

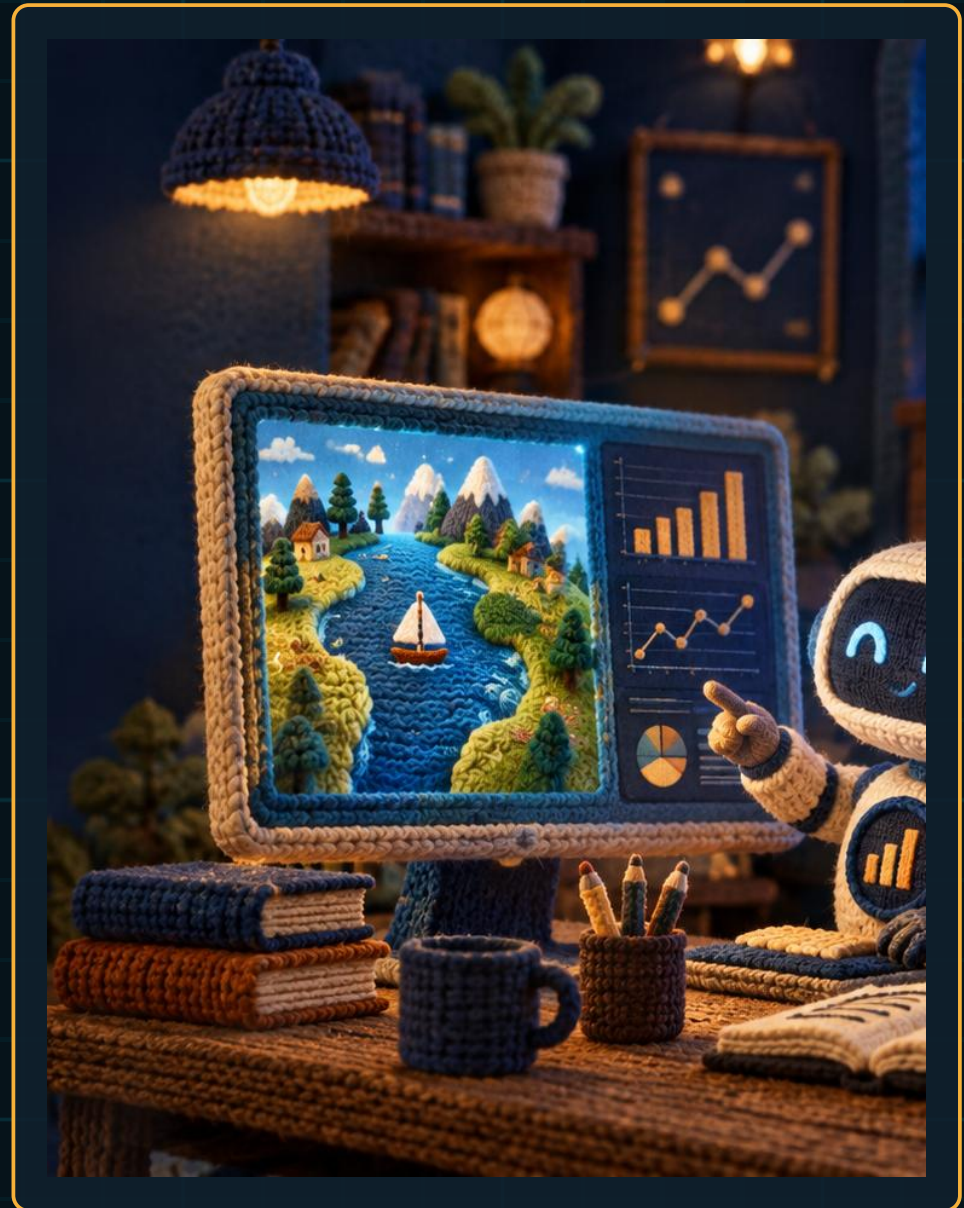
Симуляция: создаём виртуальный мир

Как случайные эксперименты помогают понимать системы, принимать решения и создавать данные для анализа.

12

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер



Сегодняшняя идея

Мы строим маленький мир, чтобы безопасно задавать большие вопросы.

