва, 2011.
- Боев, В.Д. Работа с ГИС картами в AnyLogic 7.1
- Multimethod simulation modeling for business applications, white paper, AnyLogic
- Venables M. Bilge U. Complex adaptive modelling at J Sainsbury: the SimStore supermarket supply chain experiment
- Дипломная работа Клевец Татьяны (КМиСА, 5 курс, 2015), Коляда Марии (КМиСА, 5 курс, 2017, реализация на реальных данных торговых сетей ASDA (Великобритания) и Евроопт (Беларусь), реализация в AnyLogic, сбор геоданных на Питоне)

# Имитационное моделирование потоков: материалы

- Пешеходное моделирование, презентация «Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic», слайды 413—442, AnyLogic
- Модель аэропорта, презентация «Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic», слайды 443—503, AnyLogic
- Справка AnyLogic/Учебные пособия/Модель перекрестка (библиотека дорожного движения)
- Справка AnyLogic/Учебные пособия/Модель павильона метро (пешеходная библиотека)

# Самоорганизация социальных систем: материалы

Emergent structure: model of convergence and differentiation

Emergent order: models of collective action, trust and cooperation

M. W. Macy, R. Willer, From Factors to Actors:  
Computational Sociology and Agent-Based Modeling, 2001

## Кластеризация социальных групп

Пространственная:

- T. Schelling, *Micromotives and Macrobehavior*, 1978 – модель Шеллинга, миграция на основании критерия комфортности
- Модель стоячих аплодисментов – выбор из двух вариантов на основании выбора других людей
- Курсовая и дипломная работы, Ананич Анастасия (КМиСА, 3 курс, 2019, 4 курс, 2020)

На основании мнений участников:

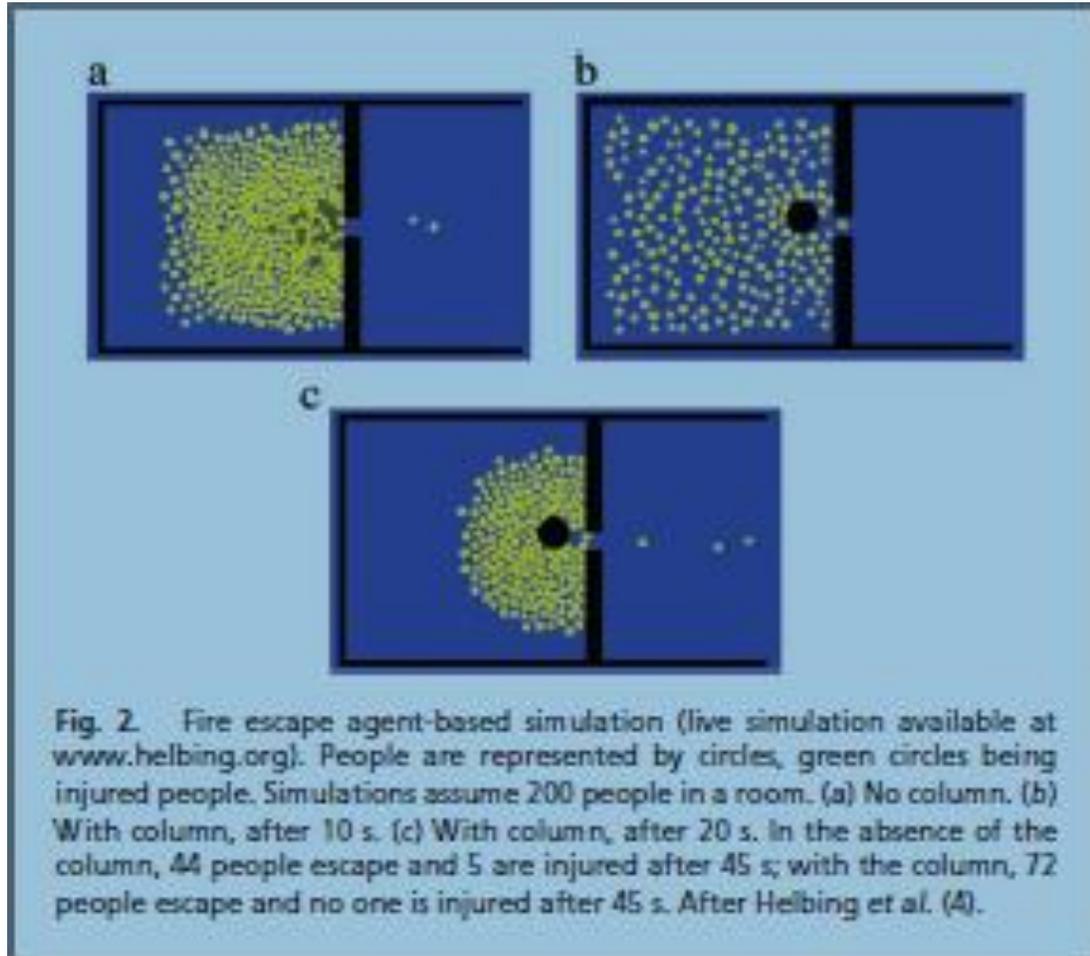
- Prisoner's Dilemma, Axelrod (1987) – формирование групп, использование генетических алгоритмов
- Maes M., Flache A., Helbing D. (2010) Individualization as Driving Force of Clustering Phenomena in Humans. *PLoS Comput Biol* 6(10)

