

Системный анализ

Лекции 4 и 5

Моделирование систем

Цель



Задачи

Экспертная

Что будет (было бы), если...

Решение: сценарий

Конструктивная

Как сделать, чтобы...

Решение: проект



Модель

Отображение свойств объекта при его изучении

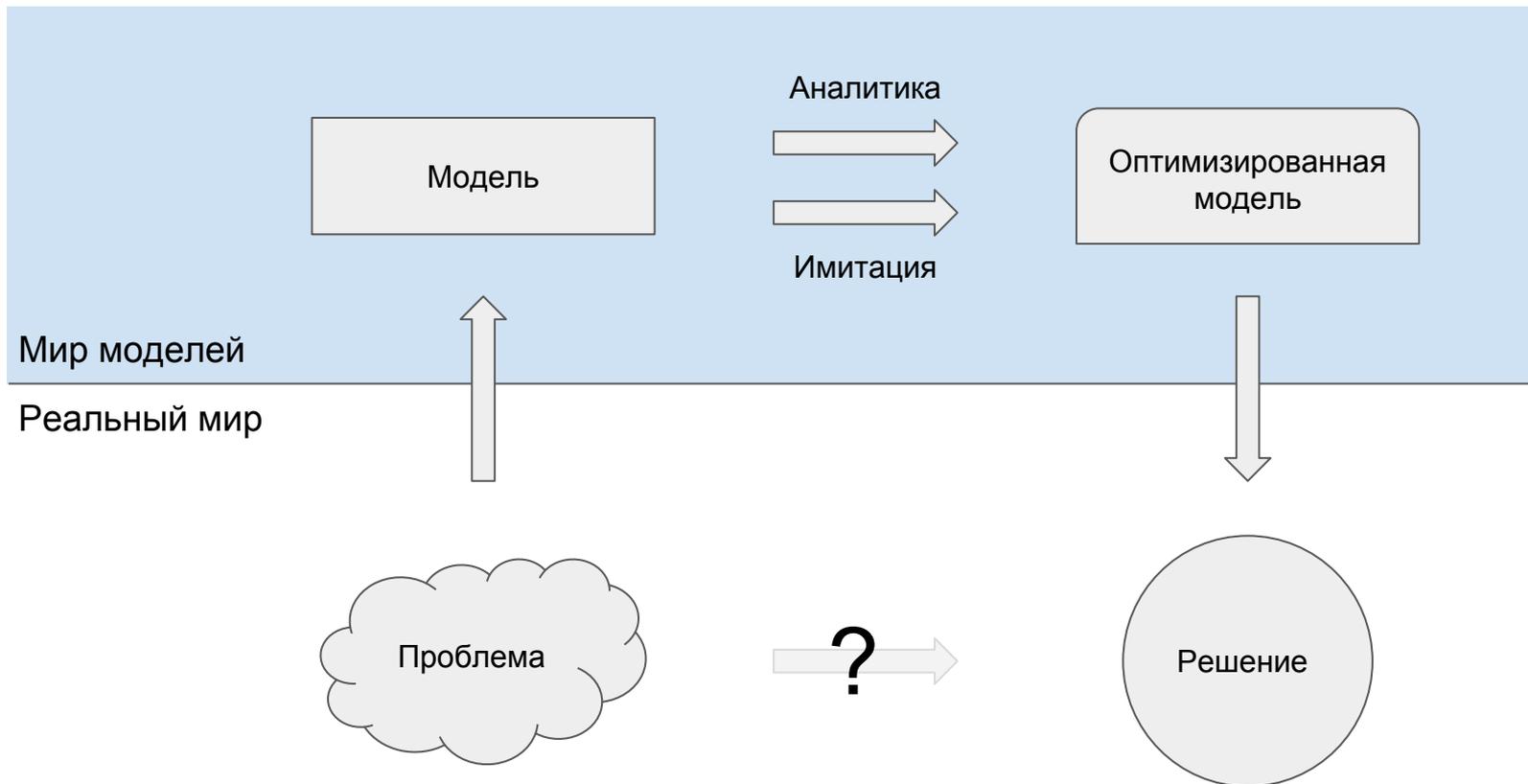
Познавательная

Модель подгоняется под реальность

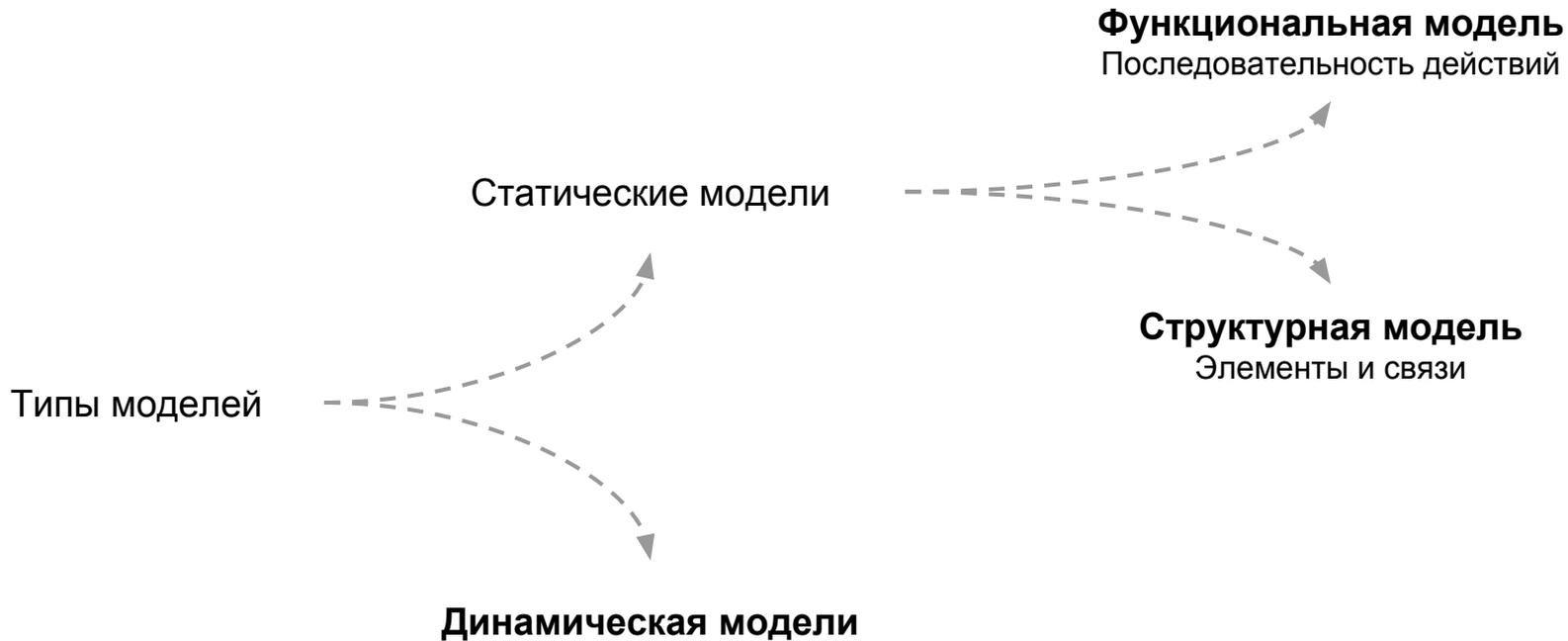
Прагматическая

Реальность подгоняется под модель

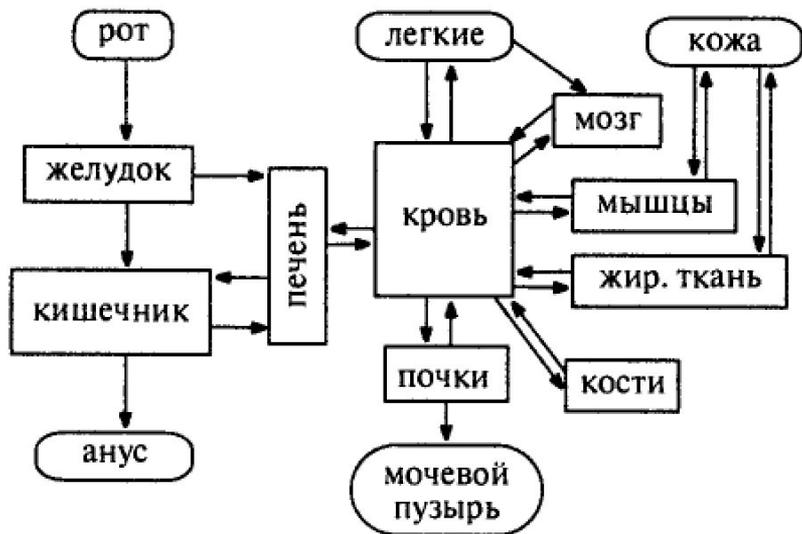
Моделирование







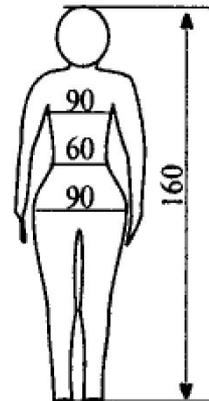
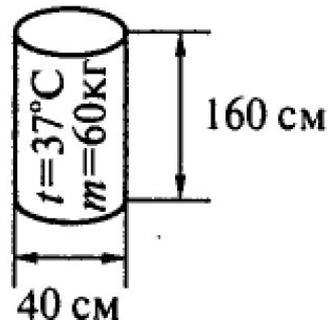
Пример: Модели человека



