



УРАЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭКОНОМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Имитационное моделирование экономических процессов

Тема 1: Технология и методы имитационного моделирования

Методы имитационного моделирования

Кислицын Евгений Витальевич
кандидат экономических наук

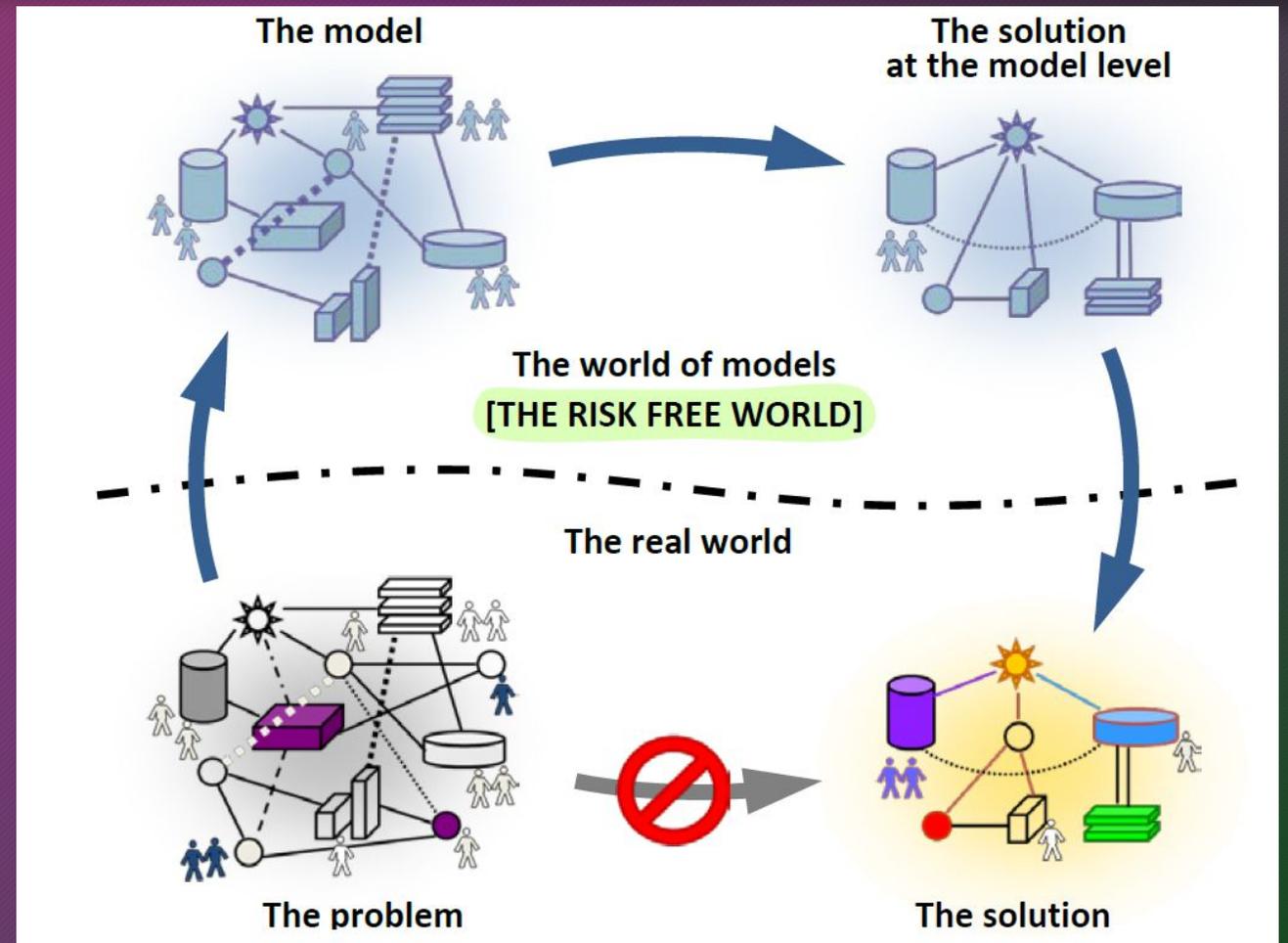
доцент кафедры информационных технологий и статистики



УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

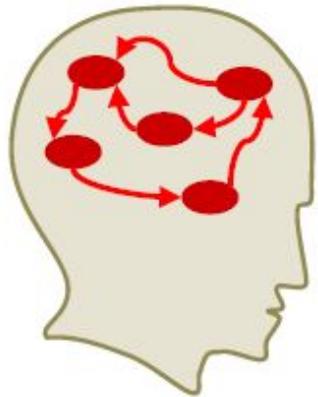
Основы моделирования

Моделирование

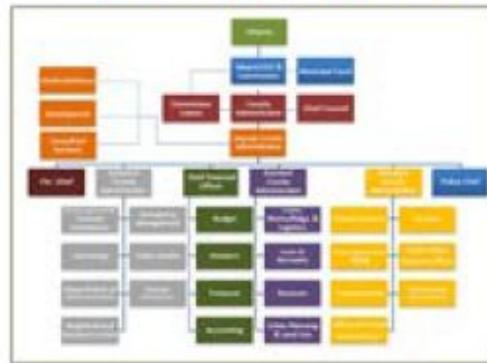


Типы моделей

Mental models



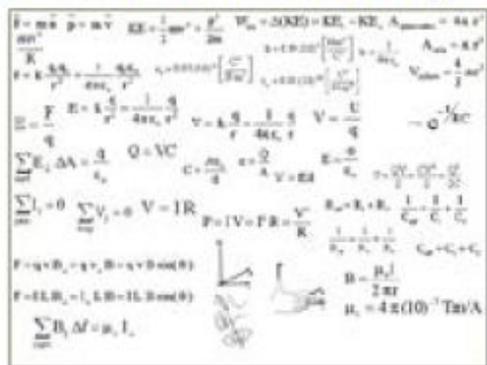
Boxes and arrows



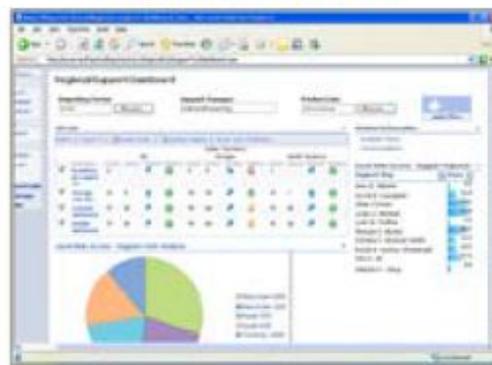
Physical models



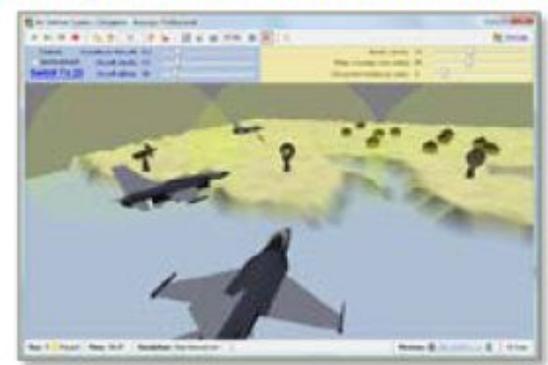
Formulas on a sheet of paper



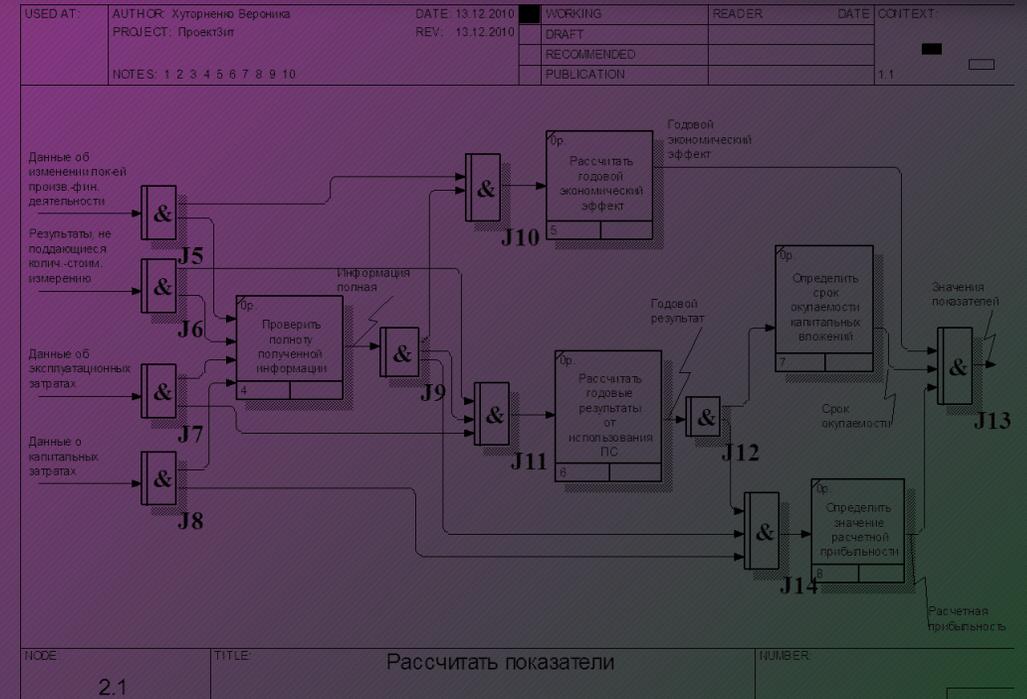
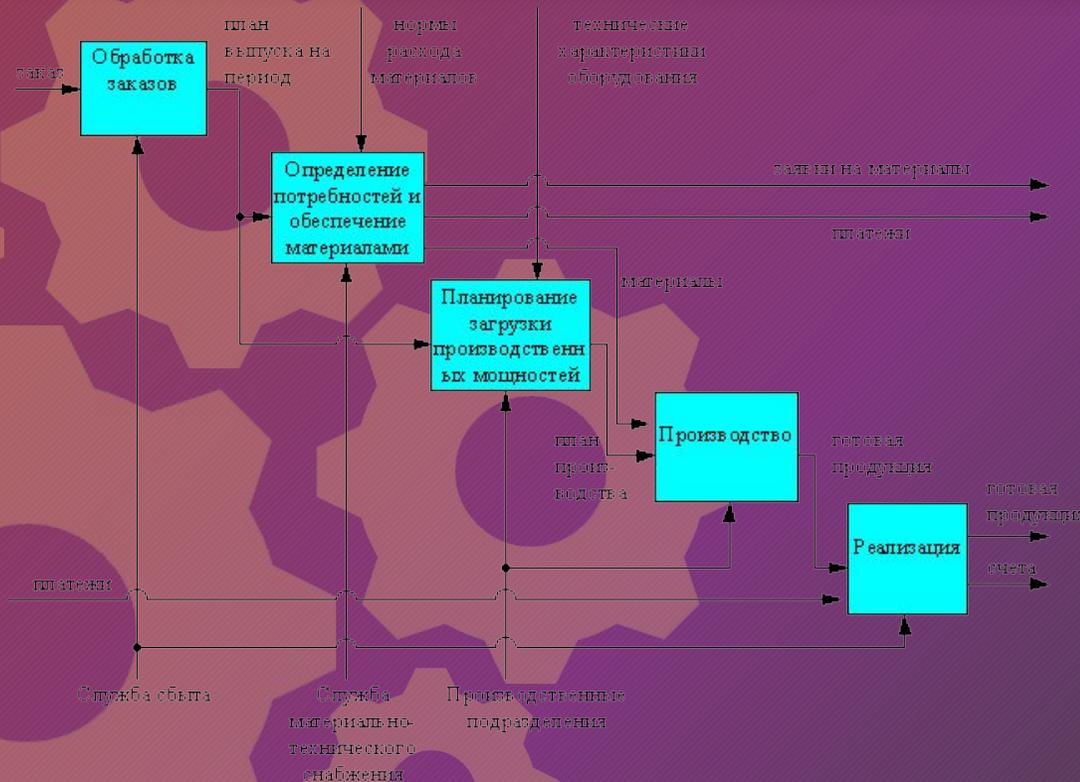
Spreadsheets