На основании степени удачливости:

- Модель The Wealth Gap – влияние случайности на неравномерное распределение доходов

<https://www.wealthgapsimulation.com/sales-page1608229852018>

# Пример самоорганизации: поведение толпы в экстремальных условиях



- Рисунок из статьи E. Bonabeau, Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems, 2002 об исследовании в работе D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, 2000
- Даже если в помещении предусмотрено несколько аварийных выходов, то люди будут неравномерно эвакуироваться. Согласно результатам агентного моделирования в случае подобных ситуаций выгодно кооперироваться в малые группы, поскольку это повышает шансы на спасение.

# Поведение толпы: материалы

- *Helbing D., Molnar P. (1995) Social force model* for pedestrian dynamics. Phys. Rev. E 51
- Crowd simulation in airports using games technologies (Szymanczyk, Dickinson, Duckett 2011)
- Die Simulation menschlichen Panikverhaltens, ein Agentbasierter Ansatz (Schneider 2011)
- Pan X, Han CS, Dauber K and Law KH (2007). A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. AI Soc 22(2): 113–132.
- Understanding Crowds Behaviors: Guidance and Lessons Identified. The Cabinet Office Emergency Planning Colledge, 2009.
- *Helbing D., Viscek T., Farkas I. Simulating dynamical features of escape panic // Nature, 2000.*
- Mahmood I., Haris M., Sarjoughian H. Analyzing Emergency Evacuation Strategies for Mass Gathering using Crowd Simulation and Analysis framework: Hajj Scenario, 2017
- Магистерская работа «Агентное моделирование социальных взаимодействий в толпе», Пашкевич Ангелина (КМиСА, 2022)

# Распространение эпидемий: материалы

- Презентация «Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic», слайды 271—308, AnyLogic
- К.К. Авилов, О.Ю. Соловей. Агентные модели: анализ подходов и возможности приложения к эпидемиологии, *Математическая биология и биоинформатика*. 2012. С. 425—443.
- Р. Андерсон, Р. Мэй. Инфекционные болезни человека. Динамика и контроль. 2004.
- J.B. Dunham. An Agent-Based Spatially Explicit Epidemiological Model in MASON // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 2005.
- J.D. Sterman. System dynamics at sixty: the path forward // *Syst. Dyn. Rev.*, 2018. ссылки на стр. 19
- Курсовая работа «Агентное моделирование распространения эпидемий с учетом передвижения агентов», Комок Екатерина (КМиСА, 3 курс, 2020)

# Имитационные игры I

- Имитационные игры – это имитационные модели систем, которые позволяют участникам имитационного эксперимента получить определенное понимание взаимосвязей элементов системы, протестировать различные решения, оценить долгосрочные последствия принятия решений, оценить вероятные побочные эффекты. **Имитационные игры обучают основам принятия решений в определенных управленческих ситуациях без последствий для реального бизнеса.**
- Имитационные игры позволяют учиться на собственном опыте (“**обучение действием**”): пробовать разные сценарии, анализировать результаты, оттачивать навыки управления. Имитационные игры позволяют на практике применить полученные знания в виртуальной ситуации имитационной игры.
- В основе каждой имитационной игры обычно лежит системно-динамическая модель.

*Каталевский, 2015*

# Имитационные игры II

- Известные разработанные имитационные игры
  - **Fish Bank**, Д. Медоуз, иллюстрация системного архетипа трагедии общности; **Рыболовство**, Д.Н. Кавтарадзе
  - **Stratagem/Стратагема**, модель развития государства на протяжении 50 лет; Перспектива, М.М. Крюков
  - **Beer Game**, логистика
  - **LoFare Simulator**, К. Уоррен, симулятор по управлению авиакомпанией
  - **Beefeater**, К. Уоррен, симулятор по управлению сетью ресторанов
  - **Professional Services Microworld**, К. Уоррен, симулятор по управлению консалтинговой компанией
  - **Econet ABC**
  - **CoMPAS**, экологическая имитационная игра
  - **Equilibrium** game: a virtual field trip through a complex system. Syst. Dyn. Rev. (2020)

# Имитационные игры: видео

Онлайн-семинар по разработке и применению бизнес-симуляций в Высшей школе бизнеса ВШЭ в мае 2021 года

<https://www.anylogic.ru/blog/video-seminara-modelirovanie-dlya-logistiki-obucheniya-studentov-i-menedzherov/>

- Д. Каталевский (РАНХиГС), «Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении», деловая игра управления стартапом
- А. Лазарев (Mania Business Simulations), «Опыт разработки и применения компьютерных бизнес-симуляций», симуляторы в сфере розничной торговли
- Пашкевич А. (SimulationX), «Имитационная модель, как тренажер для повышения управленческого опыта предпринимателей», симуляторы управления интернет-магазином, гипермаркетом, колл-центром

# Адаптация

- Адаптацию можно определить как **модификацию структуры** модели с целью более эффективного действия в окружающей среде