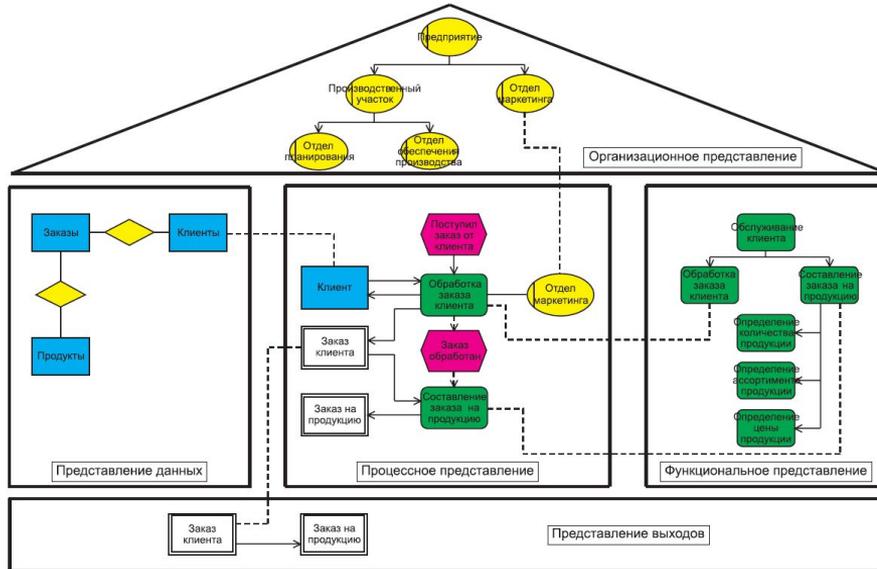
Всеобщая декларация прав человека

1. Все люди рождаются свободными и равными в своем достоинстве и правах. Они наделены разумом и совестью и должны поступать в отношении друг друга в духе братства.

2. Каждый человек должен обладать всеми правами и всеми свободами, провозглашенными настоящей Декларацией, без какого бы то ни было различия, как-то в отношении расы, цвета кожи,



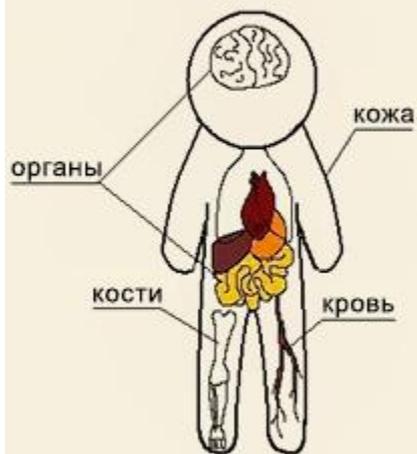
Пример: Моделирование бизнес-процессов в ARIS



ARIS рассматривает следующие аспекты организации:

- Организационная структура
- Дерево функций
- Поток данных
- Выходы системы (продукты)
- Процессы, которые связывают все аспекты воедино

Из чего состоят:



Биолог



Физик



Гуманитарий

Подходы к моделированию

Высокий уровень абстракции

[меньше деталей
макро уровень
стратегический
уровень]

Средний уровень абстракции

[средняя
детальность
мезо-уровень
тактический
уровень]

Низкий уровень абстракции

[больше деталей
микро уровень
оперативный
уровень]

Агрегаты, глобальные причинные зависимости, динамика обратных связей, ...

- Рынок и конкуренция
- Динамика населения
- Динамика персонала
- Экономика здравоохранения
- Экосистемы
- Управление проектами
- Переработка отходов
- Транспорт: макро-модели
- Цепочки поставок
- Перевозки
- Управление активами
- Сервисные центры
- Энергетические сети
- Отделение скорой помощи
- Производство
- Склад и логистика
- Движение пешеходов
- Транспорт: микро-модели
- Компьютерные системы
- Системы управления

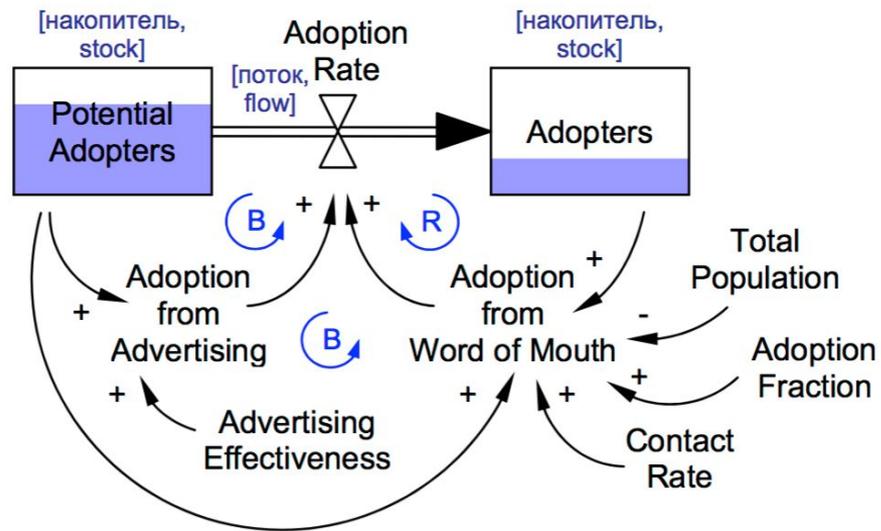
Отдельные объекты, точные размеры, расстояния, скорости, времена, ...

Подходы к моделированию



Системная динамика

- Подход предложен Дж. Форрестором в конце 1950-х годов
- Поведение системы представляется как взаимодействие положительных и отрицательных обратных связей и задержек
- Модель состоит из накопителей (stocks), потоков (flows) и связей между ними
- Математически представляет собой систему дифференциальных уравнений
- Основные инструменты:
 - iThink/STELLA
 - VENSIM
 - AnyLogic



Системная динамика



Джей Форрестер

1918-2016

Основатель системной динамики

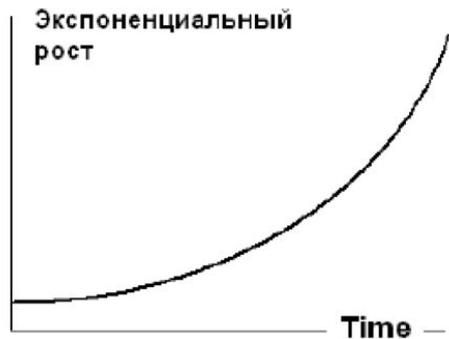


Донелла Медоуз

1941-2001

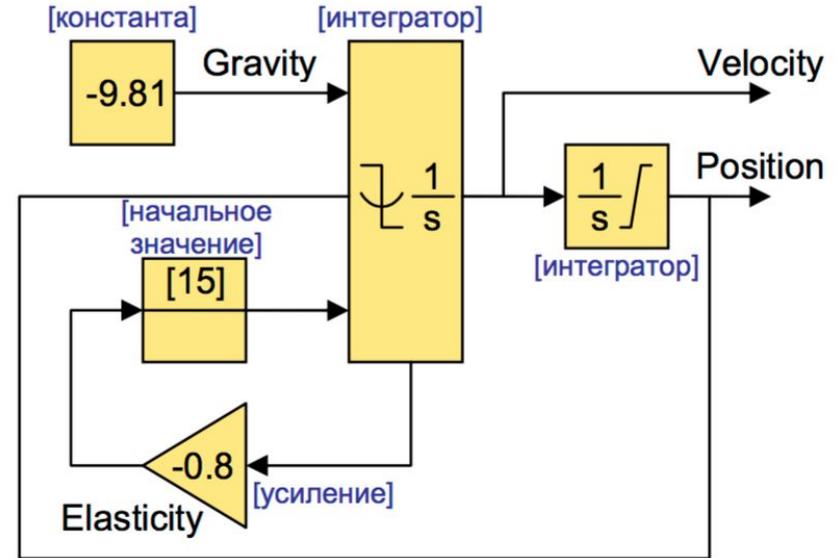
Автор книг “Пределы роста”
и “Азбука системного мышления”

Базовые структуры



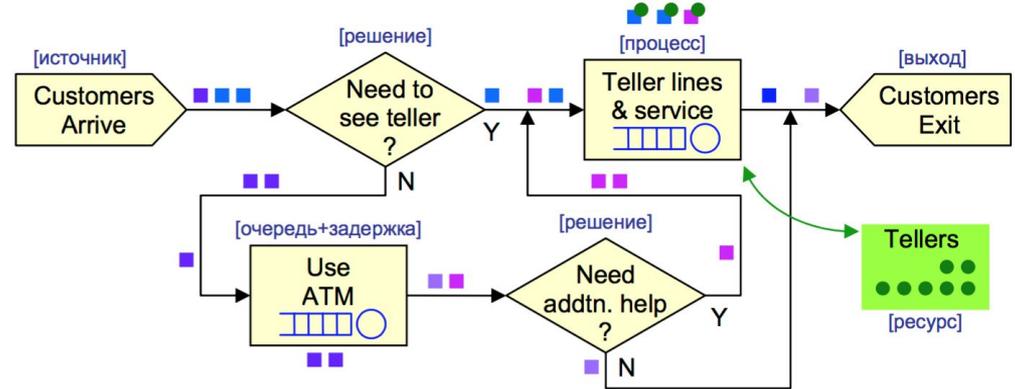
Динамические системы

- Подход появился задолго до системной динамики
- Математическая модель представляет собой набор переменных и алгебро-дифференциальных уравнений над ними
- Переменные имеют конкретный физический смысл
- Высокий уровень входа
- Инструменты:
 - Matlab Simulink
 - Wolfram SystemModeler



