

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

2022

Структура курса

Магистранты очного отделения:

- **Лекции** – каждую неделю
- **Семинары** – одно занятие в две недели
- **Управляемая самостоятельная работа (УСР)** дистанционно – одно занятие в две недели

Магистранты заочного отделения:

Лекции, Семинары, Лабораторные работы – одно занятие в две недели

Формы контроля:

- 2 или 3 **самостоятельные работы**, необходимо защитить на занятии
- **Исследовательский проект**, два выступления с презентацией на семинаре в октябре и декабре
- В конце семестра **зачет**

Расписание: вторник 17:30 дистанционное занятие, **пятница 17:00**, ауд. 329

Модель и моделирование

Модель – материальный или мысленно представляемый объект, который в процессе исследования замещает объект-оригинал (система, процесс, явление), сохраняя некоторые его свойства, важные для данного исследования

Трусов, 2005

Модель является приближенным представлением объекта-оригинала

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

Box, 1979, Box and Draper, 1987

Моделирование – это процесс построения модели и проведения исследований на модели с целью изучить некоторые свойства объекта моделирования

Имитационная модель I

Объект моделирования рассматривается как **система** (совокупность взаимосвязанных элементов, выделенных из среды и взаимодействующих с окружающей средой как целое для достижения поставленной цели). В модели учитываются свойства и поведение отдельных элементов системы, взаимосвязи между элементами, взаимодействие с окружающей средой.

Имитационная модель II

Имитационная модель всегда является **выполняемой моделью в виде компьютерной программы**: вы запускаете ее и она строит изменения состояний системы во времени, позволяя воспроизводить процессы функционирования системы в разных условиях

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

Bratley, Fox, Schrange, 1987

Преимуществом имитационных моделей является поддерживаемая ими визуализация того, как системы будет изменяться во времени при заданных параметрах.

Имитационное моделирование и эксперимент

Имитационное моделирование – это процесс построения имитационной модели реальной системы и **постановки экспериментов** на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить (в рамках ограничений, накладываемых критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы.

Имитационное моделирование – это **экспериментирование** с имитационной моделью реальной системы

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 осуществлять «прогоны» имитационных моделей (**эксперимент**, имитацию), а не решать модели.

Шеннон, 1975

Имитационное моделирование I

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

Имитационное моделирование II

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

Шеннон, 1975

Цели имитационного моделирования I

Имитационное моделирование осуществляется с целью либо **понять** поведение системы, либо **оценить** (в рамках ограничений, накладываемых критерием или совокупностью критериев) различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы.

Шеннон, 1975

...models can be generally used for **exploratory aims** rather than for a quantitative description...

Bellomo, Brezzi, Pulvirenti, 2017

В основе **предписывающей аналитики** может лежать имитационная модель.

Цели имитационного моделирования II

Имитационная модель, как правило, создается для ответа на вопросы «что, если» (**прогноз**), т.е. для исследования сценариев развития системы при вариации определенных параметров

Шеннон, 1975

Имитационное моделирование используется в **прогнозной (предиктивной) аналитике**, в частности, для генерации синтетических данных для машинных алгоритмов из-за нехватки исторических данных или невозможности провести эксперименты в реальной жизни

Целесообразность ИМ

- Не существует математических моделей исследуемого объекта (например, социальные системы, экономические системы)
- Аналитические методы решения математической модели сложны и трудоемки или аналитических методов не существует
- Имитационное моделирование можно использовать для создания деловых игр. Имитационные игры помогают обучать принятию решений в безопасной среде, оттачивают навыки управления

Терминология на английском языке

Modeling – построение и использование модели для объекта-оригинала в самом широком смысле понимания