*J. Holland. Adaptation in natural and artificial systems, 1975*

- Агенты адаптируются за счет передвижения, имитации, воспроизводства, обучения, без вычисления наиболее эффективного действия.
- В системно-динамическом моделировании структура модели определена изначально и не может быть изменена в ходе имитационного эксперимента, так как структура модели фиксирована. Системно-динамические модели тем не менее могут адаптироваться, если под адаптацией понимать не изменение структуры модели, а **изменение доминирования петель обратной связи.**

*Каталевский, 2015*

# Обучение

- Обучение осуществляется на уровне агентов и на уровне популяции
- **Individual learning** alters the probability distribution of rules competing for attention, through processes like reinforcement, Bayesian updating, or the back-propagation of error in artificial neural networks. **Population learning** alters the frequency distribution of agents competing for reproduction through processes of selection, imitation, and social influence.

*M.W. Macy, R. Willer, 2001*

- Brenner T., Agent learning representation: advice on modelling economic learning, 2006.
  - Models for non-conscious learning, for routine-based learning, for belief learning
- Duffy J., Agent-based models and human subject experiments, 2006.
  - Reinforcement learning, belief-based learning, evolutionary algorithms

# Обучение: материалы I

- Академический пример агентной модели с элементами адаптивности на основе обучения SugarScape (*J.M. Epstein, R. Axtell. Growing artificial societies, 1996*)
  - D. Brearcliffe, A. Crooks, *Creating Intelligent Agents: Combining Agent-Based Modeling with Machine Learning, 2020*
  - Курсовая работа, Ключник Карина (КМиСА, 3 курс, 2021). Двухвидовое соперничество за ресурс. Применение алгоритма Q-learning при принятии решения агентами одного вида
- Замятина, Е.Б., *Архитектура агентно-ориентированной системы имитации с агентами, основанными на нейронных сетях / Е.Б. Замятина, Д.Ф. Каримов, А.А. Митраков. // Информация и связь – Пермь: ПГНИУ, 2014.*

# Обучение: материалы II

Алфимцев А.Н., Мультиагентное обучение с подкреплением, 2021

**Алфимцев, А. Н.**  
А53 Мультиагентное обучение с подкреплением : учебное пособие /  
А. Н. Алфимцев. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
2021. — 222, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5616-1

Рассмотрены современные и классические алгоритмы одновременного машинного обучения множества агентов, основанные на теории игр, табличных, нейросетевых, эволюционных и роевых технологиях. Представлено последовательное развитие теоретической модели алгоритмов, базирующееся на марковских процессах принятия решений. Реализация алгоритмов выполнена на языке программирования Python с использованием библиотеки глубокого обучения PyTorch. Средой машинного обучения является компьютерная игра StarCraft II с интерфейсом кооперативного мультиагентного обучения SMAC.

Для магистрантов и аспирантов направления подготовки «Информатика и вычислительная техника».

# Обучение: материалы III

Алфимцев А.Н., Мультиагентное обучение с подкреплением, 2021

Рассмотрены различные виды обучений:

- Табличное Q-обучение
- Обучение с использованием теории игр
- Обучение на основе нейронных сетей
- Эволюционное обучение
- Кооперативное «роевое» обучение

# Интеграция имитационного моделирования с технологиями машинного обучения I

Имитационное моделирование как технология для искусственного интеллекта может использоваться по-разному

- Генерация данных на основе имитационной модели для дальнейшего машинного обучения
- **Имитационная модель как среда для обучения**
- Имитационная модель как среда для тестирования алгоритмов машинного обучения

# Интеграция имитационного моделирования с технологиями машинного обучения II

Имитационная модель перекрестка со светофорами как виртуальная среда для обучения с подкреплением. Реализация модели в AnyLogic с применением библиотеки DL4J и библиотеки дорожного движения Road Traffic Library

- Базовая модель - <https://www.anylogic.ru/blog/mashinnoe-obuchenie-i-imitatsionnaya-model-primer/>
- AnyLogic RL - <https://www.youtube.com/watch?v=gfzcLID4NkA&feature=youtu.be>
- Работа системы - [https://www.youtube.com/watch?v=lgqwXM8CepQ&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=lgqwXM8CepQ&feature=emb_logo)
- DL4J – FAQ - <https://gitter.im/eclipse/deeplearning4j>
- Implementation Download - <https://www.anylogic.ru/upload/models/traffic-light-example-rl-model.zip>
- Курсовая работа, Таборов Лев (КМиСА, 2 курс, 2021). Нейронная сеть, обученная на данных о состояниях системы в различные моменты времени, используется в дальнейшем для управления длительностями фаз светофоров в модели. Обучение с помощью облачного сервиса Pathmind

# Интересные статьи

- [Всемирный экономический форум в Давосе: решение глобальных проблем с помощью имитационного моделирования 2023](#)
- [A framework proposal for machine learning-driven \*\*agent-based models\*\* through a case study analysis 2023](#)
- [A framework for the comparison of errors in agent-based models using machine learning 2023](#)
- [Generative agent-based modeling: an introduction and tutorial 2024](#)