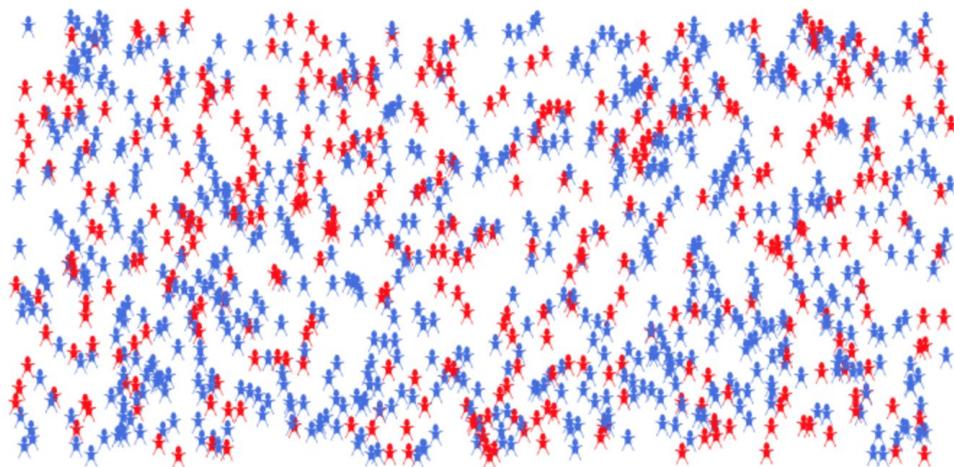
Дискретно-событийное моделирование

- Подход восходит к Дж. Гордону, разработавшему GPSS в 1960-х
- В основе лежит концепция заявок, ресурсов и потоковых диаграмм (flowchart)
- Заявки (люди, детали, документы) проходят по flowchart, стоя в очередях, обрабатываясь, объединяясь и разъединяясь
- Инструменты:
 - GPSS
 - Arena
 - iThink/STELLA
 - AnyLogic
 - SimPy



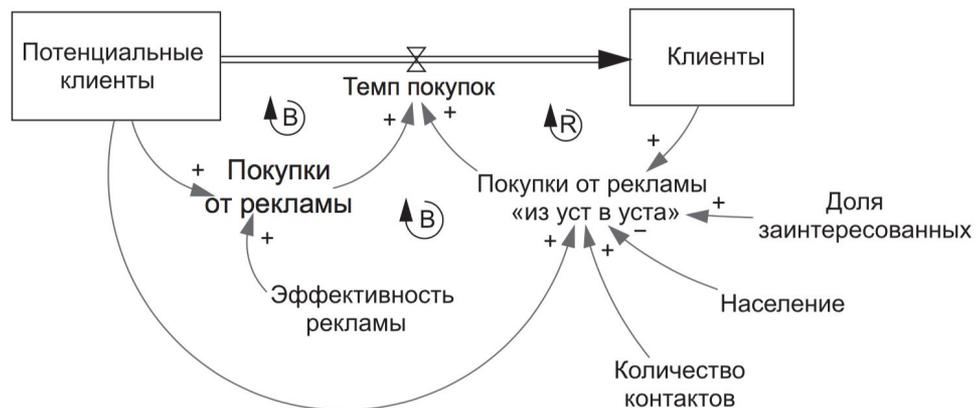
Агентное моделирование

- Модель состоит из среды, в которую помещаются “агенты”
- Поведение агентов децентрализованно и задается индивидуально
- Агенты взаимодействуют со средой и другими агентами вследствие чего возникает эмерджентность
- Инструменты:
 - AnyLogic
 - NetLogo
 - Swarm



Пример: Модель Басса

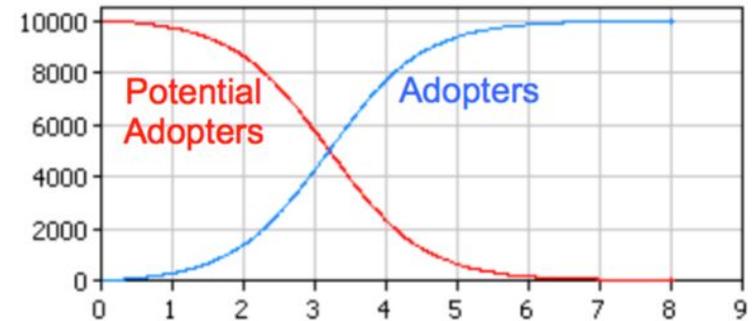
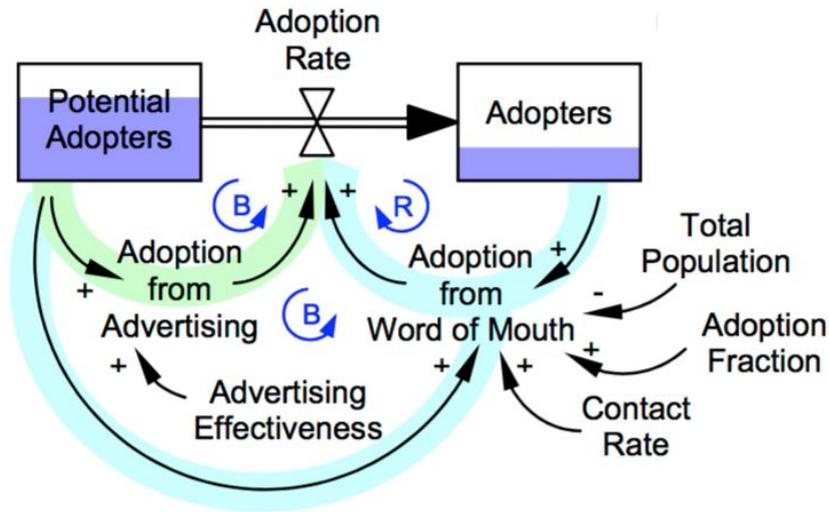
- Создана в 1969 году Фрэнком Бассом
- Описывает динамику распространения инноваций
- Два потока:
 - Эффект рекламы
 - “Сарафанное радио”



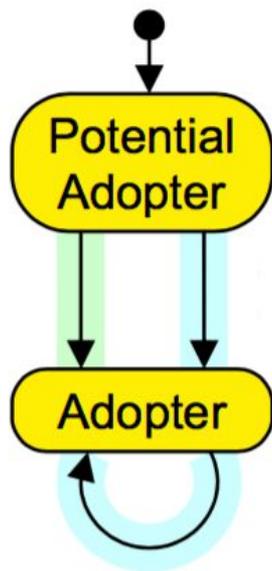
Эффект от рекламы = Потенциальные клиенты × Эффективность рекламы

“Сарафанное радио” = Потенциальные клиенты × $\frac{\text{Клиенты}}{\text{Население}}$ × Количество контактов × Доля заинтересованных

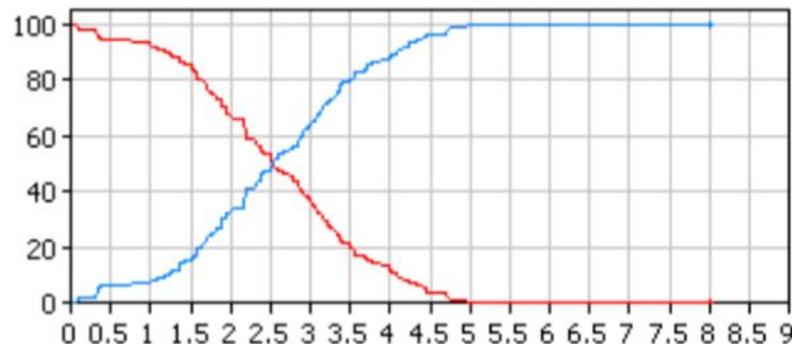
Пример: Модель Басса (системная динамика)



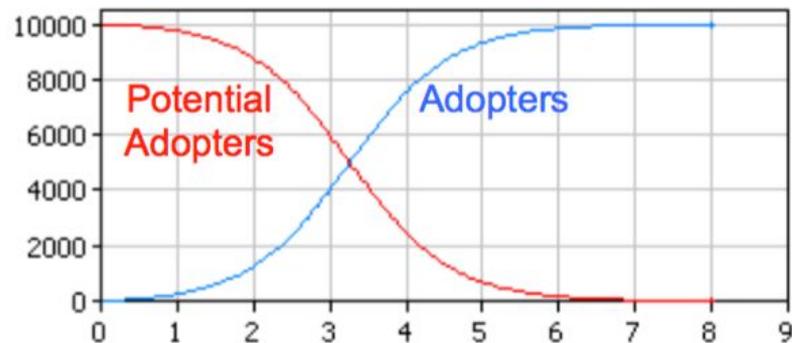
Пример: Модель Басса (агентное моделирование)



100 агентов

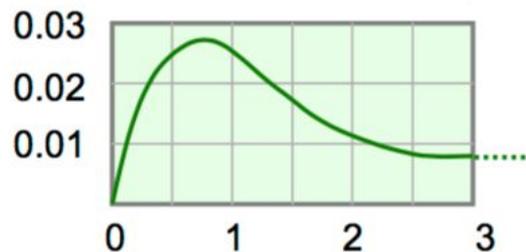


1000 агентов

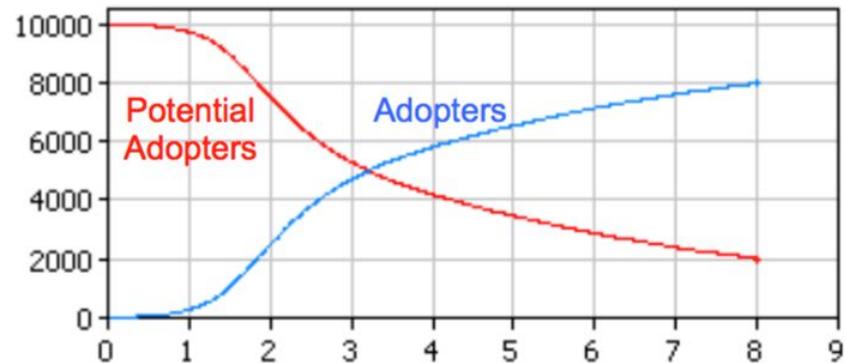


Пример: Модель Басса (агентное моделирование)