Computer simulation models



Структурно-функциональные модели



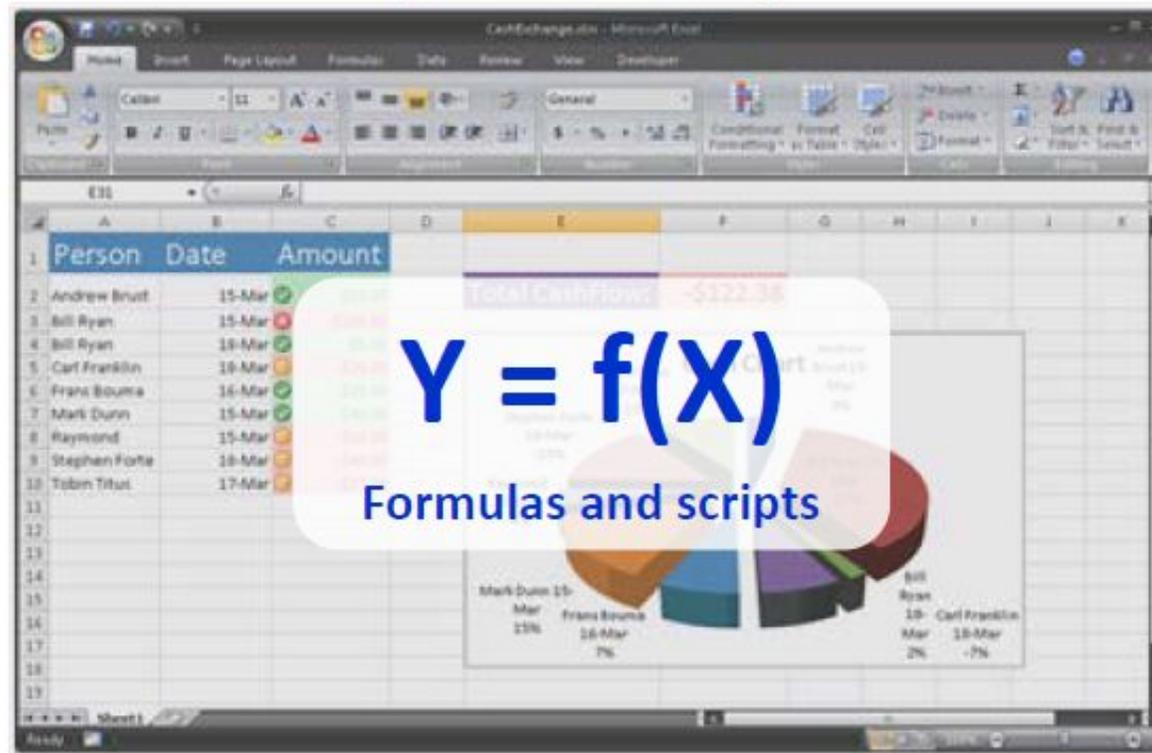
Аналитическая модель

Inputs

X_1
 X_2
 X_3
 X_4



Calculate!



Outputs

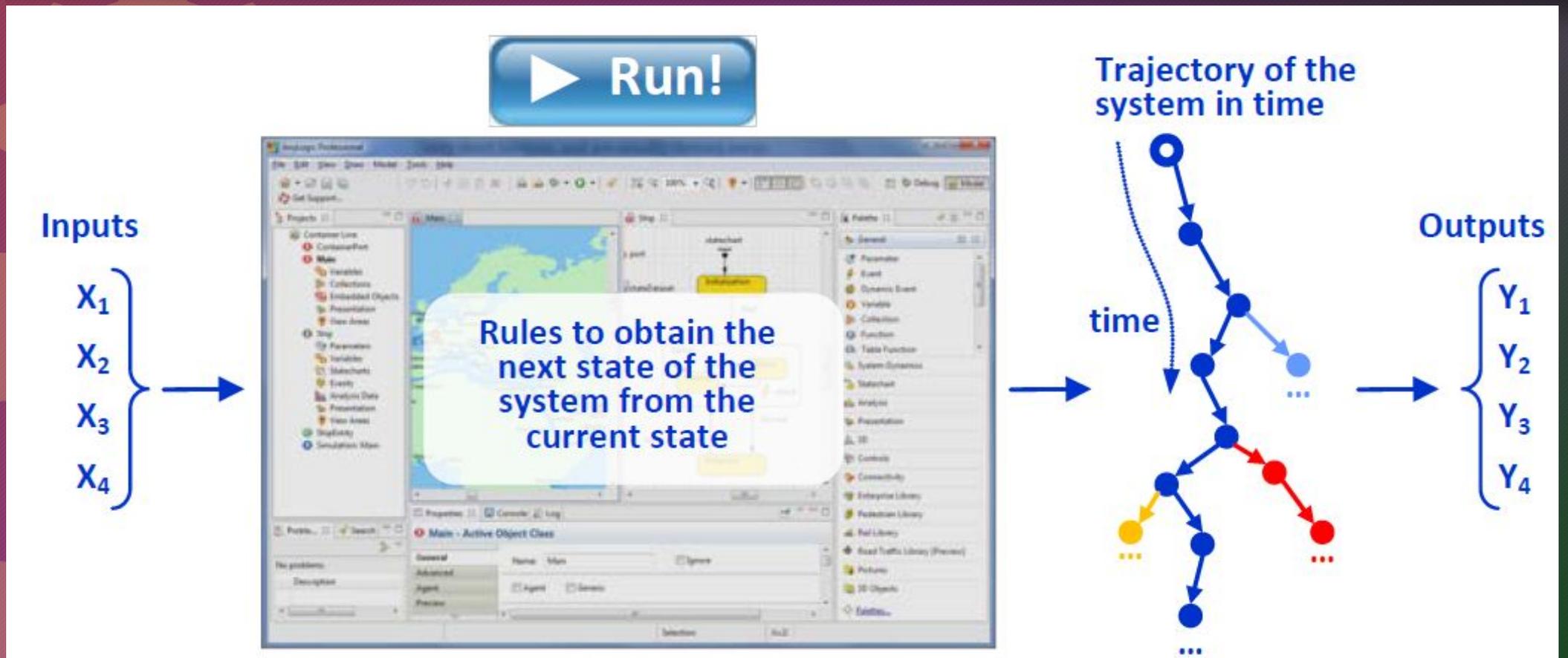
Y_1
 Y_2
 Y_3
 Y_4



Особенности динамических систем

- нелинейное поведение;
- наличие «памяти»;
- наличие неявного влияния одних переменных на другие;
- временные и причинно-следственные зависимости;
- все вышеперечисленное в сочетании с неопределенностью и большим количеством параметров.

Имитационная модель



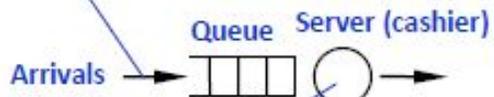
Очередь в банк

В среднем λ клиентов в час входит в банк.
Предположим, что в банке только один кассир и в среднем он обслуживает μ клиентов в час (среднее время обслуживания $1/\mu$).
Необходимо рассчитать время ожидания клиента, длину очереди и загруженность кассира.

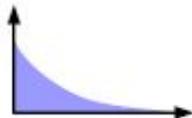


Модели массового обслуживания в банке

Poisson stream (independent arrivals)
On average λ clients per hour



Service time exponentially distributed
On average μ per hour



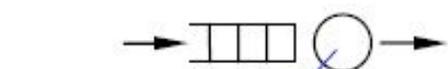
M/M/1

Server utilization*: $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$

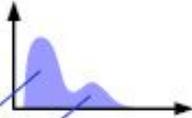
Average waiting time: $W = \frac{\rho}{\mu - \lambda}$

Average queue length*: $L = \lambda W$ (Little's law)

*These formulas are valid for all cases



Arbitrary distribution of service time
On average μ per hour



Simple operations like check cashing

Complex operations like collect new credit card

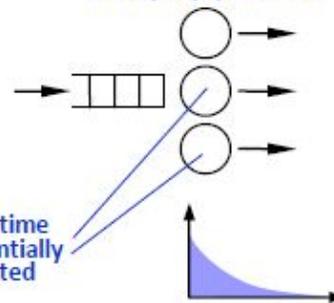
M/G/1

Pollaczek-Khinchine formula:

Average waiting time: $W = \frac{\lambda(1 + C_z^2)}{2\mu^2(1 - \rho)}$

where C_z is coefficient of variation of service time

Multiple (K) cashiers



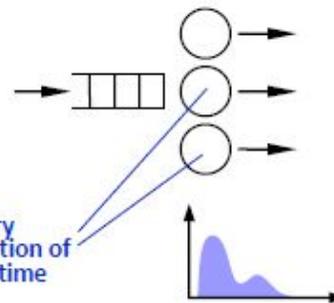
Service time exponentially distributed

M/M/K

Average waiting time: $W = \frac{P}{K\mu(1 - \rho)}$

$P = \frac{(K\rho)^K}{K!(1 - \rho)} P_0$

$P_0 = \left[\frac{(K\rho)^K}{K!(1 - \rho)} + \sum_{i=0}^{K-1} \frac{(K\rho)^i}{i!} \right]^{-1}$



