

Системная динамика и агентное моделирование

Тема. Введение в имитационное моделирование

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

Лаврова О.А.

механико-математический факультет, БГУ, Минск

2021

Структура курса

Студенты очного отделения

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

Студенты заочного отделения

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

Формы контроля

- 2 самостоятельные работы, необходимо защитить на занятии
- Исследовательский проект, два выступления на семинаре в октябре и декабре

В конце семестра **зачет**

Расписание: **четверг 19:00** дистанционное занятие, **пятница 19:00**, ауд. 329

Модель и моделирование

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

Трусов, 2005

При построении модели происходит следующая идеализация: некоторые факты, известные лишь с некоторой долей вероятности или лишь с некоторой точностью признаются «абсолютно» верными

Арнольд

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

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

Box, 1979, Box and Draper, 1987

Имитационная модель

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, взаимосвязи между ними, взаимодействие с окружающей средой.

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

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

Имитационное моделирование и эксперимент

Имитационное моделирование есть процесс построения 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 – **экспериментирование** с моделью реальной системы

Имитационные модели не способны формировать свое собственное решение в том виде, в каком это имеет место в аналитических моделях. Для получения необходимой информации или результатов необходимо осуществлять «прогон» имитационных моделей (**эксперимент**, имитацию), а не «решать» их.

Шеннон, 1975

Имитационное моделирование

Имитационную модель можно рассматривать как механизм преобразования входных параметров в выходные параметры объекта моделирования. Преобразование осуществляется с помощью **алгоритма**, который можно интерпретировать **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 – 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

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.

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** для генерации синтетических данных для машинных алгоритмов из-за нехватки исторических данных или невозможности провести эксперименты в реальной жизни

