

Системная динамика и агентное моделирование

Тема. Методы системной динамики

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

доц. Лаврова О.А.

механико-математический факультет, БГУ, Минск

2025

Системная динамика

Системная динамика (system dynamics) – это один из подходов имитационного моделирования

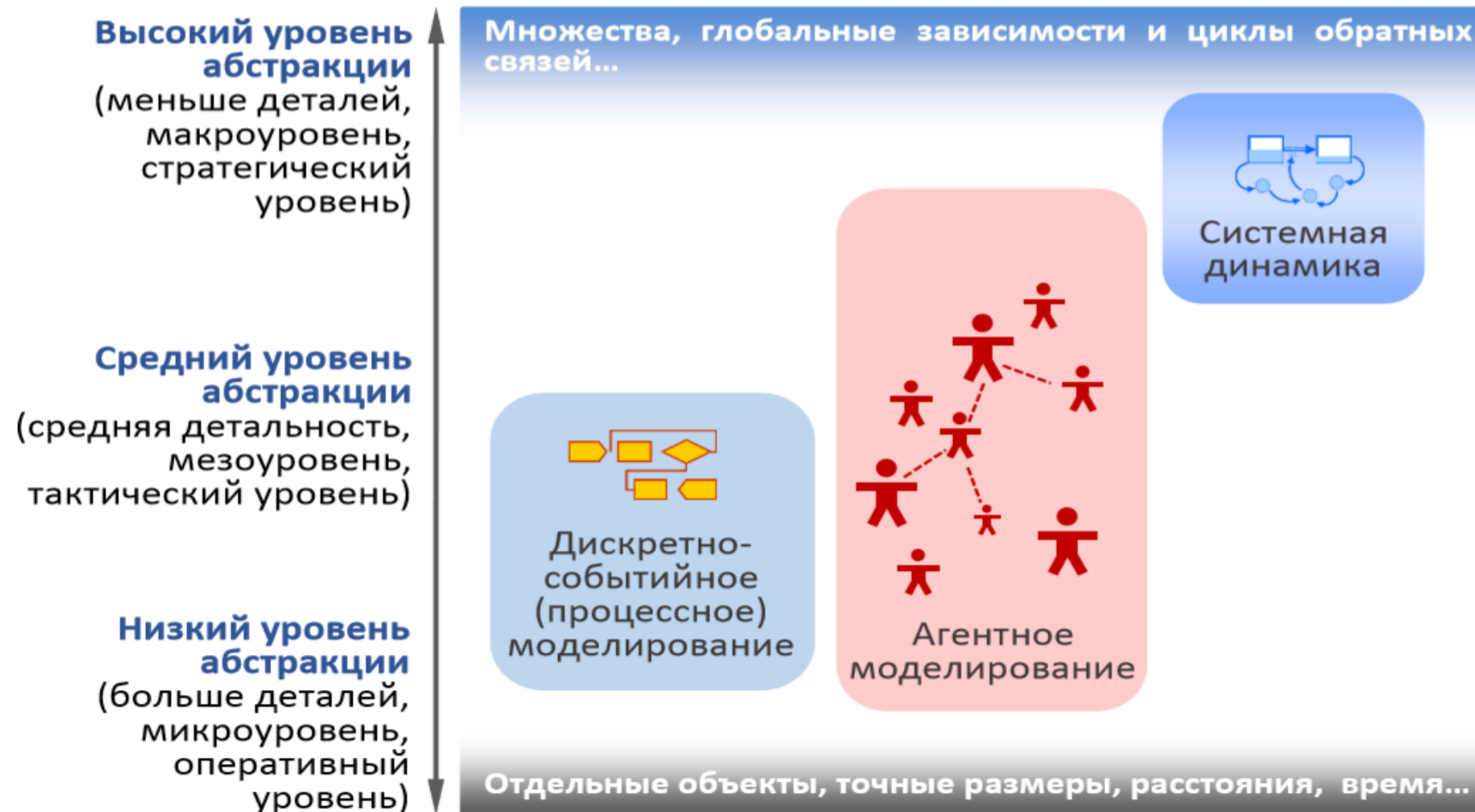
История

Системная динамика предложена и разработана **в конце 1950-х годов** американским профессором Джейм Форрестером (1918-2016) (Jay W. Forrester) из Массачусетского технологического института (MIT) на базе комплекса идей из теории управления, теории информации и кибернетики, а также теории управления организациями.

В **1958 г.** разработаны специальные языки моделирования SIMPLE (Simulation of Industrial Management with Lots of Equations) и DYNAMO (DYNAmic MOdels).

