

Системная динамика и агентное моделирование

Тема. Введение в имитационное моделирование

Дисциплина для магистрантов
специальность «Математика и компьютерные науки»
профилизация «Компьютерная математика системный анализ»

доц. Лаврова О.А.
механико-математический факультет, БГУ, Минск

2025

Структура учебной дисциплины

Магистранты очного отделения:

- **Лекции** – каждую неделю
- **Лабораторные занятия + Управляемые самостоятельные работы (УСР)** – одно занятие в две недели
- **Семинарские занятия** – одно занятие в две недели

Магистранты заочного отделения:

4 Лекции, 2 Семинара, 2 Лабораторных занятия

Средства текущего контроля:

- **ЛБ (всего 2)**
 - необходимо сделать отчет с устной защитой на лабораторных занятиях или на семинаре или на экзамене
- **Исследовательский проект**
 - необходимо выступить с докладами на семинарских занятиях в октябре (постановка задачи) и декабре (реализация)

Форма промежуточной аттестации: Экзамен

Расписание занятий: ауд. 408 очно и дистанционно

Модель и моделирование

Модель – материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе исследования замещает объект-оригинал (система, процесс, явление), сохраняя *некоторые* свойства/характеристики объекта оригинала, важные для данного исследования. Модель является *приближенным представлением* объекта-оригинала.

“... all models are wrong, but some are useful”

Box, 1979, Box and Draper, 1987

Моделирование (modeling) – это процесс построения модели и проведения исследований на модели с целью *изучить* некоторые свойства объекта-оригинала.

Объект-оригинал в дальнейшем будем называть **объектом моделирования**.

Объект моделирования

Объект моделирования рассматривается как **система** (совокупность взаимосвязанных элементов, выделенных из среды и взаимодействующих с окружающей средой как целое для достижения поставленной цели).

В имитационной модели учитываются свойства и поведение отдельных элементов системы, взаимосвязи между элементами, взаимодействие элементов с окружающей средой.

Имитационная модель I

Имитационная модель является *выполняемой* моделью в виде **компьютерной программы**. Вы *выполняете* имитационную модель и она строит изменения состояний объекта моделирования во времени, позволяя воспроизводить процессы функционирования объекта моделирования в разных условиях.

Имитационная модель II

Имитационную модель можно рассматривать как инструмент преобразования входных параметров в выходные параметры объекта моделирования. Преобразование осуществляется с помощью алгоритма, который можно интерпретировать как функцию, явный вид которой неизвестен.

Даже если бы функция и была известна, то оказалась бы очень сложной, поскольку нам все же приходится выполнять алгоритм, а не просто подставлять числа в некую формулу.

А.М. Лоу, В.Д. Кельтон, 2004

Имитационная модель III

Выполнение имитационной модели (simulation) называется также прогоном, экспериментом, имитацией.

Simulation means driving a model of a system with suitable inputs and observing the corresponding outputs

Bratley, Fox, Schrange, 1987

Имитационные модели не способны формировать свое собственное решение в том виде, в каком это имеет место в математических моделях с аналитическим решением. Для получения необходимой информации или результатов необходимо выполнять имитационные модели, а не решать модели.

Шеннон, 1975

Имитационное моделирование I

Имитационное моделирование (simulation modeling) – это процесс построения имитационной модели реальной системы и постановки экспериментов на этой модели с целью

либо понять поведение объекта моделирования,

либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данного объекта моделирования.

Шеннон, 1975

Имитационное моделирование II

Имитационное моделирование – это не теория, а *методология решения проблем*. Имитационное моделирование является только одним из нескольких имеющихся в распоряжении системного аналитика методов решения проблем.