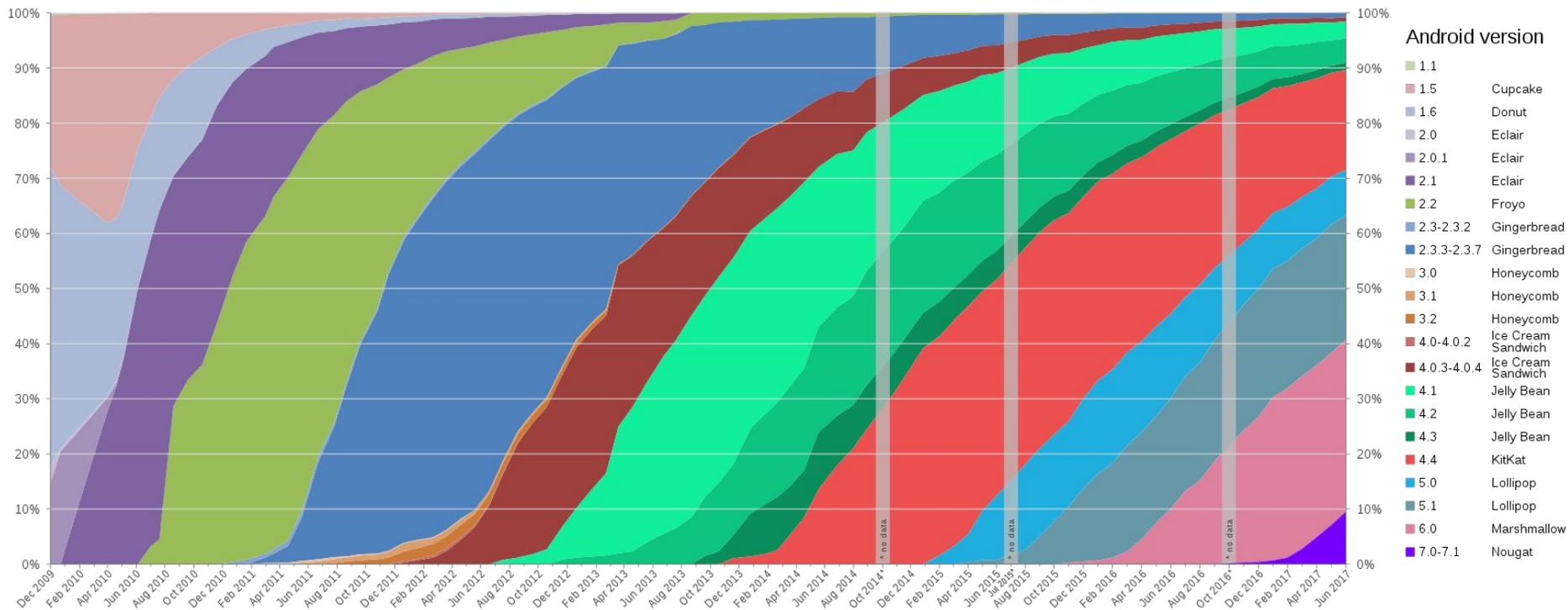
Эффективность устной рекламы зависит от времени покупки



1000 агентов



Пример: Распространение версий Андроида

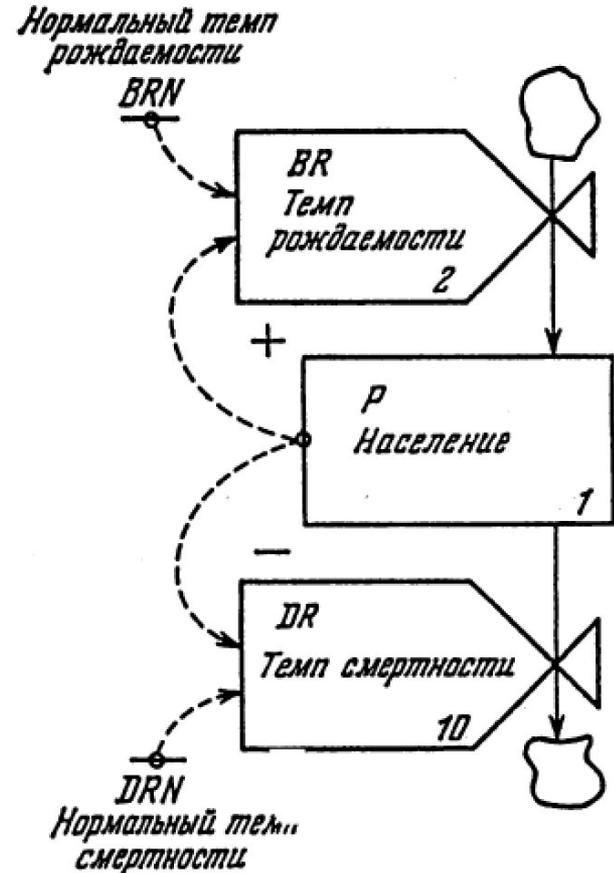


Пример: Мировая модель

- Джей Форрестер, MIT, Sloan School of Management
- Язык DYNAMO
- Разработка глобального сценария развития человечества
 - Заказ Римского клуба, 1970
- Запасы (Stocks):
 - Население
 - Капиталовложения (фонды)
 - Природные ресурсы
 - Часть фондов, вкладываемых в сельское хозяйство
 - Уровень загрязнения
- В разное время было построено три модели: WORLD1, WORLD2, WORLD3

Пример: Мировая модель

- Потоки рождаемости и смертности
- “Нормальные” коэффициенты рождаемости и смертности
- Усиливающий цикл рождаемости и балансирующий цикл смертности
- Множители, которые изменяют коэффициенты, например, на коэффициент смертности влияют множители, связанные с уровнем загрязненности, плотностью населения и количеством доступной еды



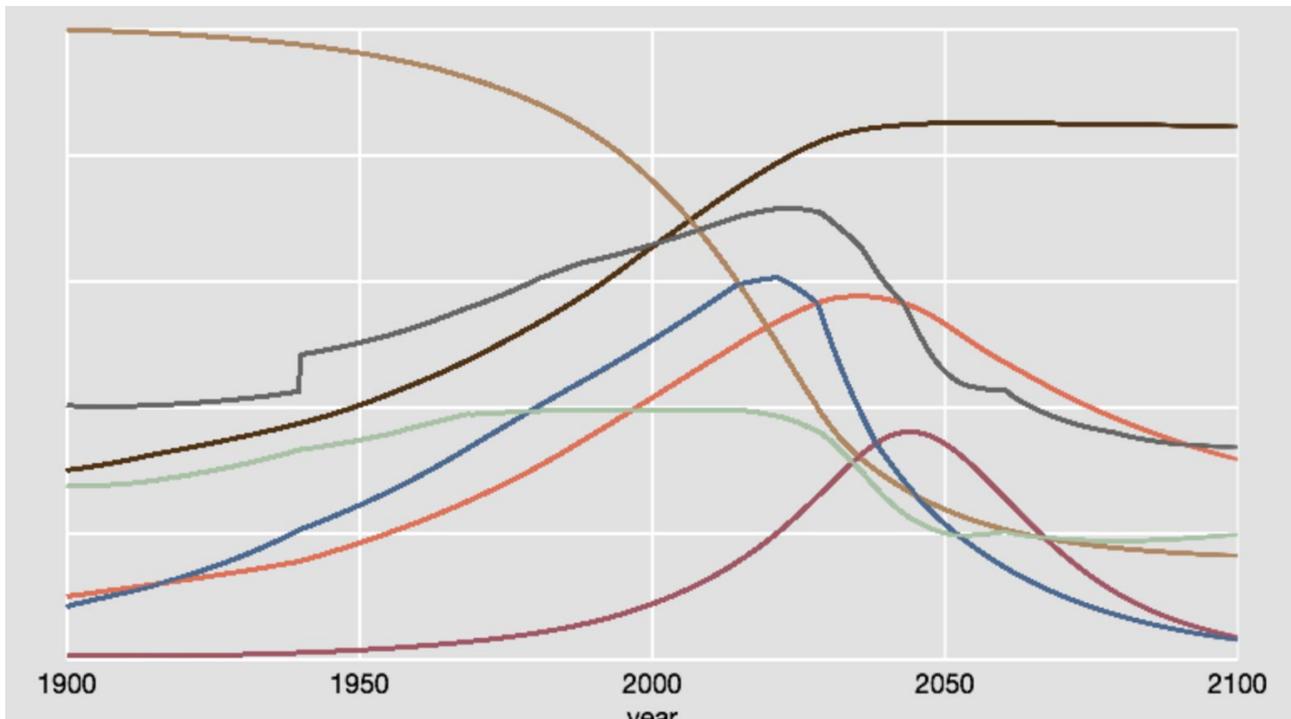
Пример: Мировая модель

- Основной вывод:
 - Экспоненциальный рост населения не может продолжаться бесконечно
 - 4 параметра, ограничивающие рост: истощение природных ресурсов, увеличение уровня загрязнения, перенаселенность, нехватка продуктов
 - Население достигает максимума в 2020
 - Запасы ресурсов начинают истощаться к 2000 (не сбылось)
- Другие сценарии:
 - При уменьшении использования природных ресурсов развивается кризис загрязнения
 - Контроль деторождаемости не давит на чувствительные точки системы
 - В то же время объем капиталовложений и производство продуктов являются слишком чувствительными точками