В **1961 г.** опубликована первая книга Д. Форрестера по системной динамике «Industrial Dynamics»

Подходы имитационного моделирования



The AnyLogic Company, 2016

Высокий уровень абстракции исследуемых систем

Системно-динамические модели предполагают высокий **стратегический** уровень абстракции исследуемых систем.

Моделируются проблемы управления в организации, управления проектами, управления цепочками поставок, рыночного равновесия, социально-экономического развития городов, экологические процессы.

Системно-динамические модели – это инструмент для поддержки принятия решений при **стратегическом анализе** и долгосрочном планировании.

В системно-динамических моделях переменными величинами являются агрегированные характеристики, например, количества объектов. Процессы перемещения в системно-динамических моделях не анализируются.

Моделируются потоки вместо индивидуальных свойств объектов моделирования.

Графические нотации

Системная динамика предлагает две графические нотации:

- **причинно-следственная диаграмма** (causal loop diagram)
- **потоковая диаграмма** (stock and flow diagram)

Причинно-следственная диаграмма – метод качественного анализа сложных систем.

Потоковая диаграмма – метод количественного анализа сложных систем на основе имитационного моделирования.

Системный принцип круговой причинности I

является основой при построении причинно-следственных диаграмм.

Any effect becomes a causative factor for future effects, influencing them in a manner particularly subtle, variable, flexible, and of an endless number of possibilities

von Forrester, etc. 1953

Системный принцип круговой причинности II

- Мы страдаем от фундаментального несовпадения между природой реальности в сложных системах и привычным для нас способом мыслить об этой реальности. И первым шагом к устранению этого несовпадения должно быть осознание того, что **причины и следствия разъединены в пространстве и времени.**
- Для системного мышления является аксиомой то, что **всякое влияние есть одновременно и причина, и результат.**
- Мы представляем мир линейным, но **реальность циклична.** В этом одно из главных ограничений нашей способности мыслить системно.
- Развивая системное мышление, мы отбрасываем предположение, что всегда есть кто-то, на ком лежит ответственность. Из концепции обратной связи вытекает, что **каждый несет часть ответственности за проблемы, создаваемые системой.**

Senge, The Fifth Discipline, 1990 , Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Аспекты системного мышления



Operational thinking: **Структура системы определяет поведение**, а не внешние воздействия на систему. При построении моделей основное внимание уделяется выявлению **структуры** системы.

Closed-loop thinking: Структура системы – это причины и следствия, связанные между собой циклически.

System-as-cause thinking: Глубинные причины большинства проблем, в которые попадает управляемая сложная система, коренятся не в «неблагоприятных» внешних условиях, а в специфике **структуры** системы.

Хомяков, Системный анализ, 2008

Dynamic thinking: Нужно приучиться смотреть на основные **структуры**, а не на события.

Senge, The Fifth Discipline, 1990, Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Причинно-следственная диаграмма: определение

Причинно-следственная диаграмма – метод качественного анализа сложных систем.

Построенная модель системы позволяет выявить появление проблемы, развитие проблемы, наметить варианты решения проблемы.