Arbitrary distribution of service time

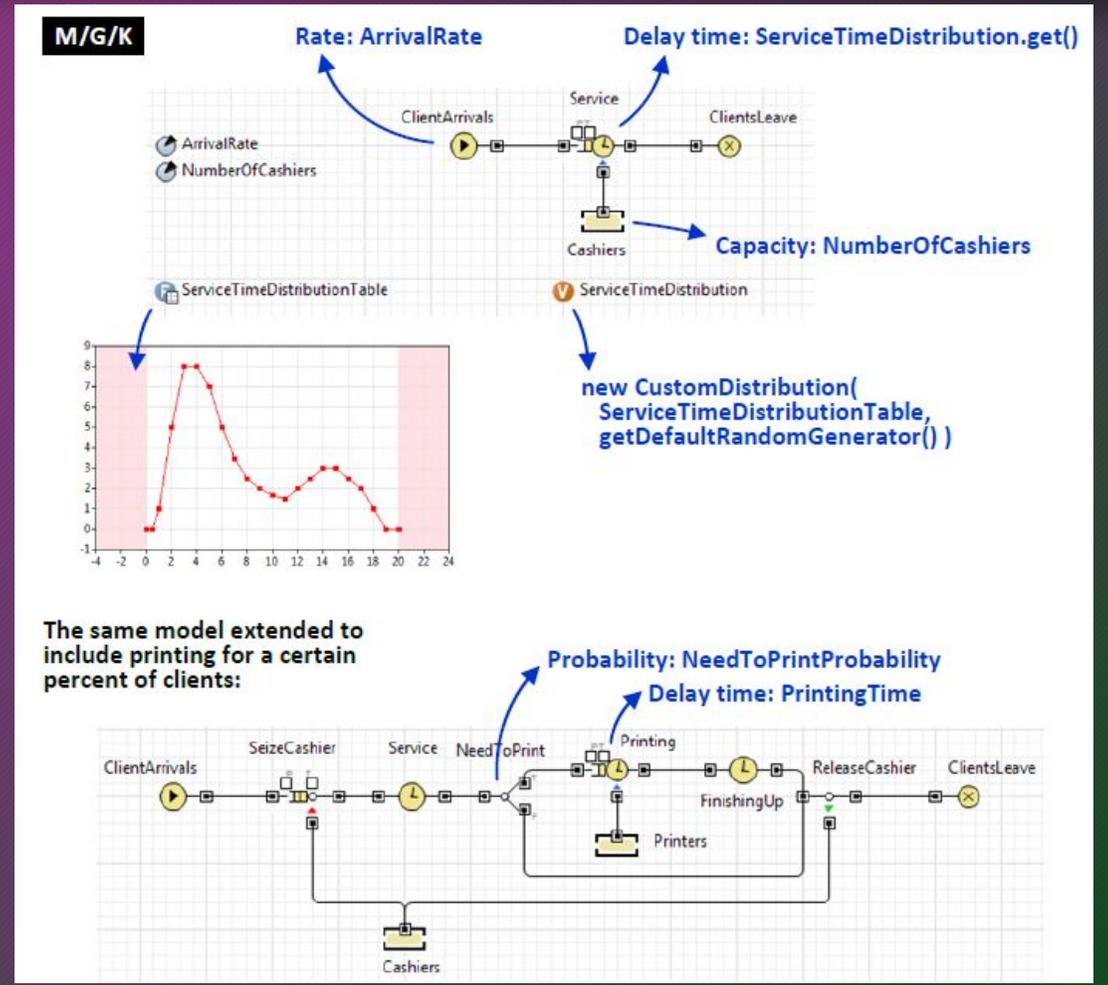
M/G/K

Analytic solution does not exist

Any further complication of the service process

Analytic solution does not exist

Имитационная модель банка



Преимущества имитационного моделирования

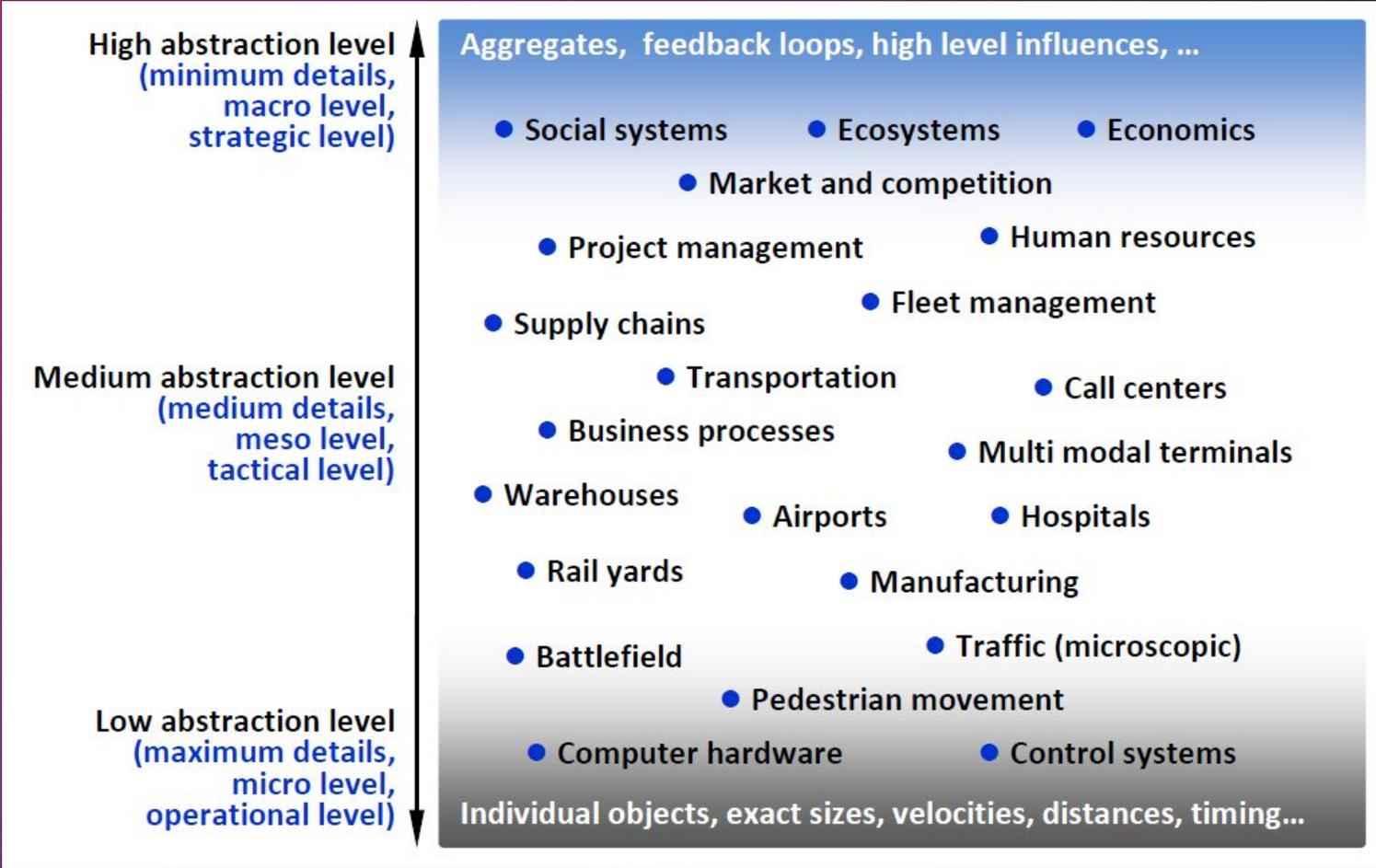
- Имитационные модели позволяют анализировать системы и находить решения там, где другие методы не способны.
- После выбора соответствующего уровня абстракции разработка имитационной модели является более простым процессом, чем аналитическое моделирование.
- Структура имитационной модели естественным образом отражает структуру реальной системы.
- Имитационная модель позволяет измерить значения любых переменных, соответствующих выбранному уровню абстракции.
- Возможность анимации в модели.
- Большая убедительность, по сравнению с таблицами или презентациями.

Уровни абстракции

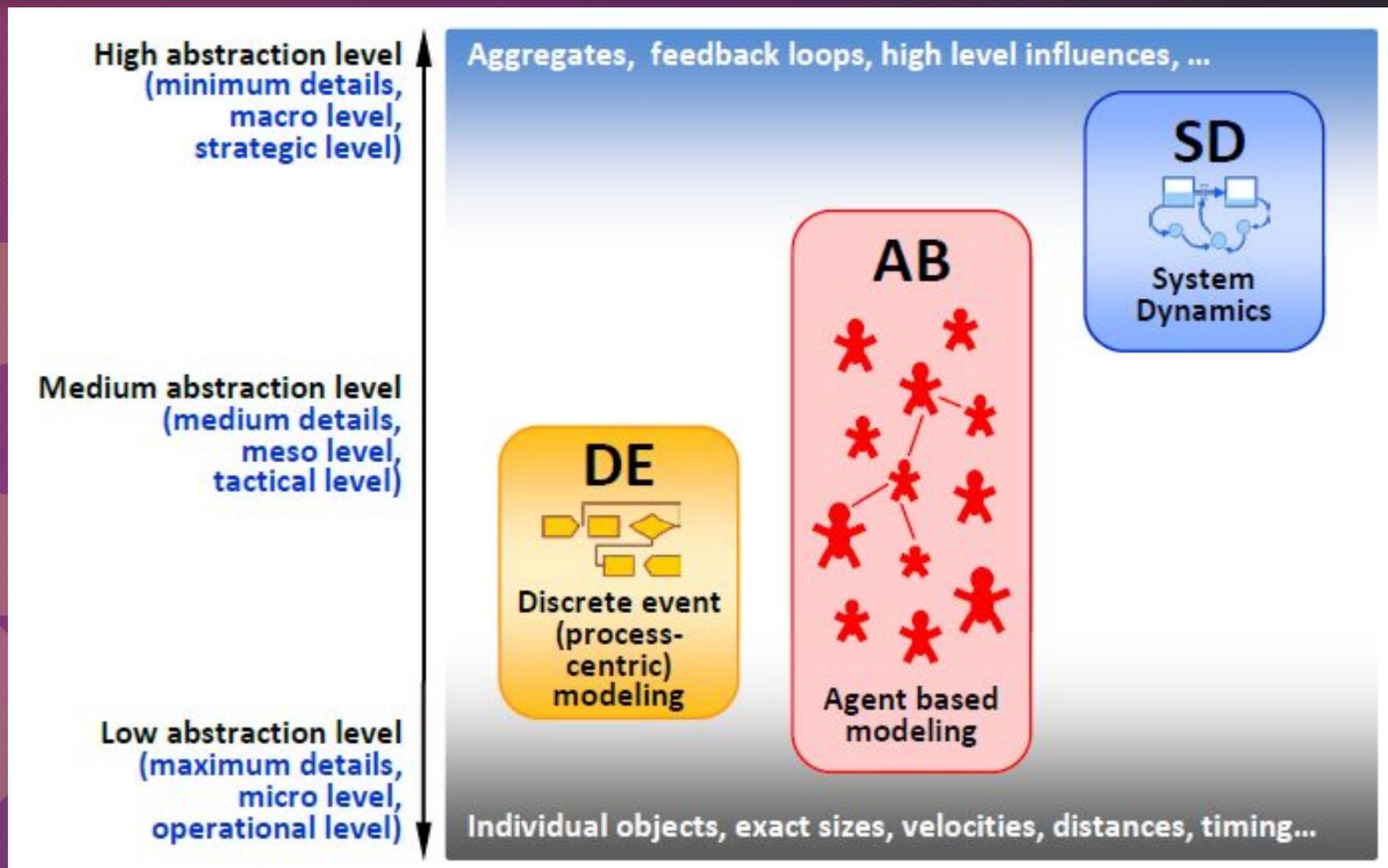
Высокий уровень абстракции: минимальная детализация, макроуровень, стратегический уровень