**реальность → модель → много запусков → данные
→ решение**

Вопрос

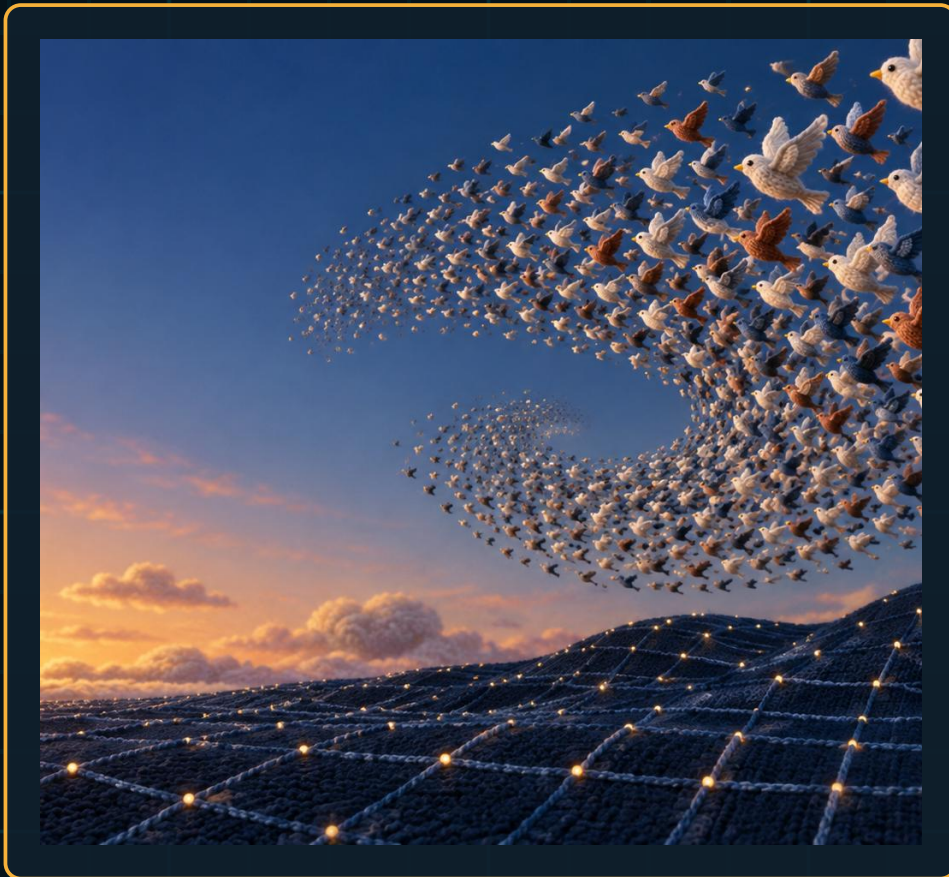
12.1 Зачем симуляция

? Можно ли экспериментировать с миром, не трогая сам мир?

Это главный вопрос всего урока.