Шеннон, 1975

Целесообразность ИМ

- Дорого или невозможно экспериментировать с объектом моделирования
- Не разработаны математических моделей для объекта моделирования (например, социальные системы, экономические системы)
- Не разработаны методы решения математической модели
- Методы решения математической модели сложны и трудоемки
- Необходимо симитировать поведение объекта моделирования во времени
- Имитационное моделирование можно использовать для создания деловых игр. Имитационные игры помогают обучать принятию решений в безопасной среде, оттачивают навыки управления

Парадигмы имитационного моделирования I

В имитационном моделировании к настоящему моменту сложились три самостоятельные парадигмы:

системная динамика (system dynamics),

дискретно-событийное моделирование (discrete event modeling),

агентное моделирование (agent based modeling)

Имитационное моделирование, основанное на численном решении математических моделей, не рассматривается в рамках дисциплины

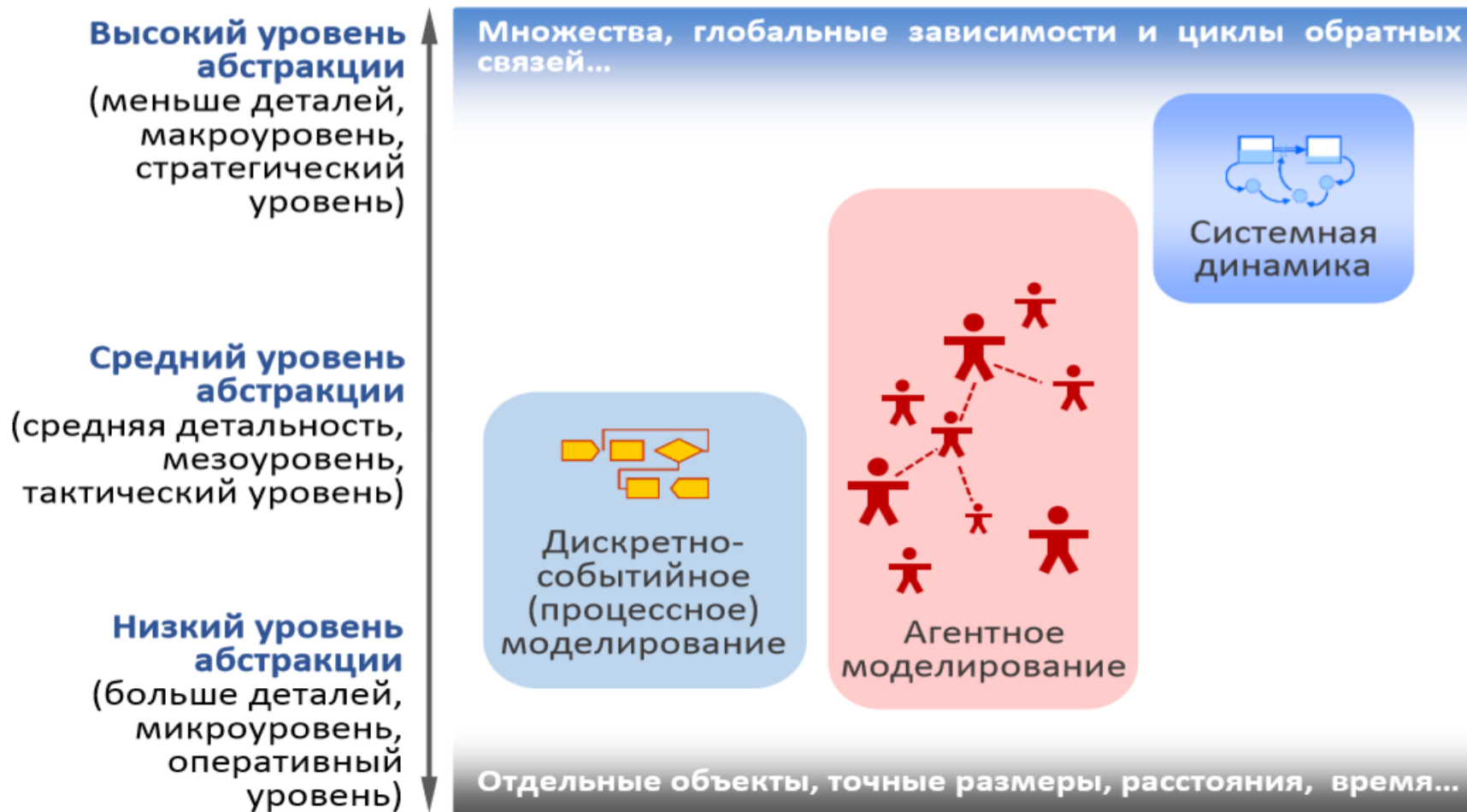
Парадигмы имитационного моделирования II