Средний уровень абстракции: средняя детализация, мезоуровень, тактический уровень

Низкий уровень абстракции: максимальная детализация, микроуровень, операционный уровень



Методы имитационного моделирования



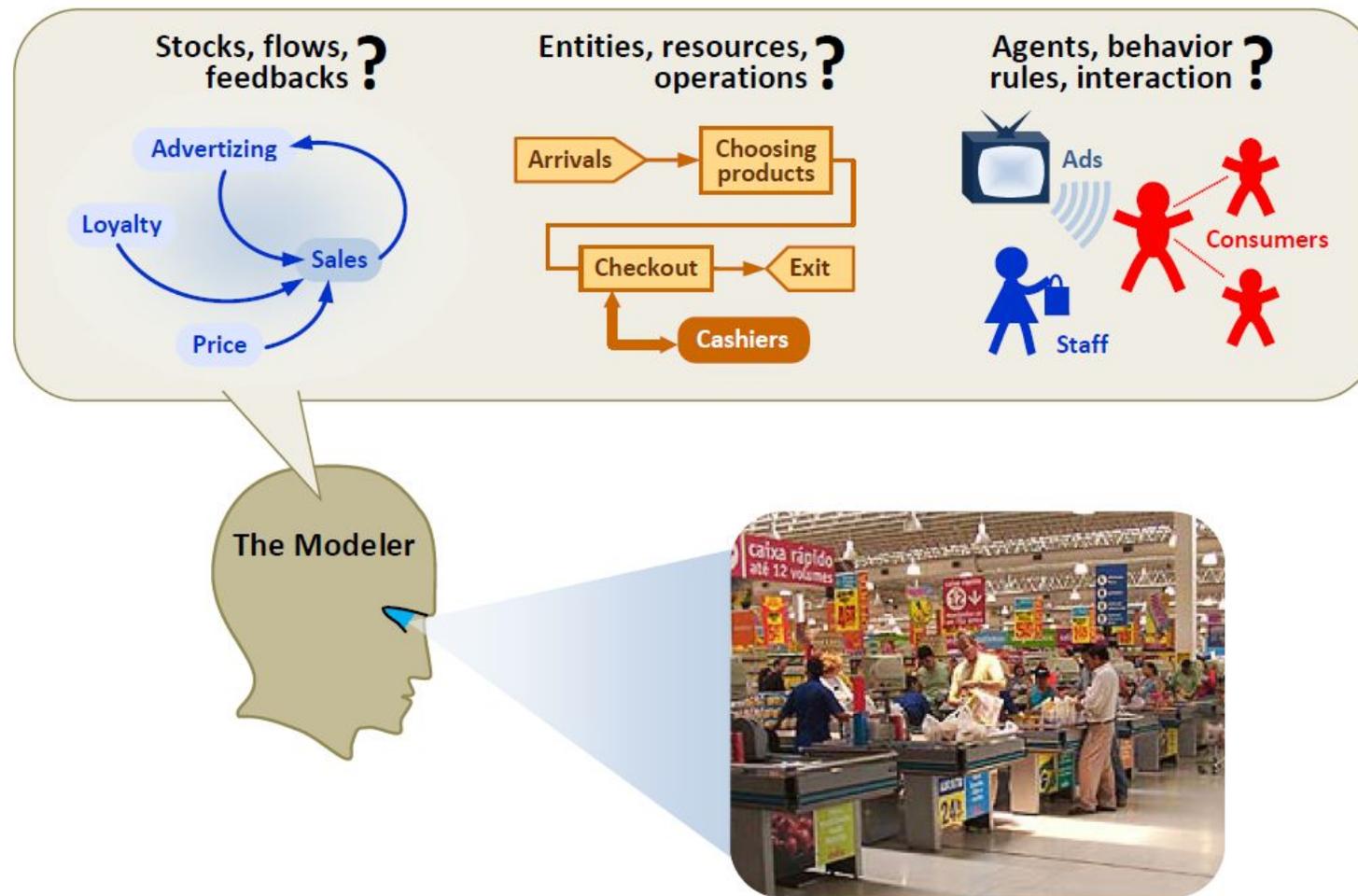


УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Три подхода к имитационному моделированию

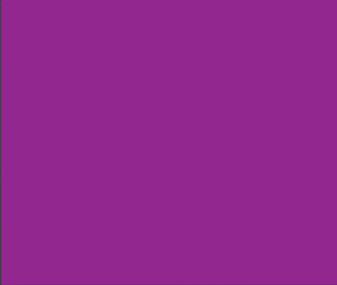
Выбор метода моделирования

- ✓ Системная динамика
- ✓ Дискретно-событийное моделирование
- ✓ Агентное моделирование





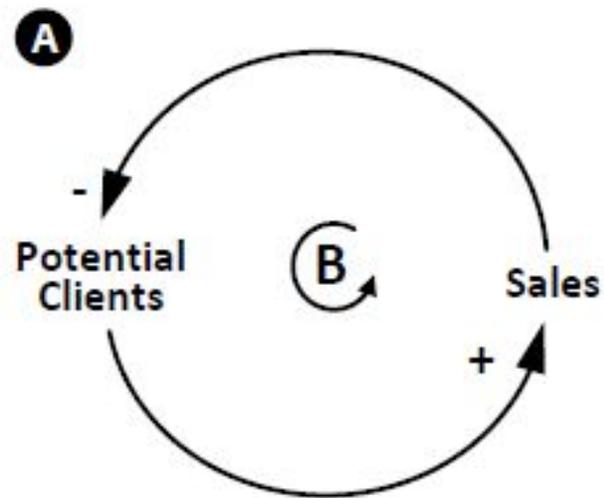
Системная динамика



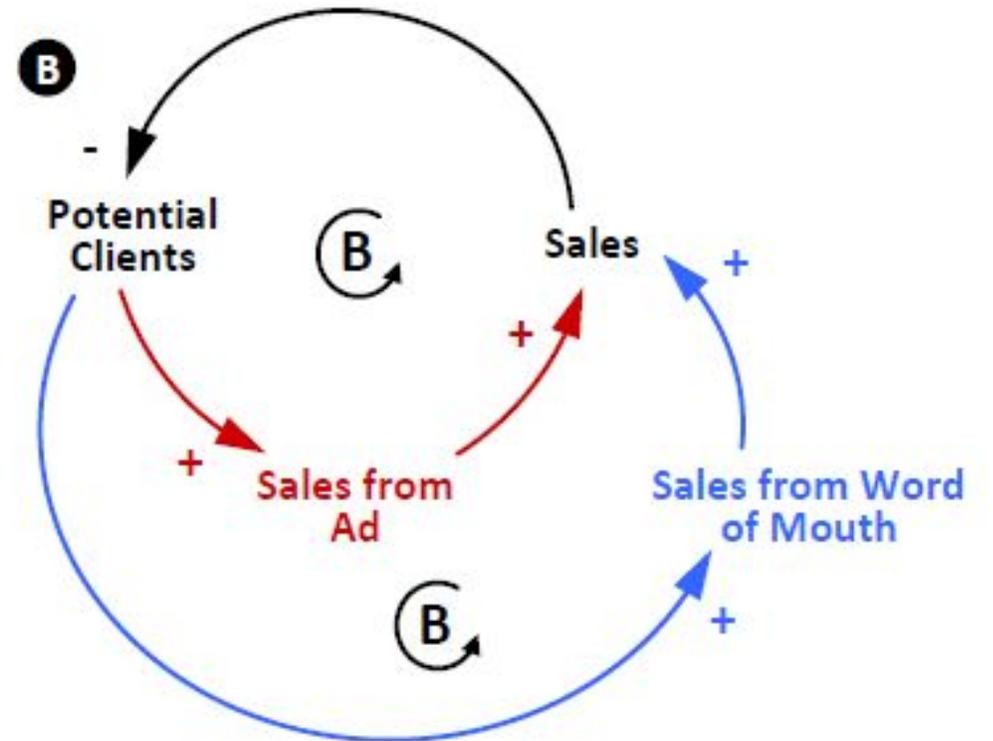
Системная динамика

- Системная динамика - это метод изучения динамических систем, предполагающий что:
 - принимается эндогенная точка зрения;
 - основа системной динамики - петли обратной связи;
 - необходимо определить накопители и потоки, которые влияют на них;
 - система рассматривается с определенной точки зрения. Необходимо рассматривать отдельные события и решения как поверхностные явления, зависящие от структуры и поведения системы.

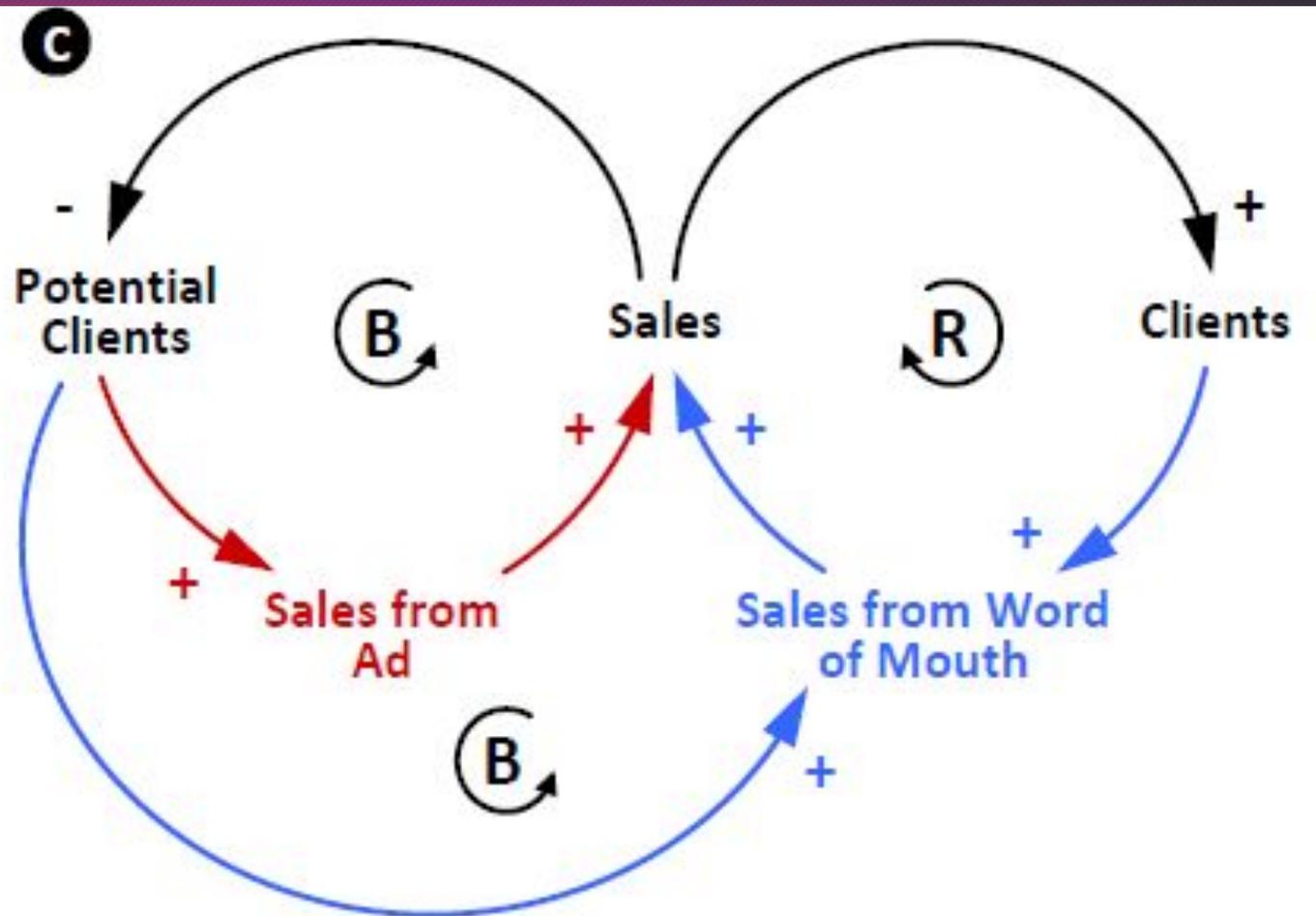
Модель системной динамики распространения нового продукта