Терминология на английском языке

Modeling – построение и использование модели в самом широком смысле понимания

Simulation – имитация, прогон имитационной модели

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

Bratley, Fox, Schrange, 1987

Simulation modeling – имитационное моделирование

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

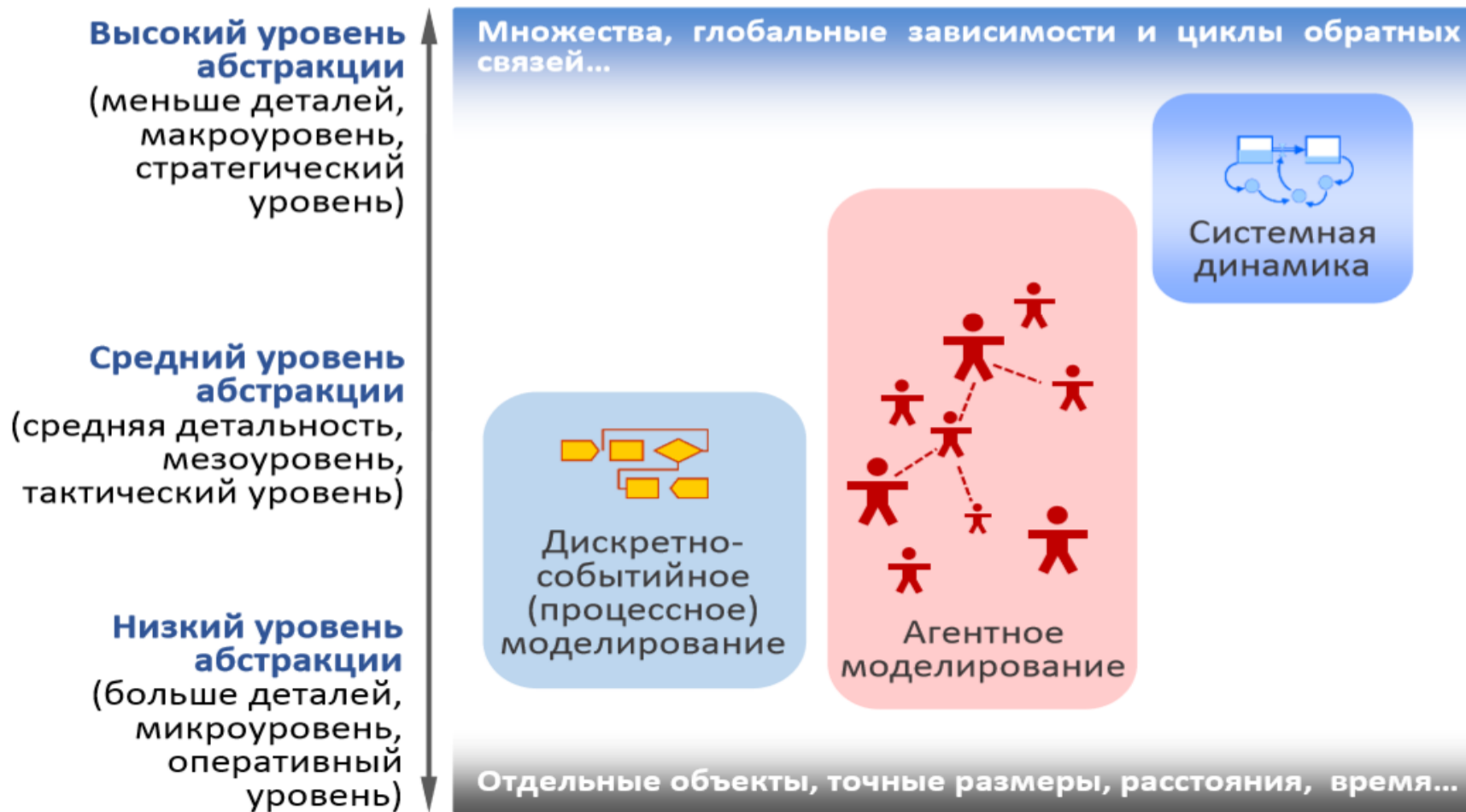
Парадигмы имитационного моделирования I

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)

Парадигмы соответствуют разным уровням абстракции при создании имитационной модели, что обуславливает применение того или иного подхода: высокий (стратегический), средний (тактический) и низкий (оперативный)

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

Парадигмы имитационного моделирования II



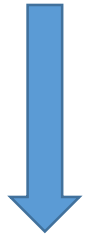
В моделях оперируют количествами объектов и агрегированными показателями. Моделируются проблемы управления с организации, рыночного равновесия, социально-экономического развития городов, экологические процессы

Физическое перемещение не анализируется. Потоки вместо индивидуальных свойств объектов моделирования

The AnyLogic Company, 2016

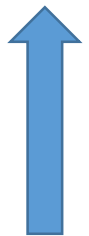
Парадигмы имитационного моделирования III

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».

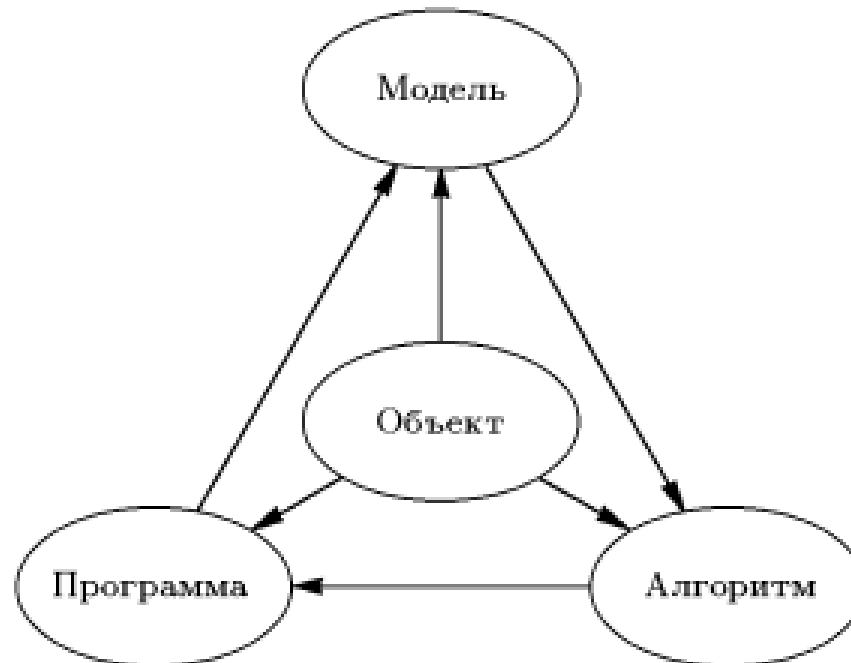
Процесс моделирования (simulation lifecycle)