Парадигмы соответствуют разным уровням абстракции при создании имитационной модели:

- высокий (стратегический)
- средний (тактический)
- низкий (оперативный)

Это обуславливает применение того или иного подхода при исследовании систем.

Парадигмы имитационного моделирования III



В моделях оперируют количествами объектов и агрегированными показателями. Моделируются проблемы управления с организации, рыночного равновесия, социально-экономического развития городов, экологические процессы

Физическое перемещение не анализируется. Потоки вместо индивидуальных свойств объектов моделирования

The AnyLogic Company, 2016

Парадигмы имитационного моделирования IV

Главный постулат **системной динамики** «Структура системы определяет поведение».



Моделирование в системной динамике является моделированием «сверху вниз»: от структуры системы к ее поведению

В **агентном моделировании** правила поведения многих независимых агентов формируют поведение системы.



Агентное моделирование является моделированием «снизу вверх»: от поведения агентов к поведению системы

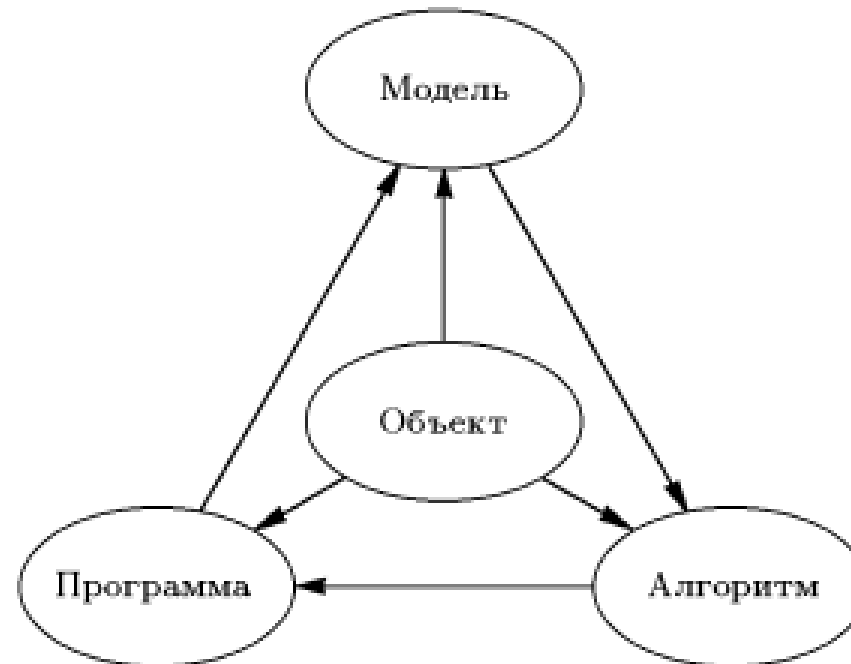
Процесс моделирования (simulation lifecycle)