Пример: Мировая модель

- Уточненная модель WORLD3
 - Донелла Медоуз, Деннис Медоуз,
 - Йорген Рэндерс
- Больше переменных:
 - Население -- динамика численности, рождаемость, ожидаемая продолжительность жизни, индекс благополучия
 - Капиталовложения (фонды) -- инвестиции, использования труда
 - Природные ресурсы -- невозполнимое использование ресурсов, экологический след
 - Часть фондов, вкладываемых в сельское хозяйство -- пахотные земли, плодородие земель, производство продуктов питания
 - Уровень загрязнения -- динамика загрязнения
- Основной сценарий:
 - Население составит 6 млрд к 2000 и достигнет пика 7 млрд к 2030
 - Уровень загрязнения к 2035 составит 11x по сравнению с 1970
- Критика:
 - Влияние труда и капитала на получаемые результаты
 - Конечность ресурсов, в том числе конечность земельных территорий
 - Смешивание возобновляемых и невозобновляемых ресурсов

Пример: Мировая модель (WORLD3)

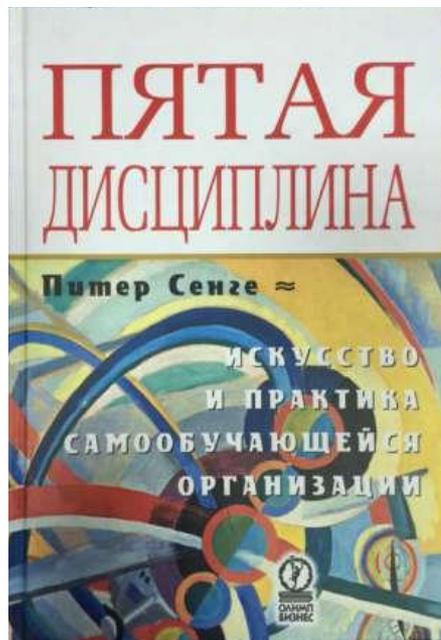


Variables to Plot

- population
- resources
- food per capita
- industrial output
- services output
- pollution index
- life expectancy
- birth rate
- death rate
- arable land
- land yield

Системные архетипы

Системные архетипы



Системные архетипы -- это часто встречающиеся системные структуры, которые генерируют часто встречающиеся типы проблемного поведения

Описаны в книгах Питера Сенге “Пятая дисциплина” и Донеллы Медоуз “Азбука системного мышления”

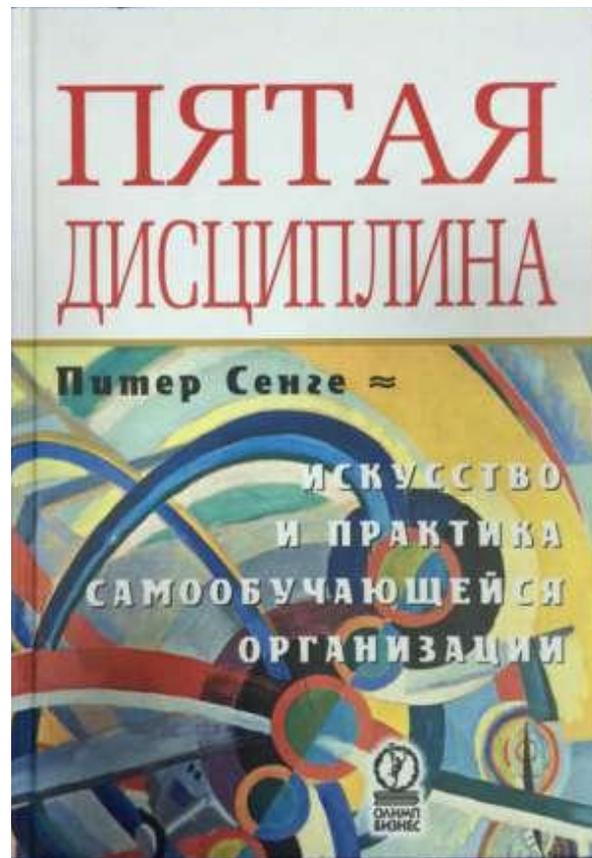


Системные архетипы

Сенге	Медоуз
Уравновешивание с задержкой (Balancing Process with Delay)	--
Пределы роста (Limits to Growth)	--
Подменить проблему (Shifting the Burden)	Поддерживающие средства (Shifting the Burden)
Размывание целей (Eroding Goals)	Стремление к худшему (Drift to Low Performance)
Эскалация (Escalation)	Эскалация конфликта (Escalation)
Деньги к деньгам (Success to the Successful)	Успех к успеху (Success to the Successful)
Трагедия общих ресурсов (Tragedy of the Commons)	Трагедия общин (Tragedy of the Commons)
Неработающее решение (Fixes that Fail)	Сопrotивление внешнему влиянию (Policy Resistance)
Рост и недоинвестирование (Growth and Underinvestment)	--
--	Манипулирование правилами (Rule Beating)
--	Стремление к неверной цели (Seeking the Wrong Goal)

Системные архетипы

1. Уравновешивание с задержкой
2. Пределы роста
3. Тенденция к ухудшению
4. Эскалация
5. Успех к успеху
6. Трагедия общин
7. Сопротивление внешнему влиянию
- 8.
9. Стремление к неверной цели
10. Неработающее решение
11. Перекладывание проблем
12. Манипулирование правилами
13. Рост и недоинвестирование



Уравновешивание с задержкой

Ловушка: Задержка в реакции системы приводит к тому, что корректировка действий становится чрезмерной либо вообще прекращается из-за отсутствия видимых результатов.

Выход: Понимать, что в системах всегда есть задержки. Терпеть. Сделать систему более чуткой к воздействиям.

- Неисправный душ
- Питание
- Тренировки
- “10 тыс. часов”
- Циклы перепроизводства и дефицита (“Пивная игра”)
- Нервный срыв после долгого игнорирования проблемы

ЭТО НЕ ОТЕПЕЛЬ, ЭТО ЗАМАХ



Пределы роста

Ловушка: Усиливающий цикл по мере достижения лимита система (или реакция внутри системы на рост) сталкивается с балансирующим, дальнейшие усилия будут приносить все меньше и меньше результата

Выход: Знать свои пределы и скорость. Устранять ограничения и лимитирующие факторы.

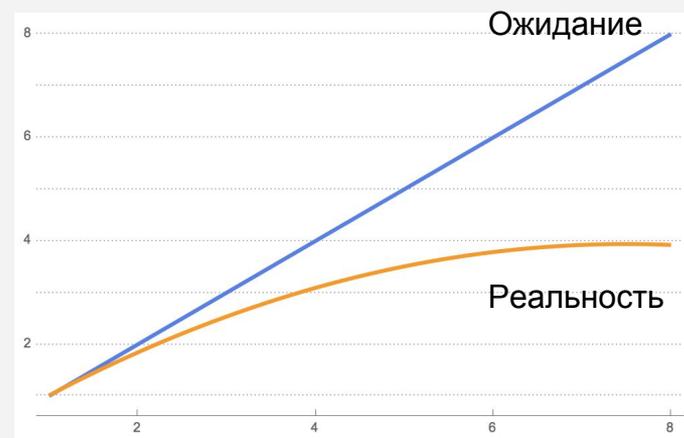
Лимитирующий фактор: Не нужно искать главный, нужно рассматривать их вместе, а не изолированно друг от друга

- История цивилизация и компаний
- “Мировая модель” Форрестера
- Пивот стартапов
- Время удвоения
- Обучение: преподаватели, техника, задачи, соперники