A, B, C: Causal loop diagrams

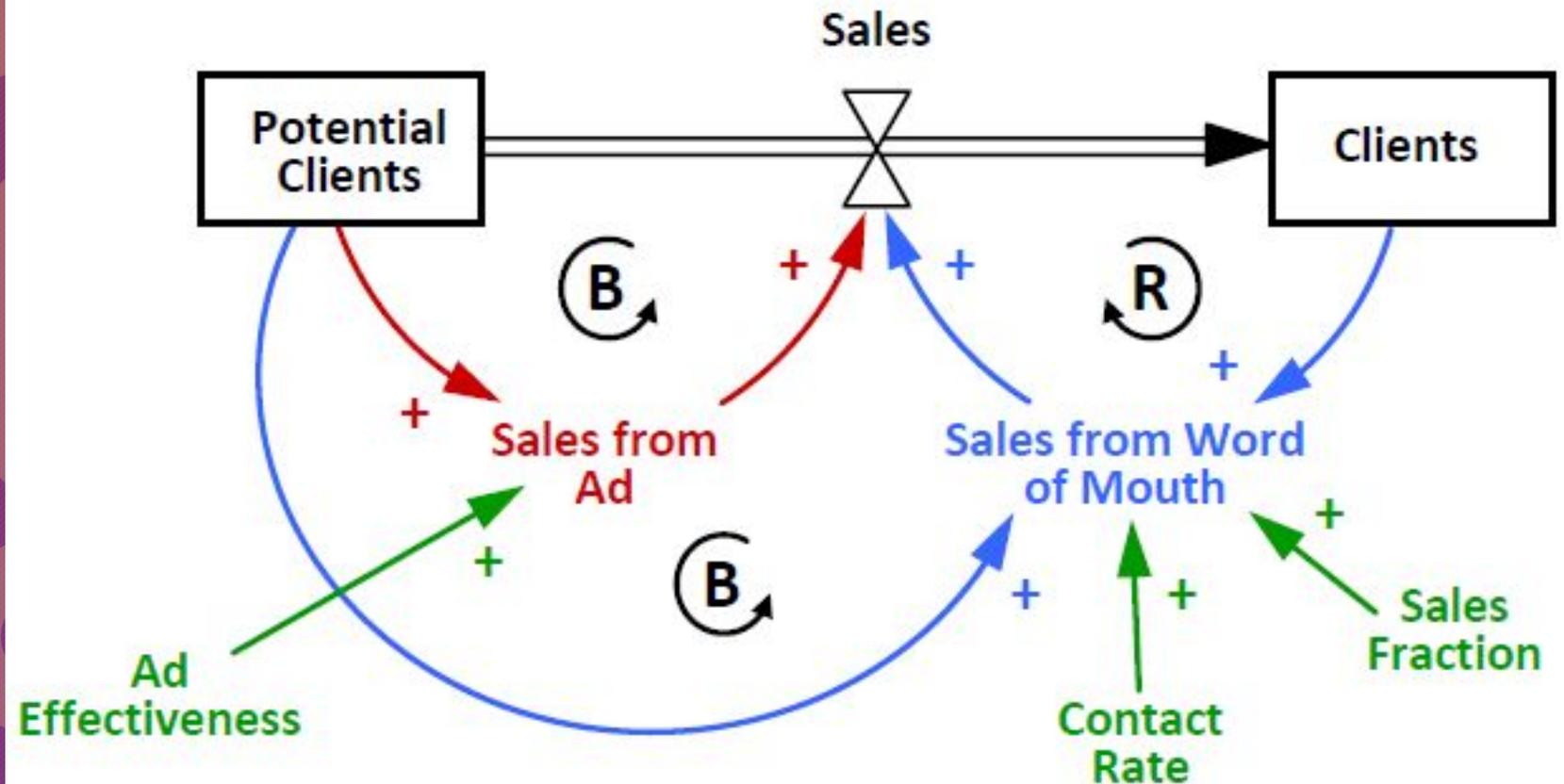


Модель системной динамики распространения нового продукта



Модель системной динамики распространения нового продукта

D Stock and flow diagram



Модель системной динамики распространения нового продукта

$$\frac{d(PotentialClients)}{dt} = -Sales$$

$$\frac{d(Clients)}{dt} = Sales$$

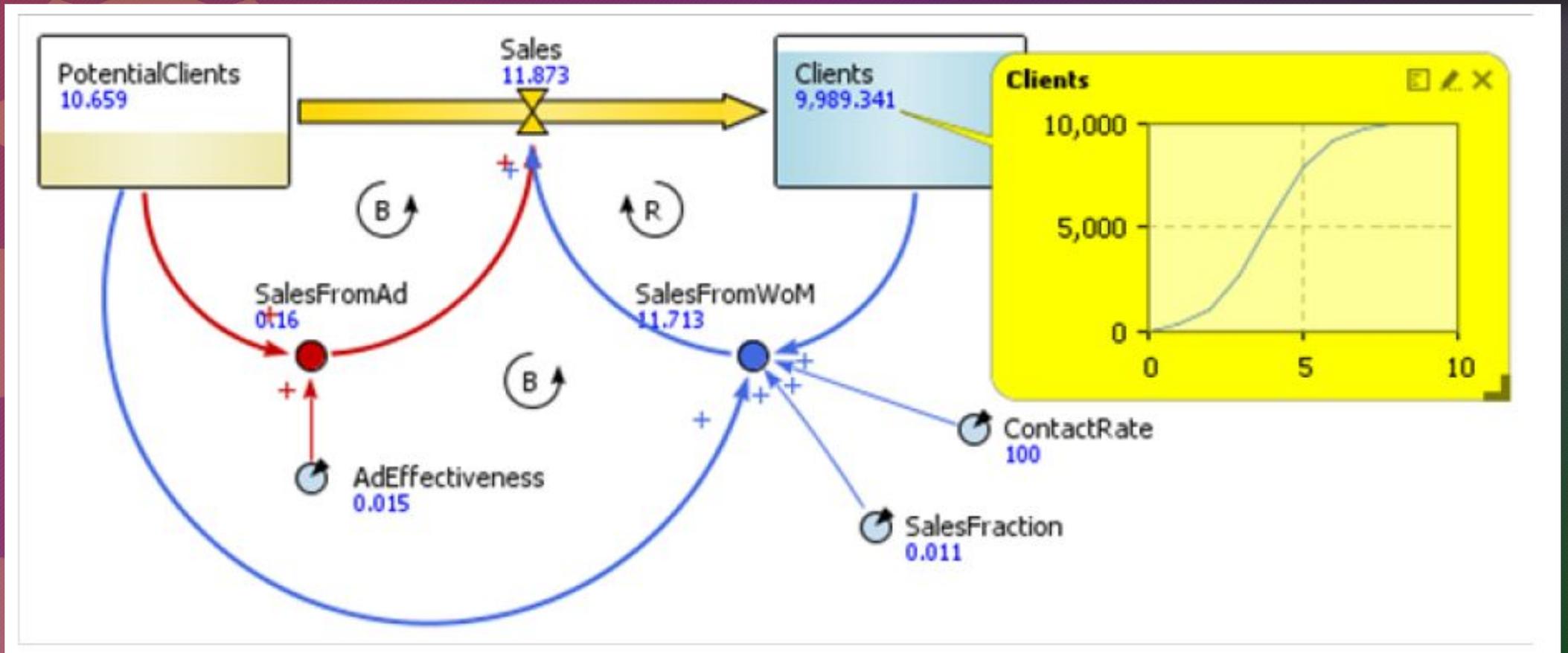
$$Sales = SalesFromAd + SalesFromWordofMouth$$