1. **Содержательная постановка задачи** (описание исследуемой системы) – формулировка цели моделирования; формулировка вопросов о поведении системы, интересующие заказчика; установление границ системы, определение среды, ограничений, критериев эффективности системы.
2. **Концептуальная постановка задачи** – формулировка имитационной модели (в рамках курса рассматриваются системно-динамические модели и агентные модели)
3. **Реализация имитационной модели** (в рамках курса рекомендовано использовать AnyLogic)
4. **Верификация и валидация.** Верификация -- проверка реализации: правильно ли имитационная модель преобразована в компьютерную программу. Валидация – проверка, является ли имитационная модель адекватным представлением объекта моделирования для конкретных целей исследования.
5. **Экспериментирование и интерпретация.** Анализ выходных данных. Анализ чувствительности, оценка рисков, оптимизация. Интерпретация – построение выводов по результатам экспериментирования

Этапы тесно связаны между собой. **Процесс моделирования нужно реализовывать итерационно**

Графическое представление процесса моделирования

Триада «модель-алгоритм-программа»



Самарский, 1997

Сложности имитационного моделирования

- Разработка имитационных моделей является затратной по времени, особенно для разработки начальной модели. Нужны специалисты для разработки имитационных моделей
- Сложно проверить соответствие модели реальной системе (validation)
- Сложно оценивать точность вычислений
- Экспериментирование с имитационной моделью является затратным по времени и памяти
- Сложности с интерпретацией результатов
- Результаты имитационного моделирования редко обобщаются на классы систем/задач, в отличие от математического моделирования

Система имитационного моделирования AnyLogic

Продукт российской компании The AnyLogic Company (бывшая *XJ Technologies*), разработан на основе исследований в Санкт-Петербургском политехническом университете. Первый выпуск в 2000 году. AnyLogic написан на Java, поддерживает ОС Windows, Mac OS, Linux. В AnyLogic базовым языком, совмещенным с **GUI-средой** разработки моделей, является **Java**. Разработчик не пишет полный код, а программирует фрагменты кода в специально предусмотренных местах.

<https://www.anylogic.ru/>



AnyLogic поддерживает большинство этапов имитационного моделирования на основе различных парадигм имитационного моделирования: системная динамика, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование

AnyLogic позволяет интеграцию парадигм (многоподходное моделирование, многоподходные архитектуры моделей)

Визуальное проектирование

Визуальное проектирование является основной парадигмой при разработке имитационных моделей в AnyLogic.

Вся динамика модели должна быть вынесена в визуальные формы описания, а код на Java должен быть оставлен для вычислений, не имеющих временной семантики

А. Борщев, 2013

What is AnyLogic Simulation Software?