Simulation modeling – имитационное моделирование

Simulation – имитация, прогон имитационной модели

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

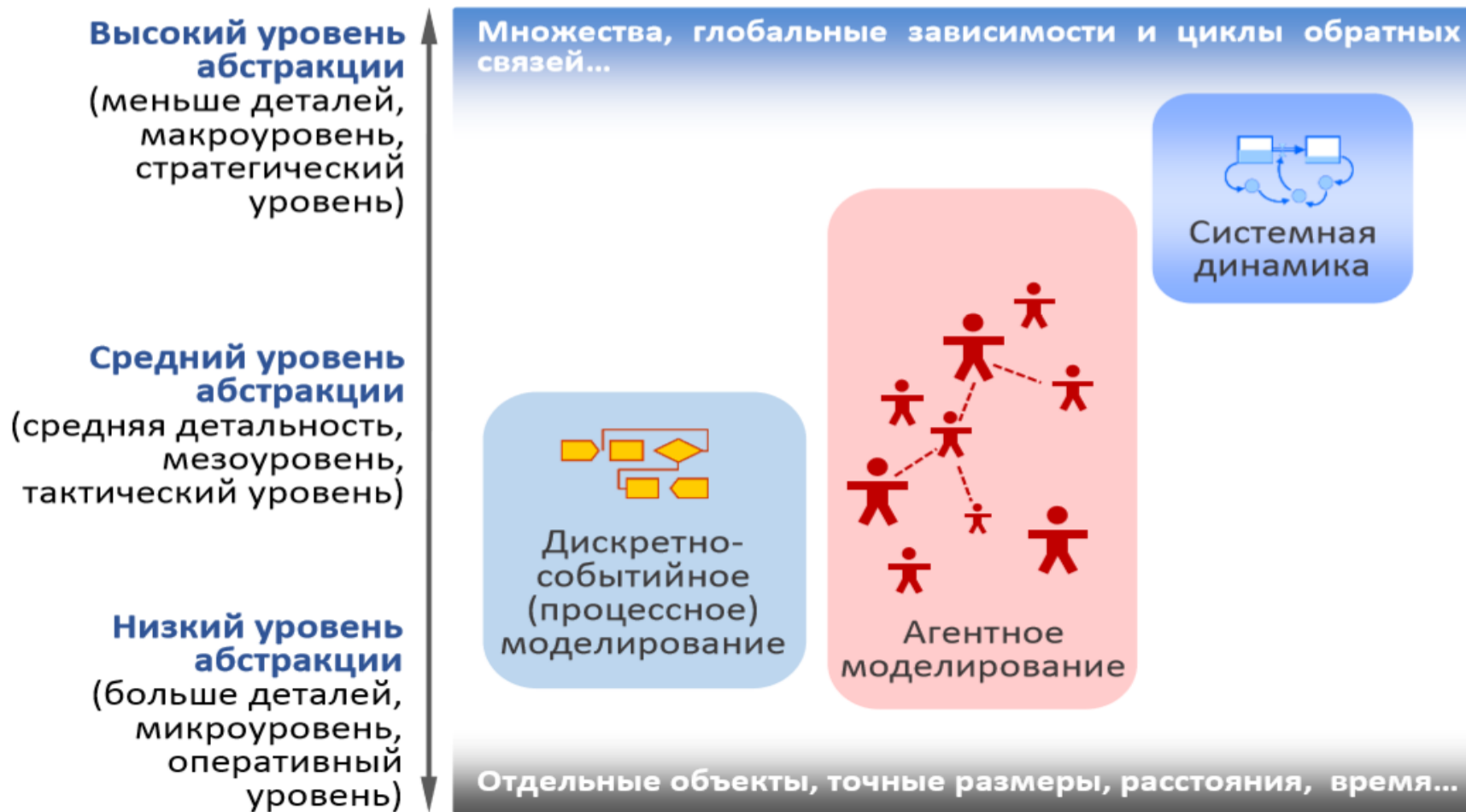
Парадигмы имитационного моделирования I

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



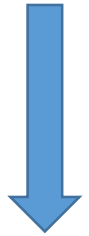
В моделях оперируют количествами объектов и агрегированными показателями. Моделируются проблемы управления с организации, рыночного равновесия, социально-экономического развития городов, экологические процессы

Физическое перемещение не анализируется. Потоки вместо индивидуальных свойств объектов моделирования

The AnyLogic Company, 2016

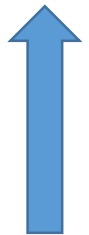
Парадигмы имитационного моделирования IV

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



Моделирование в системной динамике является моделированием «сверху вниз».

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



Агентное моделирование является моделированием «снизу вверх».