1. **Содержательная постановка задачи** (описание исследуемой проблемы) – установление границ системы, определение среды, ограничений, измерителей эффективности системы, формулировка цели моделирования, вопросы о поведении системы, интересующие заказчика.
2. **Концептуальная постановка задачи** (формулировка имитационной модели) – в рамках курса рассматриваются системно-динамические модели и агентные модели
3. **Компьютерная реализация модели** – в рамках курса используем 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.** Анализ выходных данных. Анализ чувствительности, оценка рисков, оптимизация. Интерпретация – построение выводов по результатам экспериментирования

Процесс имитационного моделирования является итерационным

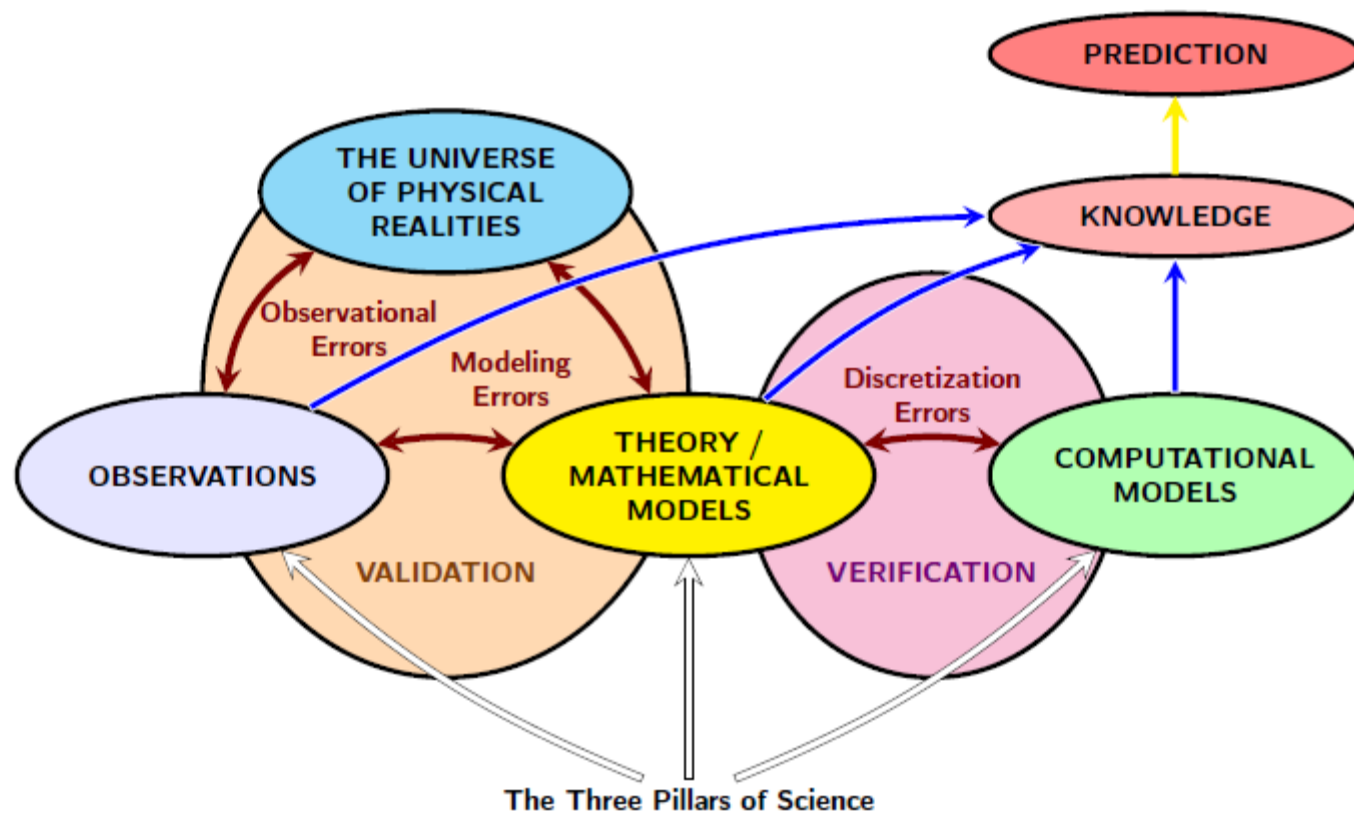
Процесс моделирования

Триада «модель-алгоритм-программа»