Пример: Эффект Рингельманна



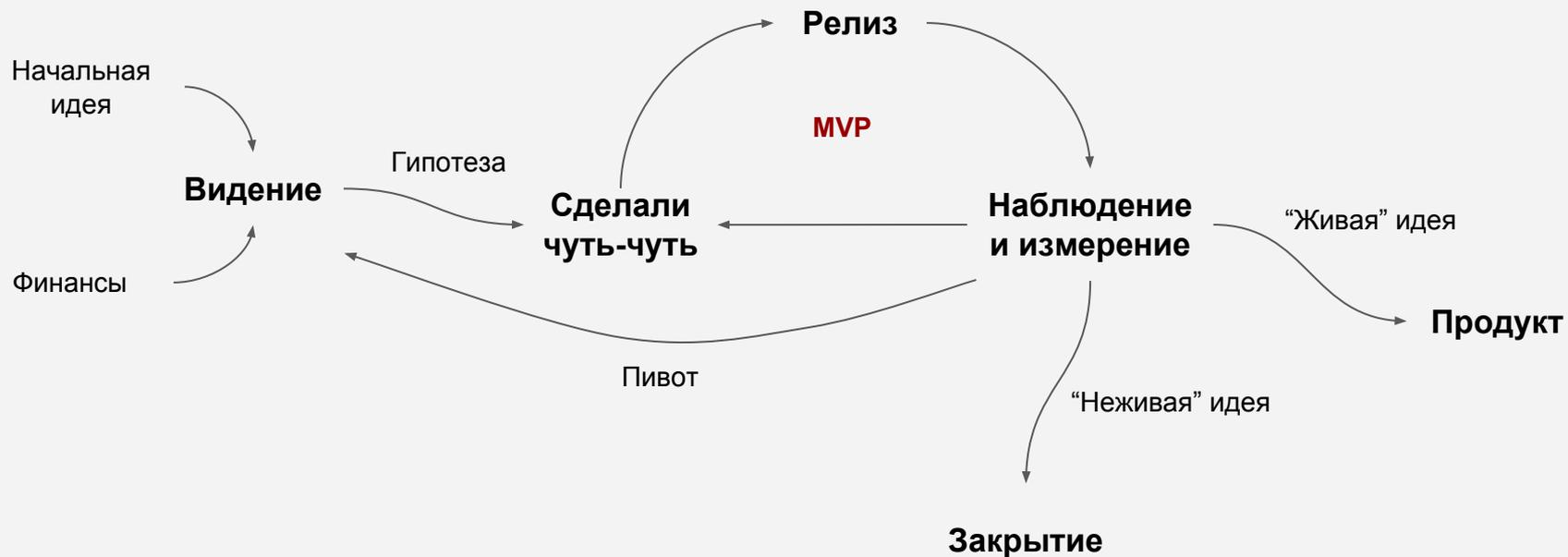
Результат



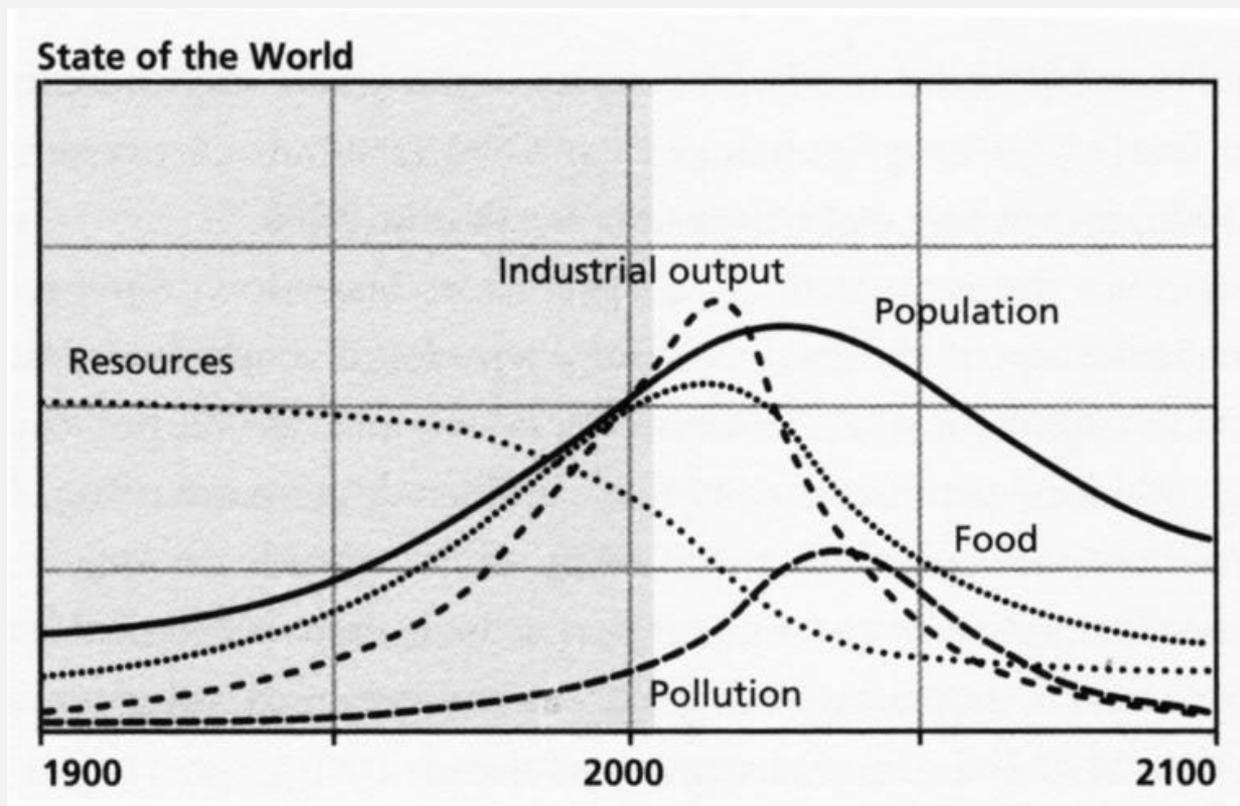
Количество участников

Такое поведение схоже с “законом Брукса” -- привнесение в ИТ-проект новых сил на поздних стадиях разработки лишь отодвигает срок сдачи проекта

Пример: ИТ-стартап



Мировая модель



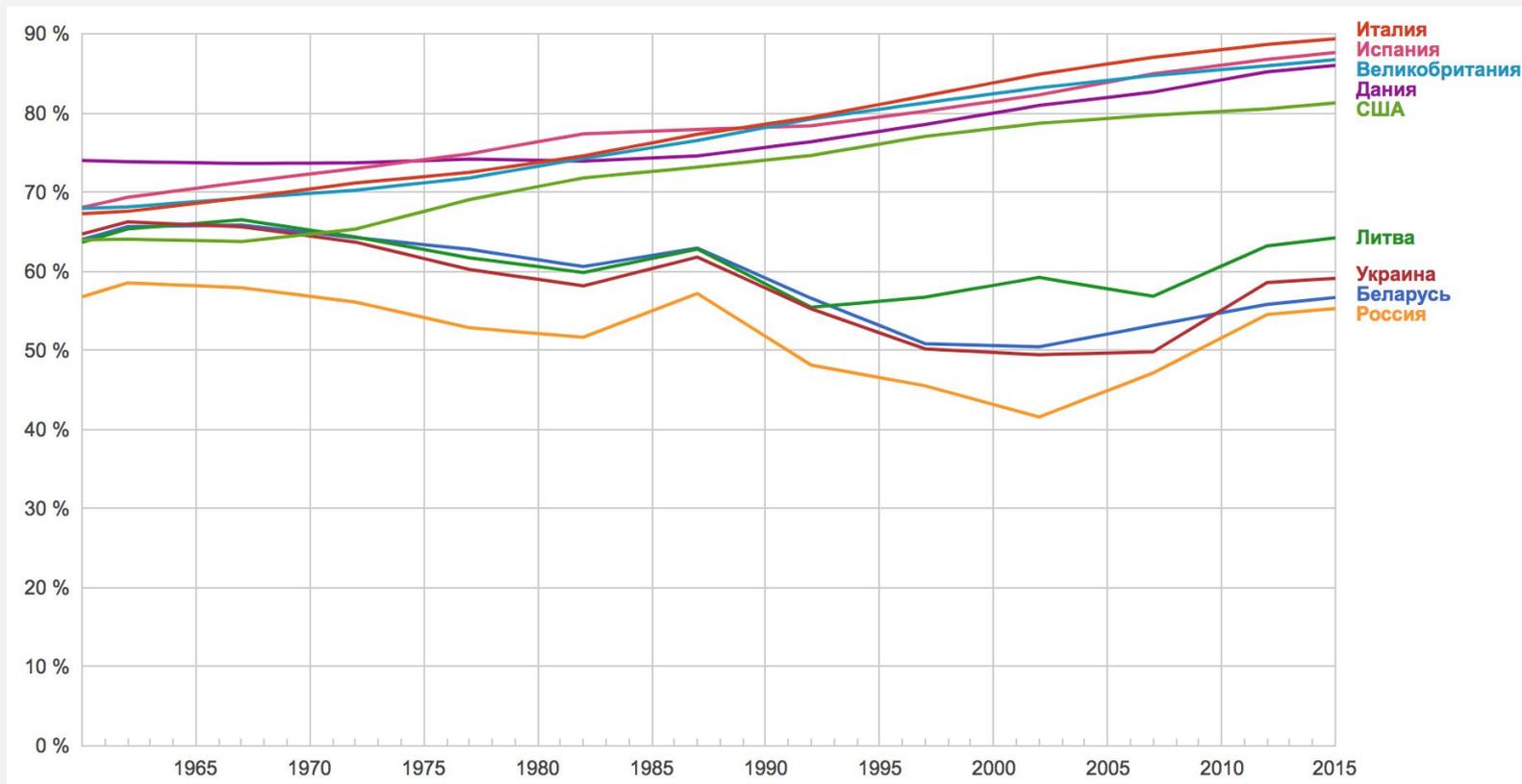
Подмена проблемы / Поддерживающие средства

Ловушка: Кратковременные решения интуитивны, но в сложных системах практически всегда есть конфликт краткосрочного и долгосрочного, быстрые “фиксы” оттягивают полное решение.

Выход: Фокус на долговременном решении проблем.