$$SalesFromAd = PotentialClients \times AdEffectiveness$$

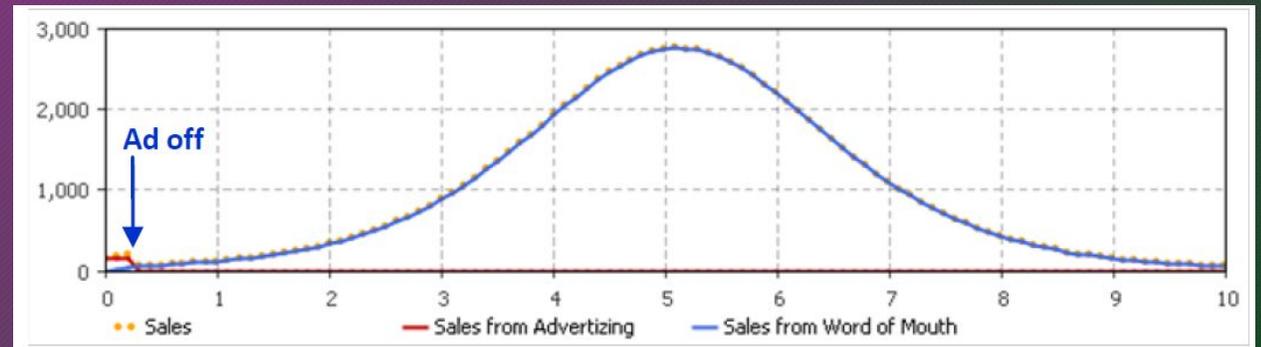
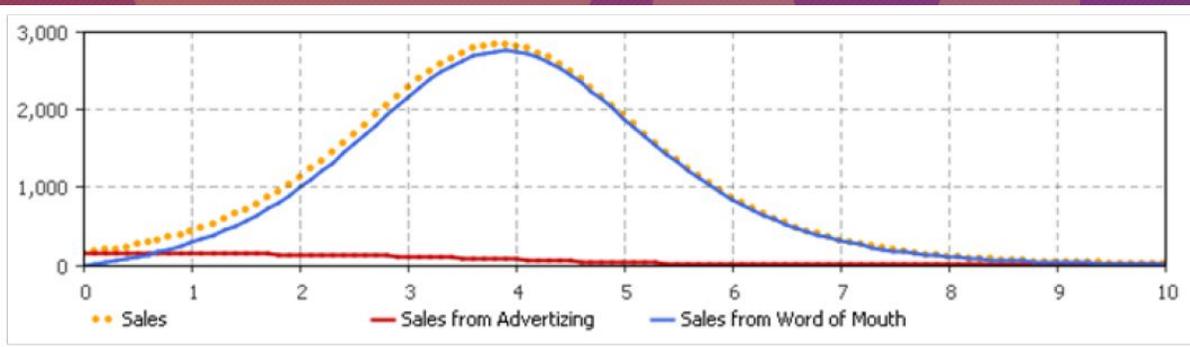
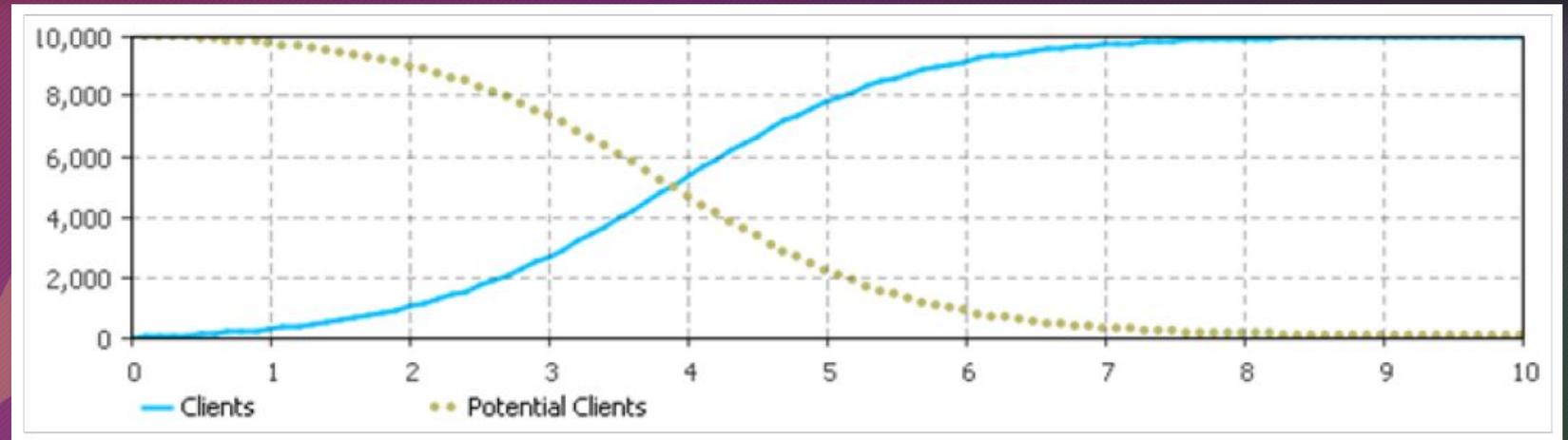
$$SalesFromWordofMouth =$$

$$Clients \times ContactRate \times \frac{PotentialClients}{PotentialClients + Clients} \times SalesFraction$$

Модель распространения нового продукта в процессе выполнения

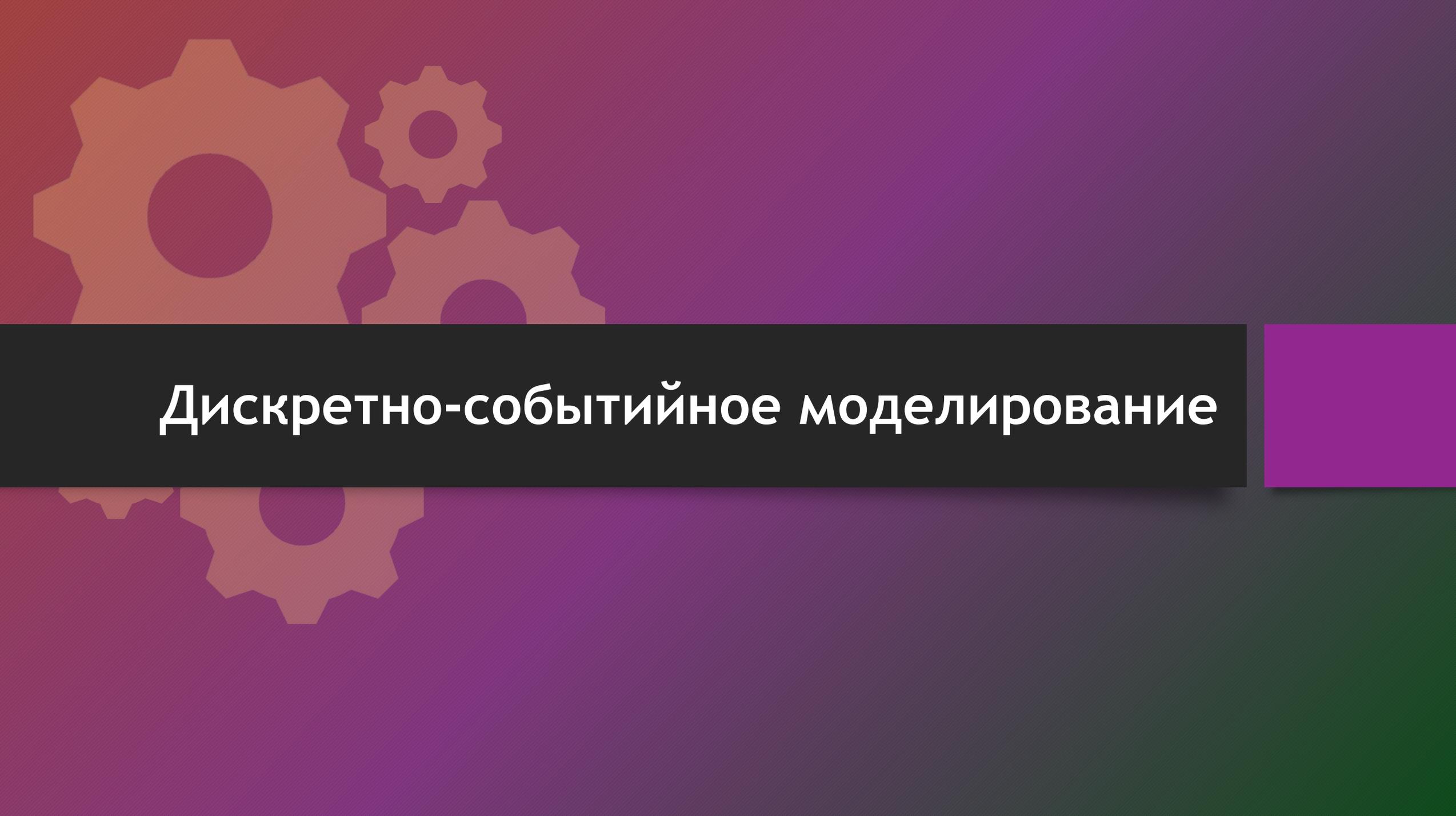


Выводы по модели распространения нового продукта



Инструменты системной динамики

- Vensim
 - AnyLogic
 - iThink / STELLA
 - Powersim
- 



Дискретно-событийное моделирование

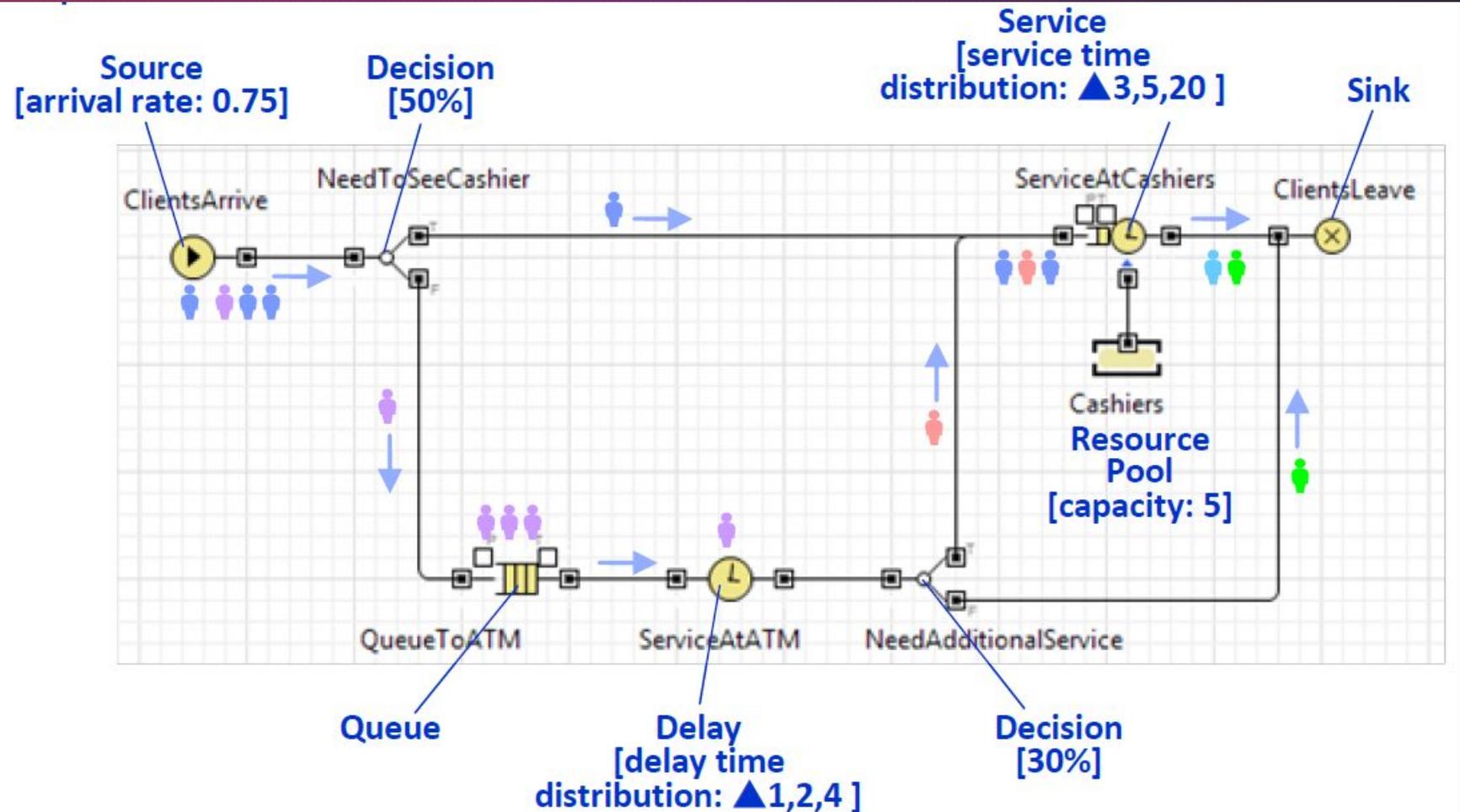
Дискретно-событийное моделирование

- Идея метода дискретно-событийного моделирования такова: исследователь рассматривает моделируемую систему как процесс, т. е. последовательность операций, выполняемых между объектами.
- Заявки могут представлять собой клиентов, пациентов, телефонные звонки, документы (физические и электронные), детали, продукты, поддоны, компьютерные транзакции, транспортные средства, задачи, проекты и идеи.
- Ресурсы представляют собой различных сотрудников, врачей, операторов, рабочих, серверы, процессоры, компьютерную память, оборудование и транспорт.