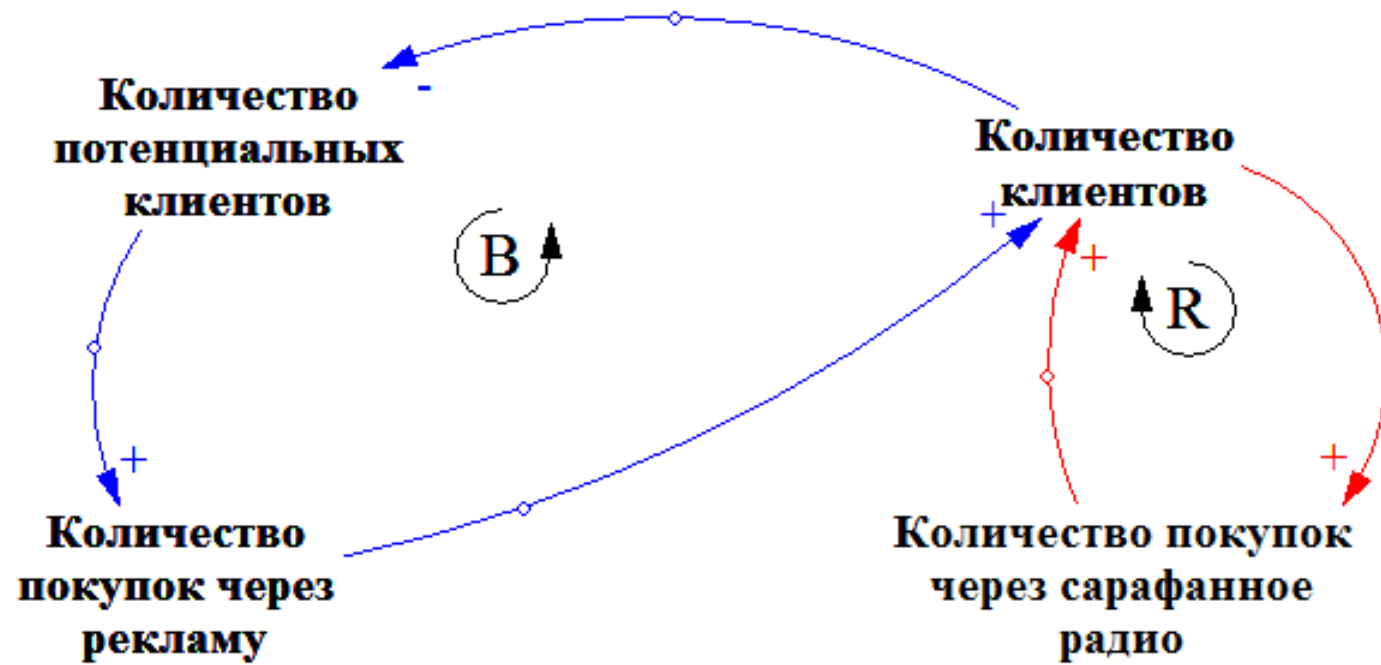
Методология разработки причинно-следственной диаграммы I

- Причинно-следственные диаграммы состоят из ключевых **переменных**, определяющих поведение системы, и причинно-следственных **связей** между ними. Переменные обозначаются текстовыми идентификаторами, связи между переменными обозначаются стрелками от причины к следствию. Связи между переменными имеют полярность (положительная или отрицательная)
- The identification of influential parameters, especially in large (complex) SD models, however, a challenge.

Schoenenberger, in Simulation Modelling Practice and Theory, 2021

- **Цикл (петля) обратной связи** представляет собой цепочку связей, исходящую из переменной и возвращающуюся к ней же

Пример для модели Басса



Методология разработки причинно-следственной диаграммы II

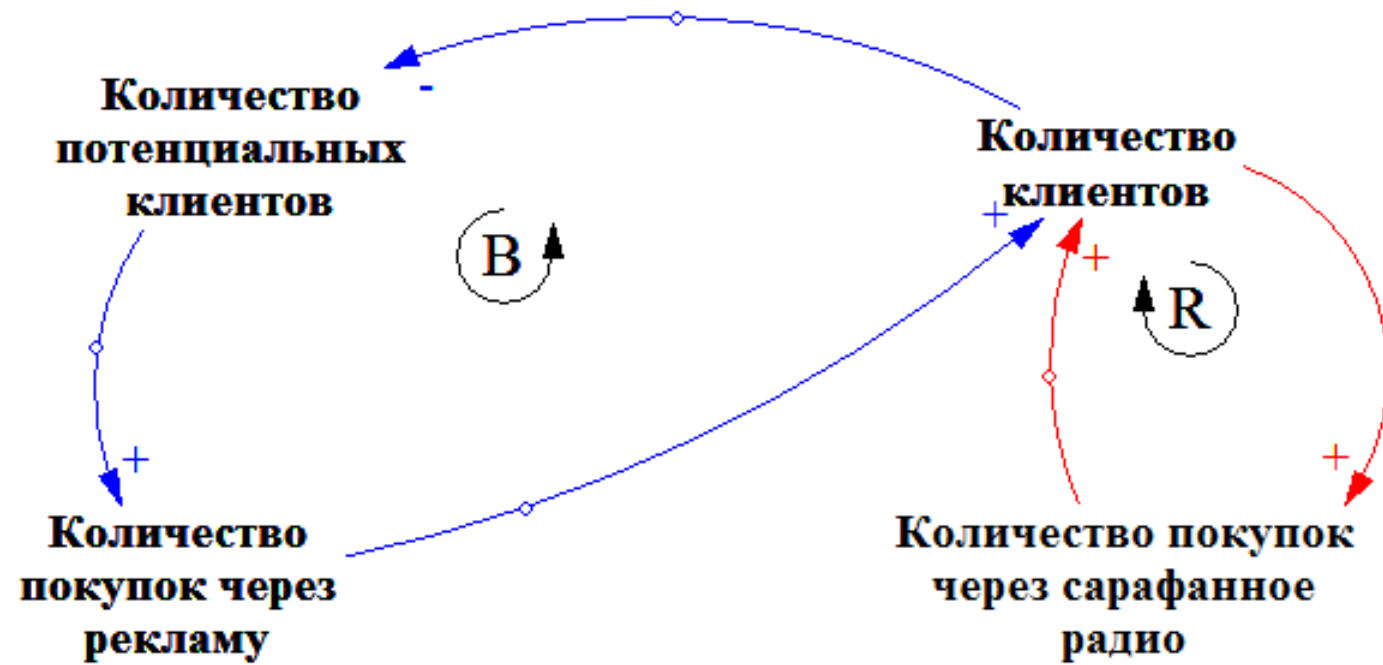
Системы описываются с помощью трех элементов: **усиливающая обратная связь** (четное число отрицательных связей в цикле), **уравновешивающая обратная связь** (нечетное число отрицательных связей в цикле) и **задержки**