- Алкоголизм и наркомания
- «Костыльные решения»
- Таблетки вместо ведения здорового образа жизни
- Использование кредитов
- Приспосабливание
- Сокращение расходов на плановый осмотр
- Матрица Эйзенхауэра

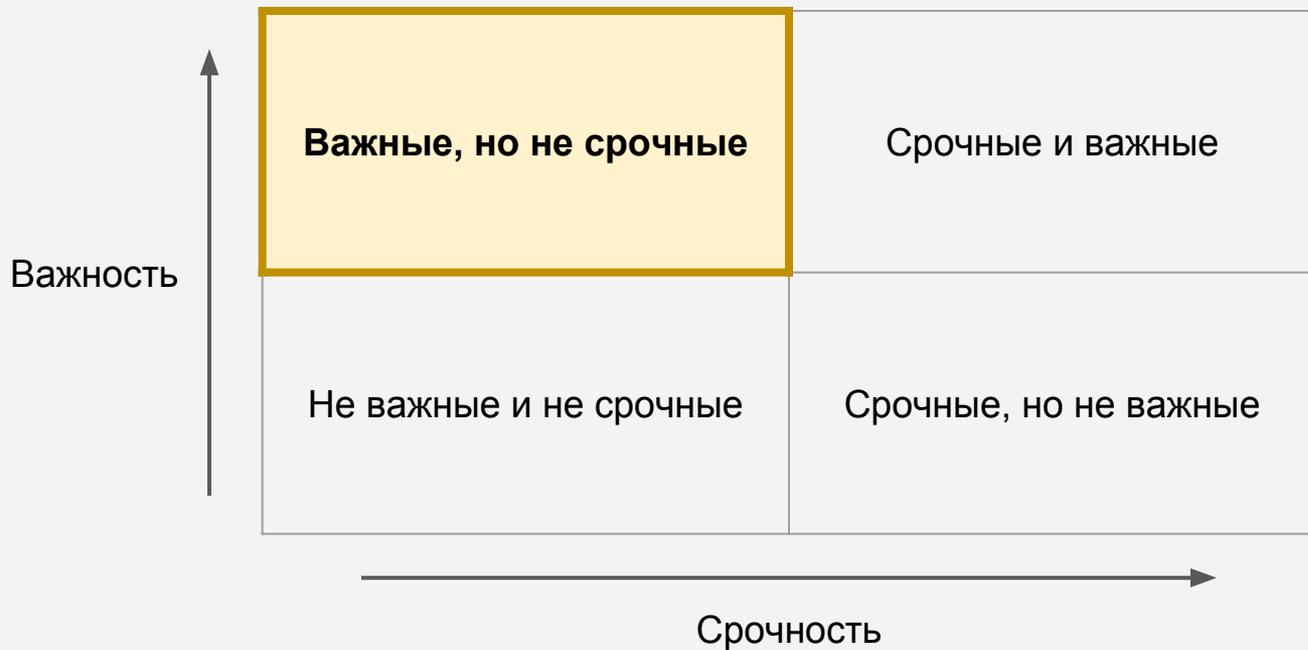
Вероятность дожить до 65 лет, мужчины



Матрица Эйзенхауэра



Матрица Эйзенхауэра



Матрица Эйзенхауэра



Тенденция к ухудшению

Ловушка: В системах есть постоянная тенденция к ухудшению, вследствие того, что достижения не соотносятся с целями, из-за чего цели понижаются. В долгосрочной перспективе это приводит к коллапсу

Выход: Стандарты не должны зависеть от текущего состояния. Лучше работать на повышение.

- «Вареная лягушка»
- Новогодние обещания
- Постепенное снижение требований к себе
- Снижение качества как способ снижения расходов
- Корректировка государственных нормативов
- “Защита” программистов в противовес срокам



Одна из пропагандистских уловок -- расширение “окна Овертона” для продвижение изначально немыслимой идеи

$$0.99^{30} \approx 0.74$$

$$0.99^{365} \approx 0.03$$

$$1.01^{30} \approx 1.35$$

$$1.01^{365} \approx 37.8$$

*Сравните эффекты снижения требований к себе
и повышения требований к себе*

Эскалация

Ловушка: Конкуренция запасов приводит к срабатыванию усиливающего цикла обратной связи, что всегда является экспоненциальным процессом и может привести к катастрофе.

Ловушка: Две системы разрушают свои отношения наращивая ответные удары.

Выход: Не попадать в ловушку. Отказаться от соревнования. Договориться с другой стороной.

- Гонка вооружений
- Ближний восток
- Ценовые или рекламные войны
- Черный пиар
- Разрушение брака
- Рост зарплат в ИТ сфере



Муравьиная карусель смерти

Успех к успеху

Ловушка: Если победители забирают все, то развивается усиливающий цикл обратной связи, который приводит к исчезновению конкурентов.

Выход: Диверсификация. Увеличение разнообразия. Ограничение доли пирога. Антимонопольные службы.

- “Монополия”
- Баланс между работой и семьей
- “Виральность” приложений
- Излишняя скромность или уверенность
- Бедные и богатые

WEALTH INEQUALITY IN AMERICA



ACTUAL
Distribution of
Wealth in the U.S.