Самарский, 1997

Процесс моделирования



Oden et al., 2010

Сложности ИМ

- 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
- Имитационное моделирование «дает» только частные решения

Этап 4 – Валидация (validation)

Валидация -- 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.

Использование результатов моделирования подобных имитационных моделей, разработанных ранее

Выявить в модели ложные допущения или повысить ее достоверность весьма эффективно может помочь анимация.

А.М. Лоу, В.Д. Кельтон, 2004

Этап 4 – Верификация (verification)

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

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

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

А.М. Лоу, В.Д. Кельтон, 2004

Этап 5 – Анализ выходных данных

- Если результаты моделирования согласуются с поведением системы, считается, что модели свойственна **внешняя адекватность**.
- 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.
- См. раздел 5.6: **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. глава 9. **Анализ выходных данных для автономной системы**

А.М. Лоу, В.Д. Кельтон, 2004

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

Этап 5 – Анализ чувствительности, оптимизация

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. раздел 12.5. Чувствительность и оценка градиента.

Окончательный результат анализа имитационной модели состоит в поиске комбинации входных факторов, оптимизирующих основной выходной показатель работы...Исследования посвящены поиску **методов оптимизации моделирования**... См. раздел 12.6. Поиск оптимума

А.М. Лоу, В.Д. Кельтон, 2004

AnyLogic – среда 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 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 поддерживает большинство этапов имитационного моделирования для динамических моделей на основе различных парадигм имитационного моделирования: системная динамика, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование

AnyLogic позволяет интеграцию парадигм (многоподходное моделирование)

Библиотеки в AnyLogic

- **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

Поддержка ГИС в AnyLogic

Облачные вычисления в AnyLogic

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

Интеграция с платформами для машинного обучения в AnyLogic

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

Визуальное проектирование в AnyLogic

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

Модель Басса (содержательная постановка)

Модель Басса (Bass diffusion model, 1969) -- модель распространения нового продукта, услуги или инновации; модель потребительского рынка.

Ограничения: Все люди ведут себя одинаково и могут быть либо потенциальными клиентами ($P(t)$ их количество), либо клиентами нового продукта ($A(t)$ их количество)

Допущение: рост количества клиентов нового продукта объясняется эффектом рекламы и эффектом межличностных коммуникаций

Поведение: Изначально продукт никому не известен и для того, чтобы люди начали его приобретать, он рекламируется. В итоге определенная доля людей приобретает продукт под воздействием рекламы. Также люди приобретают продукт в результате общения с теми, кто этот продукт уже приобрел (косвенная реклама).

Модель Басса: концептуальная постановка

В качестве неизвестной величины рассматривается количество клиентов некоторого продукта или услуги $A(t)$

Потенциальные клиенты P становятся клиентами A со скоростью (темп продаж), которая зависит от рекламы $AdoptionFromAd$ и косвенной рекламы $AdoptionFromWOM$

$$\frac{dA}{dt} = AdoptionFromAd + AdoptionFromWOM$$

Полагается, что скорость, соответствующая рекламе, пропорциональна числу потенциальных клиентов

$$AdoptionFromAd = P * AdEffectiveness$$

Скорость, соответствующая косвенной рекламе, при условии, что все контактируют со всеми

$$AdoptionFromWOM = A * ContactRate * \frac{P}{P + A} * AdoptionFraction$$

где $ContactRate$ – количество контактов человека в единице времени, $N = P + A$ – общее количество людей на рынке

$$\frac{dA}{dt} = k_1 * (N - A) + k_2 * (N - A) * A$$

Имеем нелинейную ДС 1-го порядка с единственным положением равновесия $A = N$, которое является устойчивым (нужно показать)