Senge, The Fifth Discipline, 1990, Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Причинно-следственная диаграмма – это графическая нотация системной динамики, представляющая причинно-следственные связи системы и глобальные влияния одних переменных на другие во времени с помощью циклов обратной связи.

Причинно-следственная модель системной динамики представляется циклами обратной связи.

Пример для модели Басса

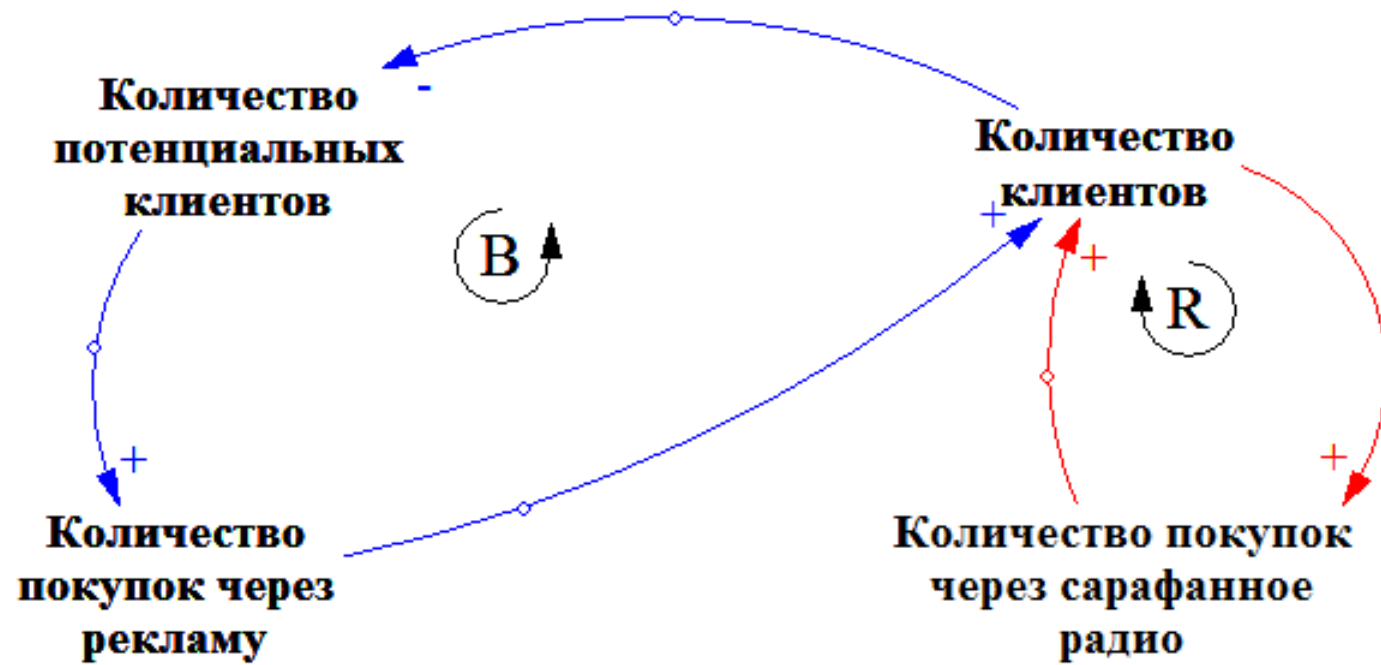


Методология разработки причинно-следственной диаграммы III

Если в системе имеется **усиливающая (Reinforcing) обратная связь** между некоторыми переменными, то система обязательно будет вести себя по типу экспоненциального роста. *При этом совершенно все равно, какими будут внешние воздействия, инициирующие данную обратную связь. Систему в этой ситуации достаточно лишь незначительно подтолкнуть.*

Хомяков, Системный анализ, 2008

Пример для модели Басса



Методология разработки причинно-следственной диаграммы IV

Если отклик контура обратной связи на переменное изменение выступает против первоначального возмущения, то контур является отрицательным или целенаправленным.