What Americans
THINK
The Distribution Is



Distribution
92% Choose as
IDEAL



BOTTOM 20%



SECOND 20%



MIDDLE 20%

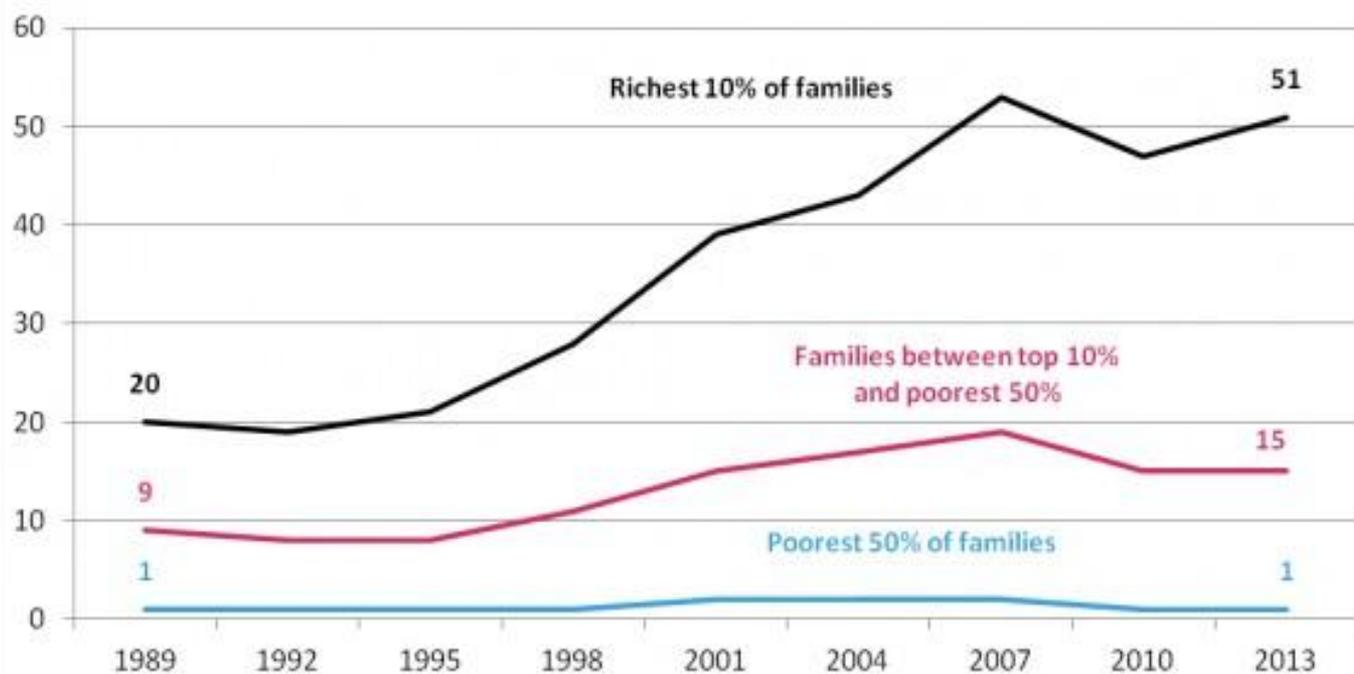


FOURTH 20%



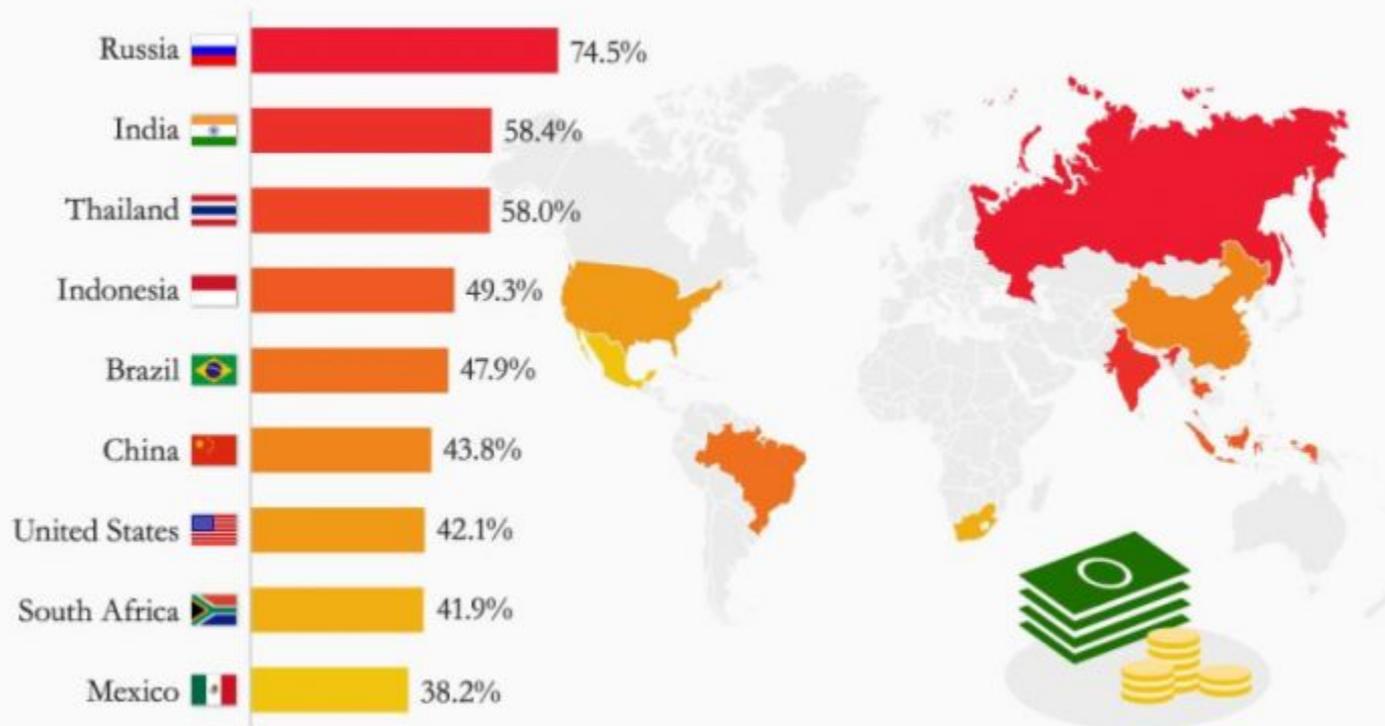
TOP 20%

Holdings of U.S. Family Wealth, in Trillions of 2013 Dollars



The world's most unequal countries

Share of total wealth of richest 1% in selected countries in 2016



@StatistaCharts Source: Credit Suisse Global Wealth Databooks

Трагедия общин

Ловушка: Потребление общего ресурса истощает его и это касается всех участников. Слабая обратная связь усугубляет состояние ресурса и может его истощить.

Выход: Убеждение и обучение потребителей. Приватизация ресурса. Регулирования доступа к ресурсу.

- Пропуск машин на дороге
- Ожидание опоздающих пассажиров
- Рыболовство
- Иммигранты
- Доступ в национальные парки и исторические места
- Использование ископаемого топлива
- Ограничение рождаемости
- Падение репутации фирмы при работе с конкурирующими поставщиками

Правила управления коллективной собственностью

Описаны Элино́р Остро́м в книге “Управляя общим”:

1. Четко установленные границы
2. Соответствующие местным условиям правила
3. Площадки для коллективного выбора
4. Система мониторинга
5. Градуированные санкции
6. Механизм решения конфликтов
7. Признание права за организацией со стороны государства
8. Вложенные структуры

Общественный институт -- это установленная сообществом система правил и мероприятий по их выполнению с целью выполнения необходимых этим же людям функций

Сопротивление внешнему влиянию

Ловушка: Интуитивно верные изменения в сложной системе не приводят к большим изменениям, из-за противодействия остальных частей системы.

Выход: Снять давление. Найти компромисс. Поставить общую цель. Найти рычаг.

Рычаг: Зачастую расположен во времени и пространстве не там, где проблема

- Перепроизводство
- Борьба с наркотиками
- Увеличение населения через запрет абортов (Румыния, 1967)
- “Сухой” закон
- Учеба

Принцип Ле Шателье

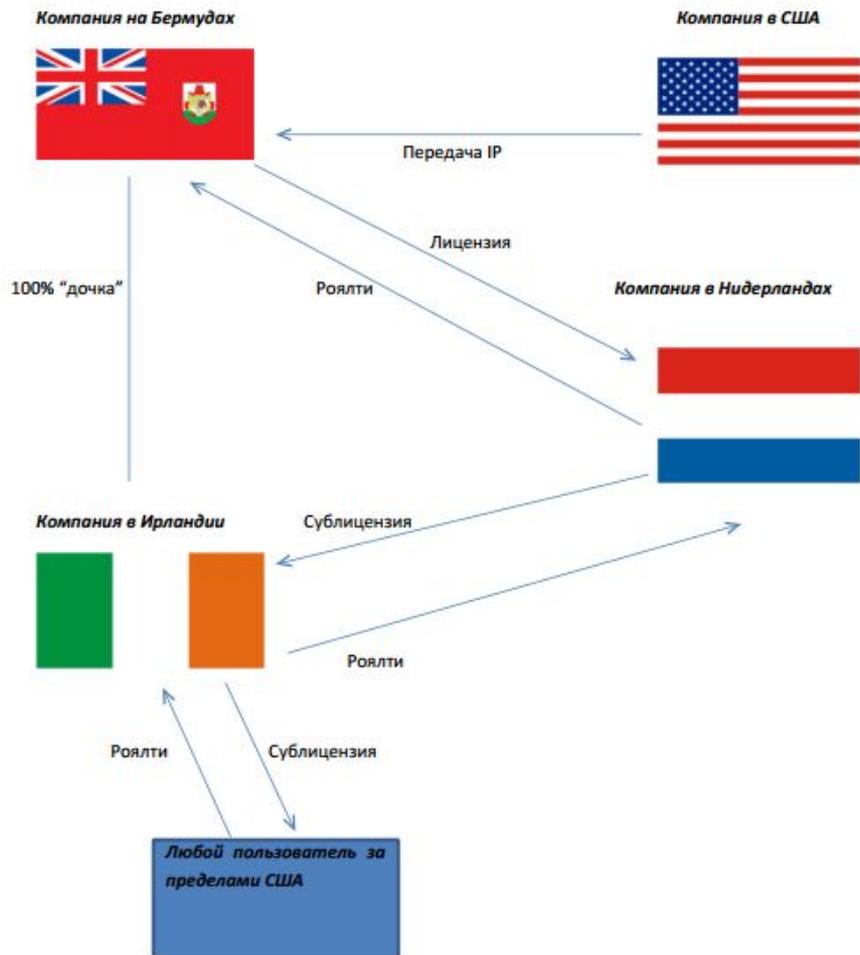
Система стремится измениться таким образом, чтобы свести к минимуму эффект внешнего воздействия



Индийские родители помогают своим детям на экзамене



Ввиду большого количества кобр британские власти Индии ввели награду за их поимку, но местные жители начали выращивать змей, чтобы гарантированно получить вознаграждение



До недавнего времени большие американские корпорации создавали несколько компаний в разных юрисдикциях, чтобы пользоваться юридическими лазейками платить меньше налогов с продаж за пределами США.

Так, налог одной из ирландских "дочек" Apple однажды составил 0.005% годовых.

Рост и недоинвестирование

Ловушка: Ограничения роста можно снять инвестициями, но это откладывается либо делается недостаточно быстро.

Выход: Нужно расширять мощности с опережением. Не отступать от заданных целей.

- Грандиозные планы, не подкрепленные временем и усилиями
- Рост в угоду падению качества продукции



Сравните состояние наших дорог и тротуаров и их постоянное “латание” с тем, как [это происходит в Германии](#)

Перекладывание проблемы

Ловушка: Способность системы “держаться на плаву” ухудшается вследствие помощи извне, в долгосрочной перспективе система становится зависимой от этой помощи

Выход: Думать о долговременном решении проблем. “Учить ловить рыбу, а не давать еду”.

- Воспитание детей
- Господдержка неимущих
- Поддержка стран 3-го мира

Манипулирование правилами

Ловушка: Манипулирование правилами или целями сопровождается формальным их исполнением, что отдаляет систему от нормы

Выход: Переработать правила так, чтобы творческая изобретательность направлялась на достижение настоящих целей.

- Траты бюджета в конце года
- Закон об исчезающих видах (США)

Стремление к неверной цели

Ловушка: Если цели системы определены неточно, то система послушно стремится к ним, достигая результата, которого никто не ожидал.

Выход: Использовать цели и показатели, характеризующие реальное благополучие системы. Не путать результаты и усилия по их достижению.

- ВВП как критерий благополучия
- Диплом об образовании
- Служба исполнения наказания
- «Белорусский» Джобс

Точки воздействия на систему (Д. Медоуз)

Численные показатели
Буферы (запасы)
Структура

Изменение параметров не влияет существенно, пока не затрагивает более важные позиции
Большие запасы лучше маленьких, но при этом теряется гибкость и скорость изменений
Изменение структуры -- самый медленный и дорогой способ изменения системы

Запаздывания
Циклы обратной связи

При больших запаздываниях система не может реагировать быстро
Наоборот, слишком быстрые запаздывания приводят к резкой реакции
Балансирующие циклы -- “аварийные” механизмы системы
Усмирение роста эффективнее балансирующих циклов, но без этого невозможно развитие

Инфопотоки
Правила, политика

Нехватка инфопотоков в нужном месте и виде -- причина “плохой” работы систем
Часто они отсутствуют, чтобы избежать ответственности за свои действия
Правила определяют цели, границы, степени свободы системы

Саморганизация
Цели
Мировоззрение

При достаточном разнообразии системы могут сами изменять вышеперечисленные точки
Цель подчиняет средства
Наше мировоззрение -- набор парадигм, который меняется под воздействием неспоримых доказательств

Источники

- А. Борщев. [От системной динамики и традиционного имитационного моделирования — к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты](#)
- Д. М. Жилин. Теория систем. Опыт построения курса — Москва, Либроком, 2010.
- Медоуз Д. Алфавит системного мышления — Москва, БИНОМ, 2011.
- С. Багузин. [Моделирование системной динамики в iThink](#)
- И. Ф. Цисарь. [Моделирование экономики в iThink STELLA. Кризисы, налоги, инфляция, банки](#) — Москва, Диалог-МИФИ, 2009.
- Дж. Форрестер. [Мировая динамика](#) — Москва, АСТ, 2003.
- [Мировая модель World3](#) (InsightMaker)
- [Мировая модель World3](#) (Javascript)