<https://www.youtube.com/watch?v=9e0F4VtgoaQ>

Объектно-ориентированный подход

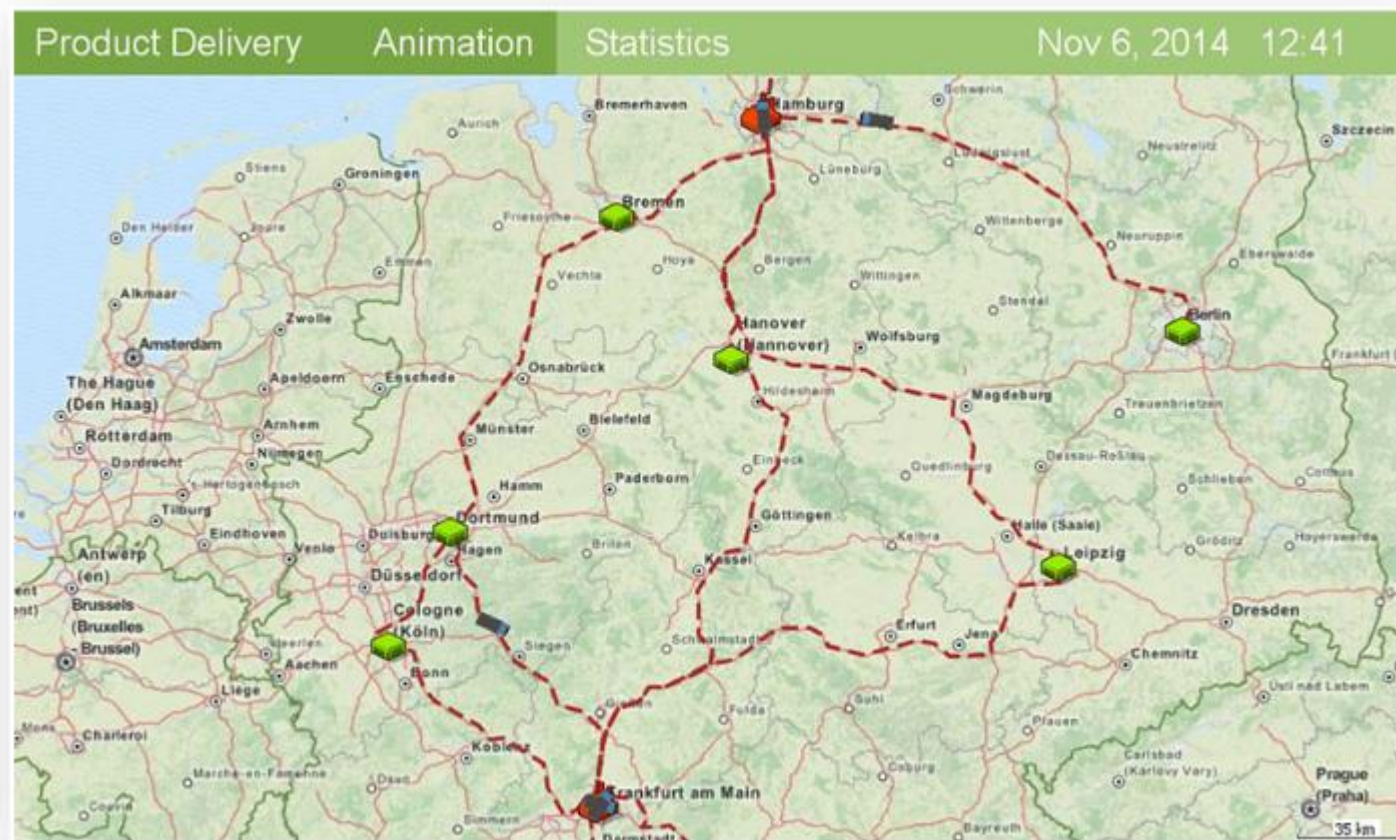
AnyLogic основан на **объектно-ориентированном подходе** к структурному представлению систем, элементах стандарта UML, элементах языка программирования Java.

см. Основы Java для AnyLogic, презентация «Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic», слайды 309—322, AnyLogic

Возможность создания Java-апплетов и Java-приложений.

Поддержка ГИС

- ГИС используются для описания среды в агентных моделях



Библиотеки для описания предметных областей

- **Material Handling Library (библиотека производственных систем)** моделирование материальных потоков на предприятии
- **Rail Library (железнодорожная библиотека)** моделирование транспортных систем
- **Pedestrian Library (пешеходная библиотека)** моделирование пешеходных потоков (метро, стадион, музей и др.)
- **Road Traffic Library (библиотека дорожного движения)** моделирование транспортных потоков с учетом индивидуального поведения каждого водителя
- **Fluid Library (библиотека моделирования потоков)** моделирование процессов перевозки и хранения сыпучих материалов, жидкостей и газа
- **Process Modeling Library (библиотека моделирования процессов)** моделирование бизнес-процессов, которые можно представить в виде последовательности операций

<https://www.anylogic.ru/features/libraries/road-traffic-library/>

Облачные вычисления

- **AnyLogic Cloud** – веб-сервис для разработки и экспериментирования с имитационными моделями
- Имитационные эксперименты с несколькими прогонами выполняются быстрее и эффективнее

<https://www.anylogic.ru/features/cloud/>

Интеграция с платформами для ИИ, МО

- Платформа Bonsai от Microsoft
- Платформа H2O.ai
- Платформа Pathmind
- и др.

<https://www.anylogic.ru/features/artificial-intelligence/>