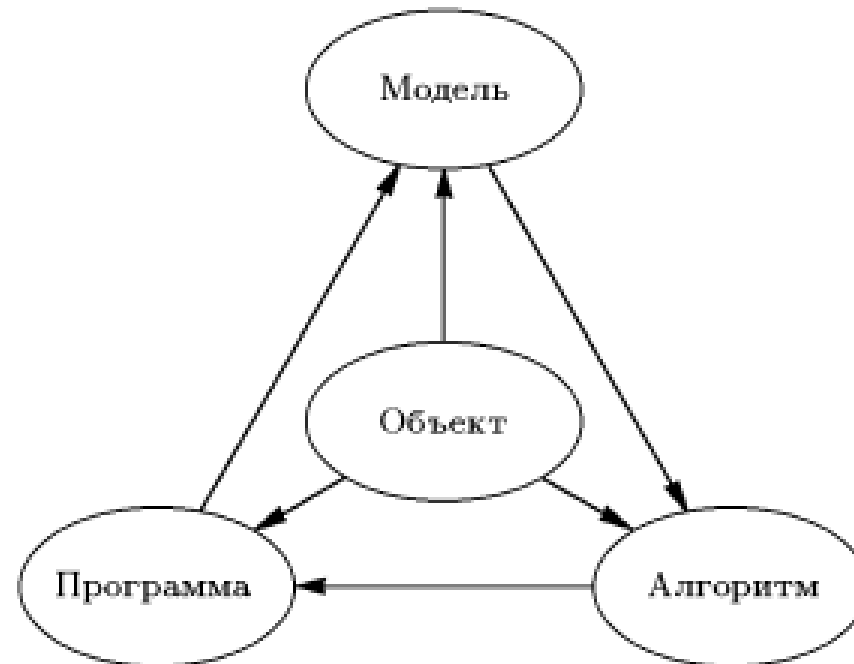
Процесс моделирования (simulation lifecycle)

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. **Компьютерная реализация модели** (в рамках курса рекомендовано использовать AnyLogic)
4. **Валидация и верификация.** Валидация – проверка, является ли имитационная модель адекватным представлением объекта моделирования для конкретных целей исследования. Верификация -- проверка реализации: правильно ли имитационная модель преобразована в компьютерную программу
5. **Экспериментирование и интерпретация.** Анализ выходных данных. Анализ чувствительности, оценка рисков, оптимизация. Интерпретация – построение выводов по результатам экспериментирования

Процесс моделирования является итерационным

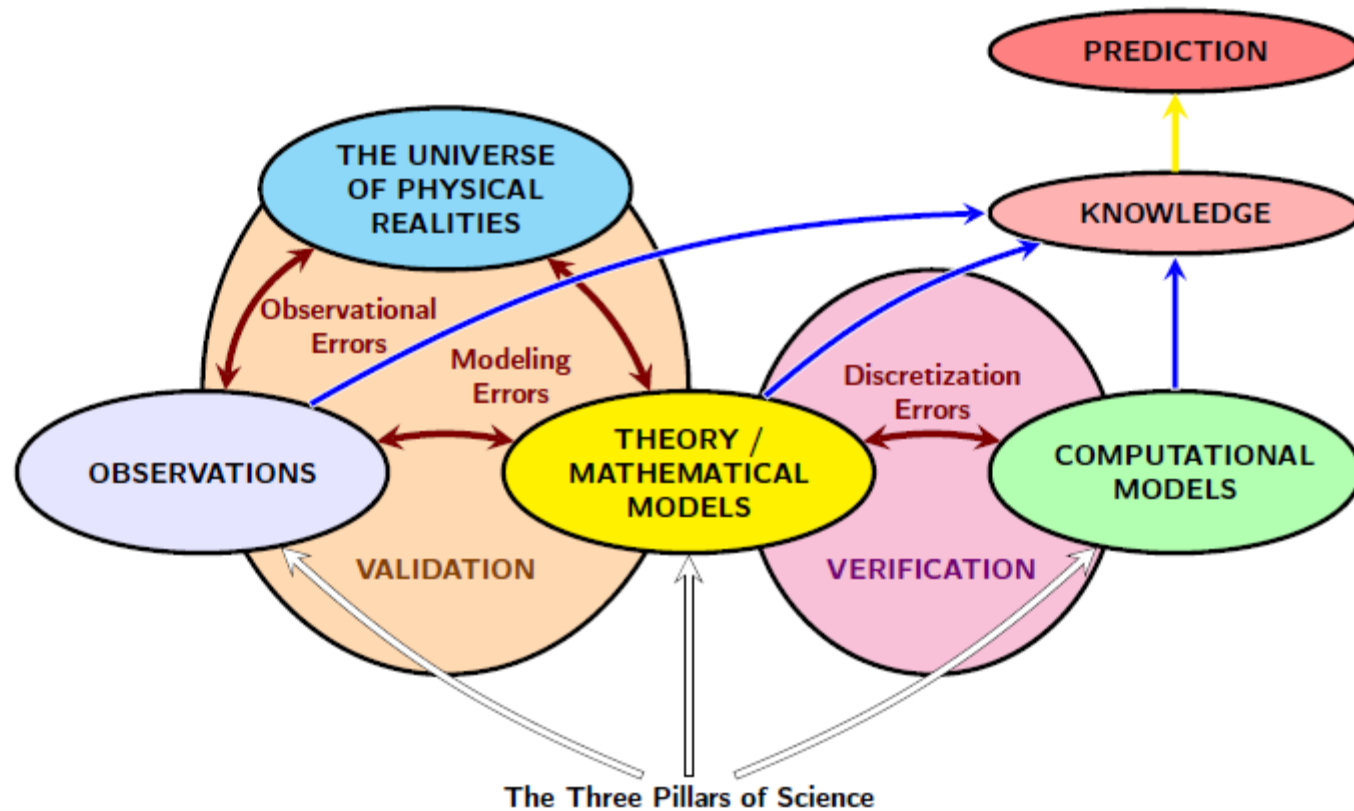
Графическая модель процесса моделирования I