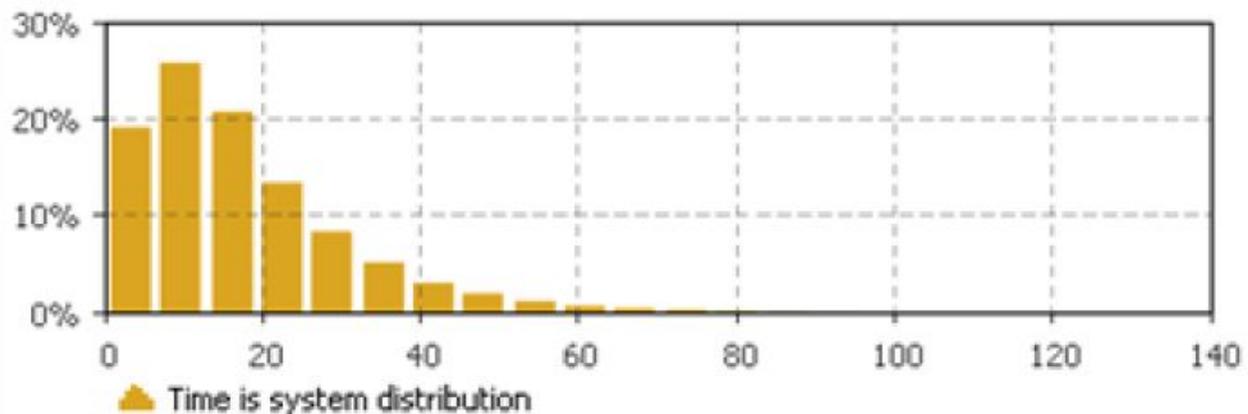
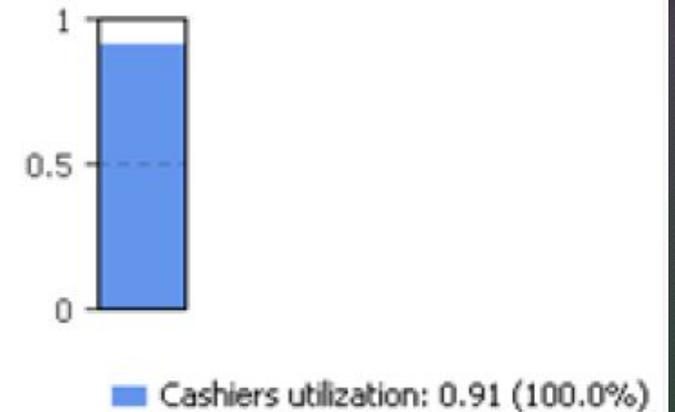
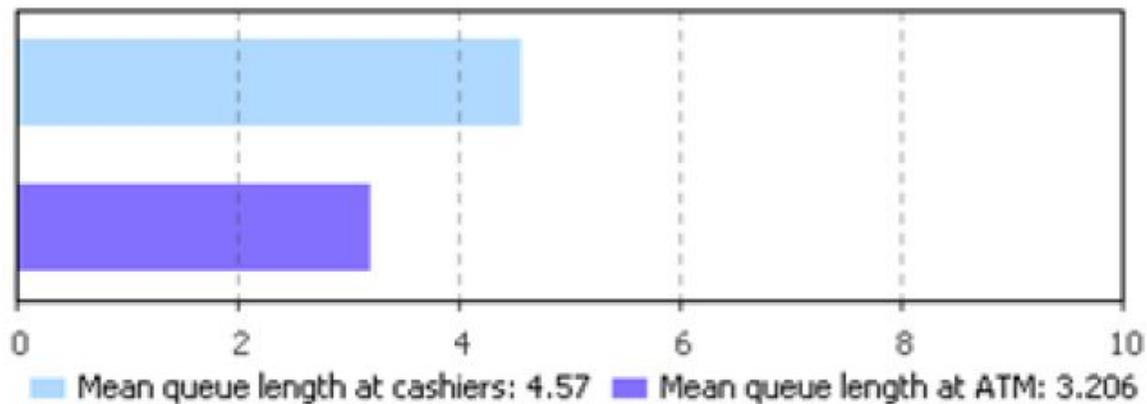
Дискретно-событийная модель банка

- Начальные условия:
 - В среднем в банк поступает 45 клиентов в час.
 - Войдя в банк, половина клиентов идет к банкомату, а другая половина идет прямо к кассирам.
 - Использование банкомата минимум 1 минута, максимум 4 минуты, и наиболее вероятная продолжительность 2 минуты.
 - Обслуживание с кассиром занимает минимум 3 минуты и максимум 20 минут, с наиболее вероятной продолжительностью 5 минут.
 - После использования банкомата 30% клиентов обращаются к кассирам. Остальные выходят из банка.
 - В банке 5 кассиров, и есть одна общая очередь для всех кассиров.
 - После обслуживания кассиром клиенты выходят из банка.
- Задачи:
 - Загруженность кассиров
 - Средняя длина очереди, как к банкомату, так и к кассирам
 - Сколько времени клиент проводит в банке.

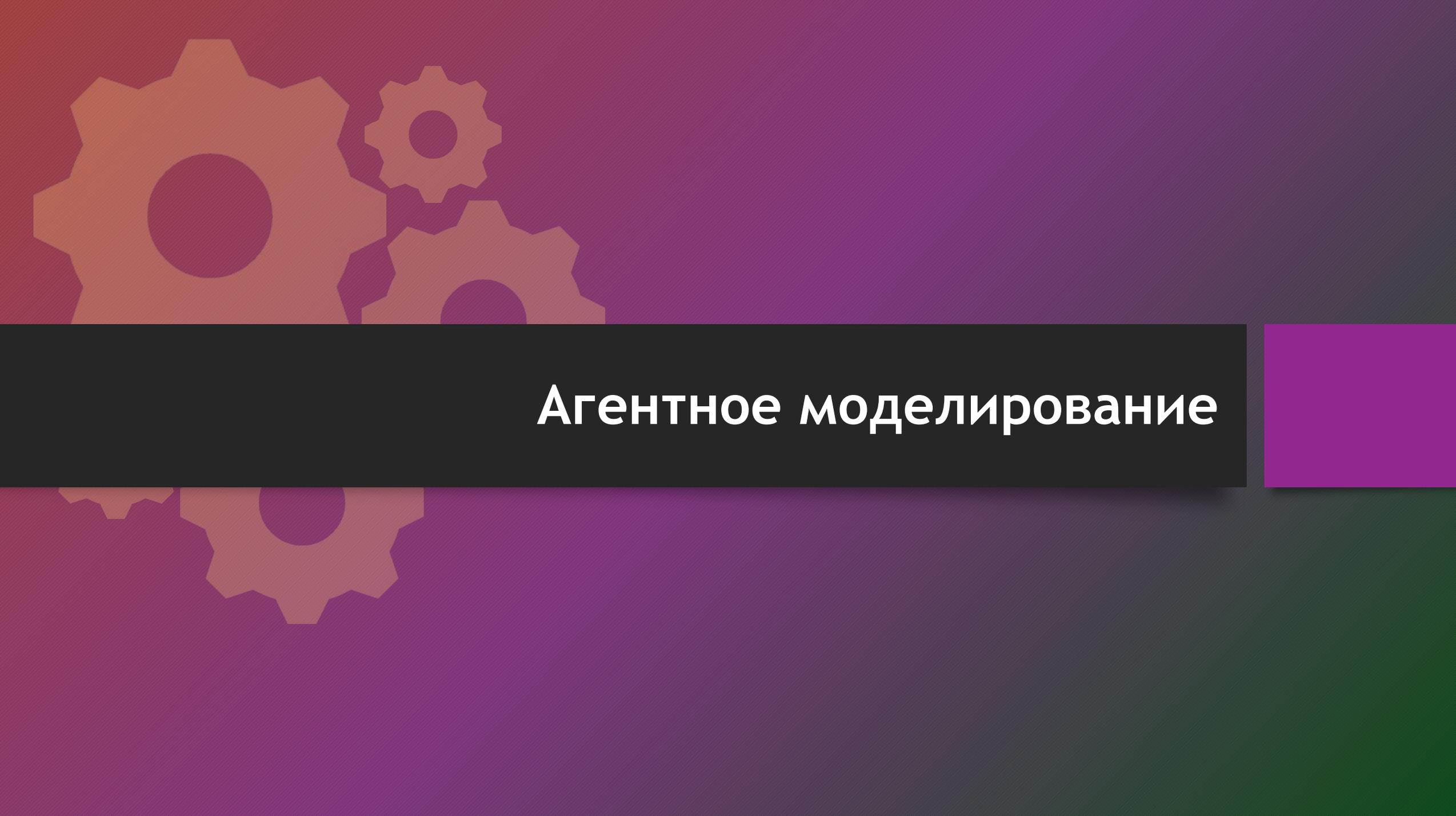
Дискретно-событийная модель банка



Выходная информация в модели банка



Total clients: 71,805
Mean time in bank: 17.607
Minimum time: 1.025
Maximum time: 104.399
Deviation: 13.112