Сидоренко, Системная динамика, 1998

Уравновешивающую или стабилизирующую (Balancing) обратную связь мы находим везде, где существует поведение, ориентированное на достижение цели/равновесия.

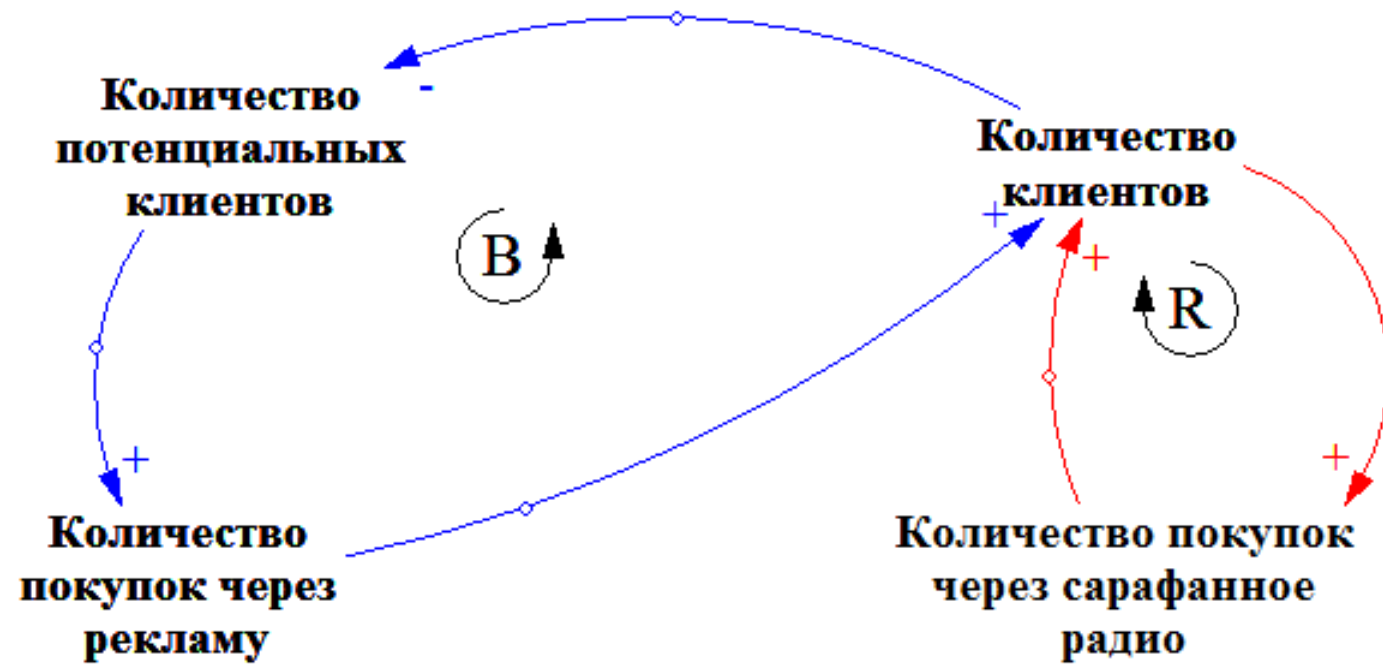
Senge, The Fifth Discipline, 1990 , Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Системный принцип обратной связи:

All purposeful behavior may be considered to require negative feed-back. If a goal is to be attained, some signals from the goal are necessary at some time to direct the behavior.

N. Wiener, Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine, 1948

Пример для модели Басса



Методология разработки причинно-следственной диаграммы V

Многие процессы обратной связи работают с **задержками**, так что последствия действий проявляются только постепенно.

Senge, The Fifth Discipline, 1990 , Сенге, Пятая дисциплина, 1999

Запаздывания в циклах обратной связи оказывают решающее влияние на поведение системы. Часто они приводят к возникновению колебаний. ... Продолжительность запаздывания – **очень мощный рычаг воздействия** на систему... далеко не всегда величину запаздывания можно легко изменить.

Д. Медоуз, Алфубка сисгеменного мышления, 2008

Причинно-следственная диаграмма: недостатки

Причинно-следственная диаграмма не имеет семантики,
достаточной для имитации