Триада «модель-алгоритм-программа»



Самарский, 1997

Графическая модель процесса моделирования II



Oden et al., 2010

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 имитационное моделирования редко обобщаются на классы систем/задач, в отличие от математического моделирования

Этап 4. Валидация и верификация I

Валидация – это проверка, является ли имитационная модель (не компьютерная программа) адекватным представлением объекта моделирования для конкретных целей исследования

Имитационная модель всегда должна разрабатываться для определенного множества целей. В действительности модель, которая является адекватной для одной цели, может не быть таковой для другой.

Если результаты моделирования согласуются с поведением системы, считается, что модели свойственна внешняя адекватность.

Способ валидации: использование результатов моделирования подобных имитационных моделей, разработанных ранее

Пример валидации: сравнения результатов агентной модели с аналитическим решением: H. Rahandad, J. Sterman, Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential equation Models, 2008

Способ валидации: анимация может весьма эффективно помочь выявить в модели ложные допущения или повысить ее достоверность.

А.М. Лоу, В.Д. Кельтон, 2004

Этап 4. Валидация и верификация II

Верификация -- проверка реализации: правильно ли имитационная модель преобразована в компьютерную программу

Способ верификации: Прогон имитационной модели по возможности должен быть выполнен при упрощающих допущениях, для которых известны или могут быть легко вычислены истинные характеристики модели

Этап 5. Экспериментирование и интерпретация I

Для того чтобы достичь каких-нибудь значимых результатов при имитационном моделировании, нужно использовать **статистические методы** для разработки и анализа моделирующих экспериментов.

Выходные процессы практически всех реальных систем и имитационных моделей являются нестационарными и автокоррелированными, поэтому ни один из **критериев классической статистики**, основанных на независимых и одинаково распределенных наблюдениях (t-критерий, критерий Манна-Уитни, двусторонний критерий «хи-квадрат», двусторонний критерий Колмогорова-Смирнова и т.д.), **невозможно применить** к ним непосредственно.

А.М. Лоу, В.Д. Кельтон, 2004

Этап 5. Экспериментирование и интерпретация II

метод коррелированной проверки (нужны исчерпывающие системные входные и выходные данные за прошедшее время),
метод доверительного интервала, основанный на независимых данных (нужен большой объем данных по системе и модели),
методы временного ряда, например, спектральный анализ

см. Лоу, Кельтон, раздел 5.6 и главу 9, 2004

Этап 5. Экспериментирование и интерпретация III

Одна из задач моделирования: определить, как изменения входных параметров влияют на выходные результаты. Градиент функции ожидаемого отклика по входным параметрам показывает **чувствительность отклика** к незначительным изменениям входных параметров.

см. Лоу, Кельтон, раздел 12.5. Чувствительность и оценка градиента, 2004

Одним из результатов анализа имитационной модели может быть поиск комбинации входных параметров, оптимизирующих основной выходной показатель системы

см. Лоу, Кельтон, раздел 12.6. Поиск оптимума, 2004

AnyLogic: система имитационного моделирования

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

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)

AnyLogic: визуальное проектирование

Визуальное проектирование является основной парадигмой при разработке имитационных моделей.

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

А. Борщев, 2013

AnyLogic: объектно-ориентированный подход

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

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

AnyLogic: библиотеки

- **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 и анализа поведения толпы
- **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

AnyLogic: поддержка ГИС

AnyLogic: облачные вычисления

- **AnyLogic Cloud** – веб-платформа для запуска имитационных моделей
- Многопрогонные эксперименты выполняются быстрее и эффективнее

AnyLogic: интеграция с платформами для машинного обучения

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