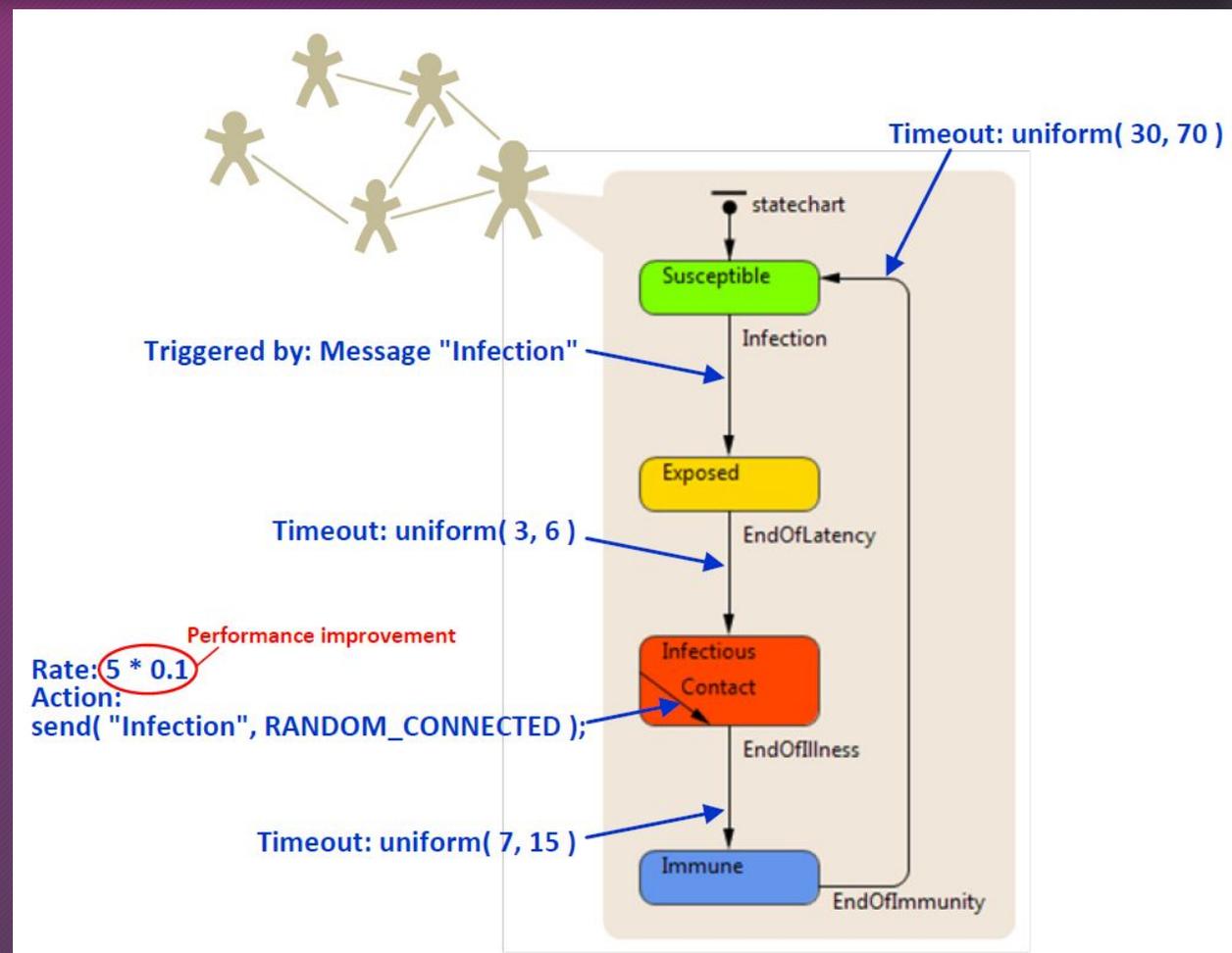
Агентное моделирование

Агентное моделирование

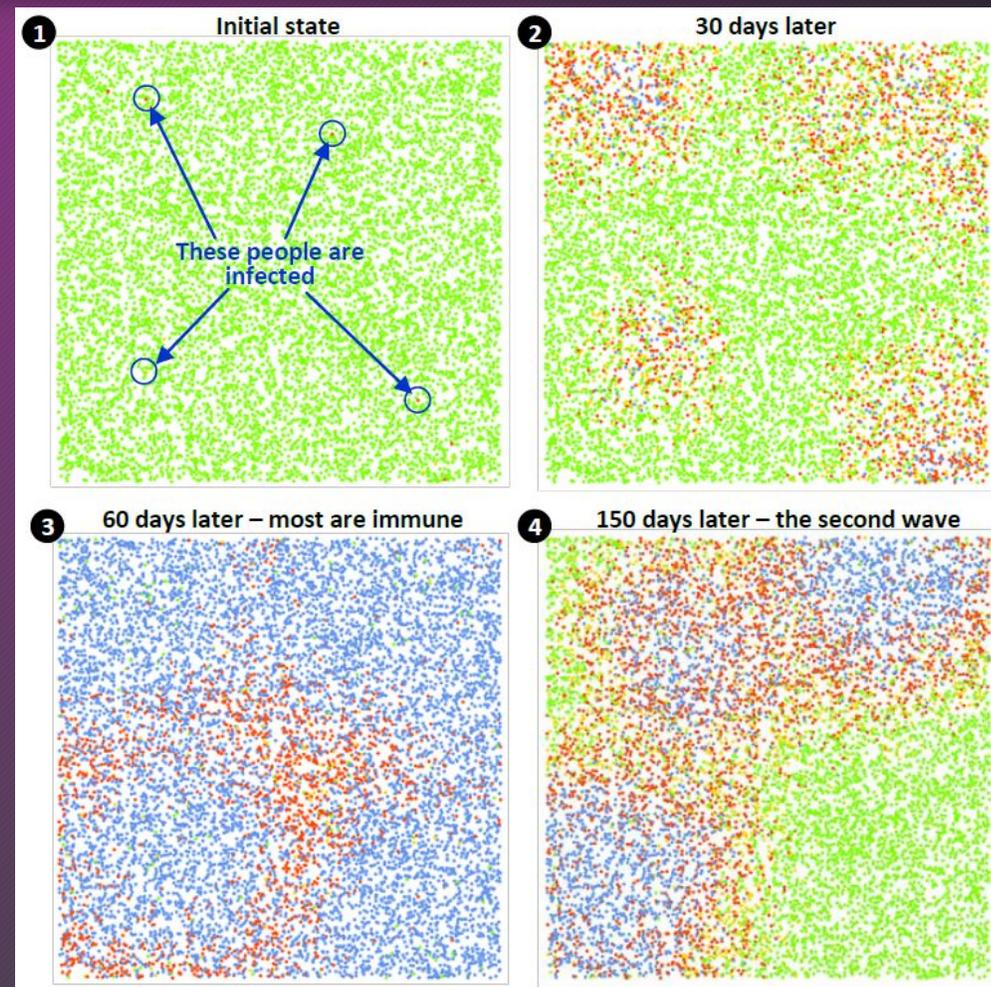
- Возможно, нет данных о том, как ведет себя система в целом, каковы ключевые параметры и зависимости между ними, какие потоки процессов присутствуют в системе. Но есть данные о том, как объекты в системе ведут себя индивидуально. Тогда можно начать построение модели снизу-вверх, идентифицируя эти объекты (агенты) и определяя их поведение.
- Иногда можно подключить агентов друг к другу и позволить им взаимодействовать; в других случаях можно поместить их в среду, которая имеет свою собственную динамику.

Индивидуальное поведение агента в модели распространения инфекции

- Рассмотрим население в 10 000 человек. Они живут на площади размером 10 на 10 километров и равномерно распределены по всей территории.
- Человек в районе знает всех, кто живет в радиусе 1 километра от него, и не знает кого-либо еще.
- 10 случайных людей изначально инфицированы, а все остальные восприимчивы (ни один не иммунен).
- Если инфекционный человек контактирует с восприимчивым, последний заражается с вероятностью 0.1.
- Будучи инфицированным, человек не сразу становится заразным. Есть латентная фаза, которая длится от 3 до 6 дней - exposed.
- Продолжительность болезни после латентной фазы (т. е. продолжительность инфекционной фазы) равномерно распределяется между 7 и 15 днями.
- Во время инфекционной фазы человек в среднем контактирует с 5 людьми в день, которых он знает.
- Когда человек выздоравливает, он становится невосприимчивым к болезни, но не навсегда. Иммунитет сохраняется от 30 до 70 дней.

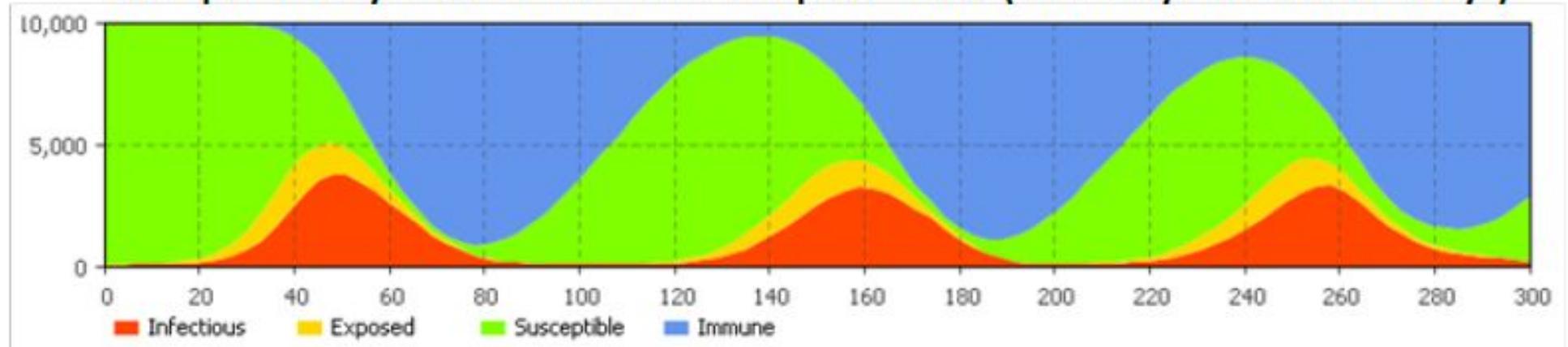


Анимация в модели распространения инфекции

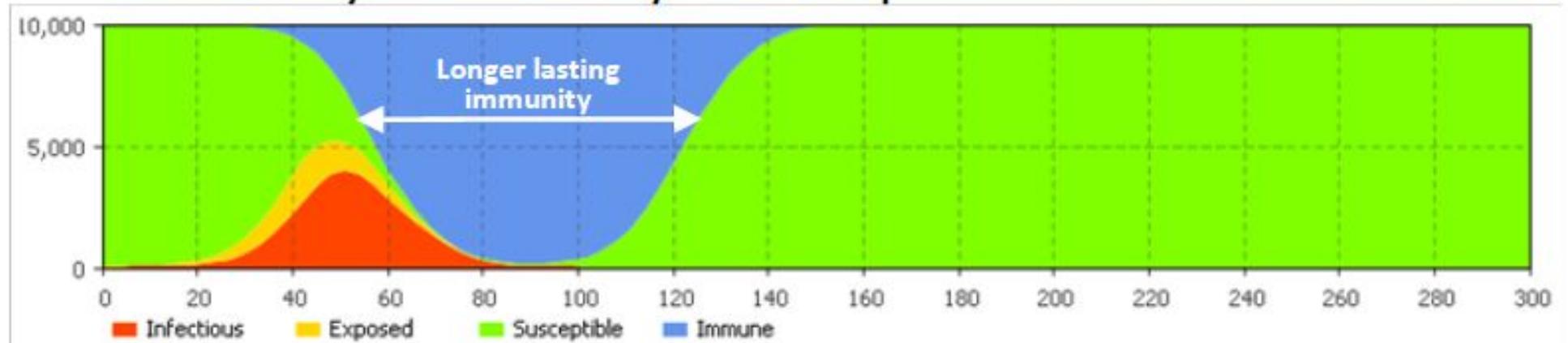


Выходная информация в модели распространения инфекции

The epidemic dynamics with the default parameters (immunity lasts 30 to 70 days)



Here immunity lasts 60 to 70 days – and the epidemic ends after the first wave



Особенности агентного моделирования

- Агентам не нужно жить в дискретном пространстве;
- Большинство агентных моделей являются асинхронными;
- Агентами может быть что угодно;
- Объект, который кажется абсолютно пассивным, может быть агентом;
- В агентной модели может присутствовать любое количество агентов одного или нескольких типов;
- Существуют агентные модели, в которых агенты не взаимодействуют.