Тысячи птиц — ни одного дирижёра

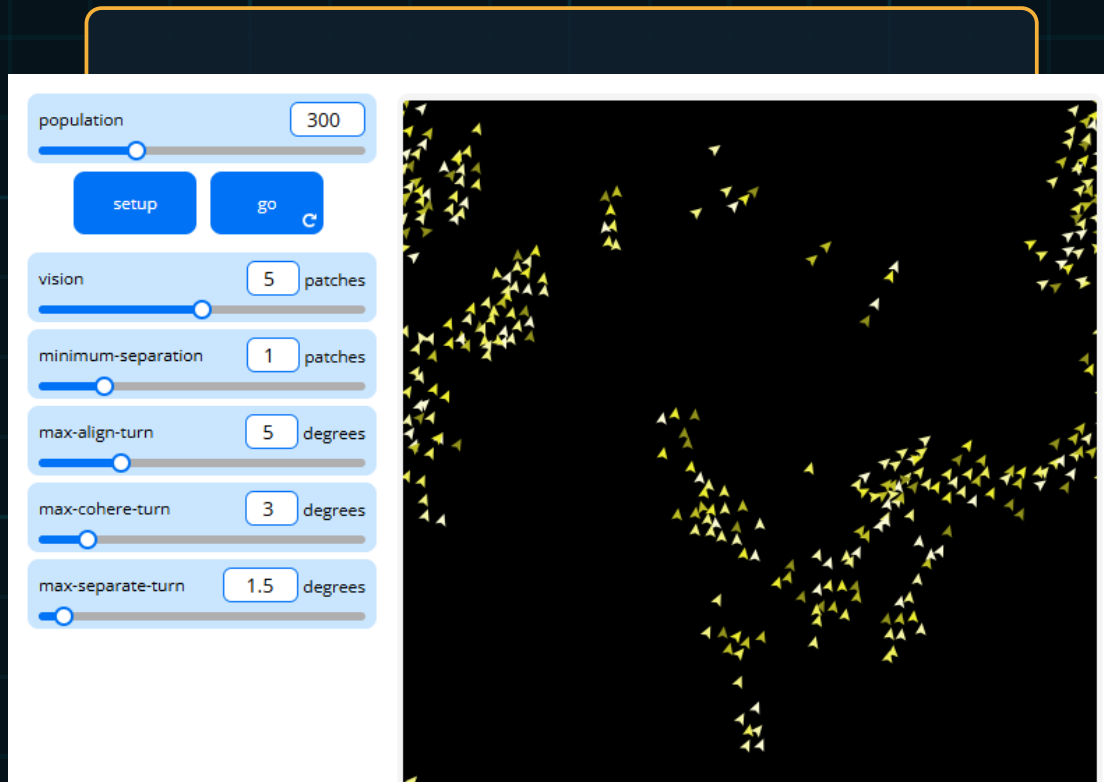
Стая выглядит как единый организм, но состоит из отдельных простых решений.



**Глобальная картина может
возникать из локальных правил.**

Тысячи птиц — ни одного дирижёра

Стая выглядит как единый организм, но состоит из отдельных простых решений.



[https://www.netlogo.org/
www.netlogoweb.org](https://www.netlogo.org/www.netlogoweb.org)

[https://www.netlogoweb.org/launch
#https://www.netlogoweb.org/assets
/modelslib/Sample%20Models/Biolo
gy/Flocking.nlogo](https://www.netlogoweb.org/launch#https://www.netlogoweb.org/assets/modelslib/Sample%20Models/Biology/Flocking.nlogo)

Summary

12.1 Зачем симуляция

**простые правила отдельных
объектов**

много взаимодействий

сложное поведение системы

Сложное не всегда нужно программировать целиком.

Это больница?

Игровая картинка, но мозг мгновенно узнаёт систему.

Мы видим очереди, ресурсы, персонал, кабинеты и узкие места — даже если это не настоящая больница.



Модель — это выбор

Мы оставляем важное для вопроса и выбрасываем остальное.

ОСТАВЛЯЕМ

потоки людей
ресурсы
время обслуживания

ИГНОРИРУЕМ

цвет стен
марку стула
тысячи деталей

Модель не обязана быть копией мира

Она обязана быть полезной для вопроса, который мы задали.

хорошая модель = правильное упрощение

Все модели упрощают

Классическая фраза Джорджа Бокса работает только вместе со словом «проверяем».

All models are wrong, but some are useful.

Совет от учителя

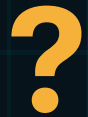
Начинаем исследование



**Сначала вопрос. Потом модель.
Не наоборот.**

Вопрос

12.1 Зачем симуляция



Насколько модель должна быть похожа на реальность, чтобы быть полезной?

Здесь нет одного числа — есть логика ответа.

Ответ

12.1 Зачем симуляция



Ровно настолько, насколько требует наш вопрос.

Если изучаем очереди — важны потоки, обслуживание и ресурсы.
Если изучаем интерьер — это другая модель.

Когда реальный эксперимент — плохая идея

Иногда самый разумный эксперимент — тот, который мы сначала проводим виртуально.

12.2

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер



«Уберём трёх врачей и посмотрим»

Для модели — нормальный вопрос. Для реальной больницы — плохой план.

REAL WORLD

дорого
опасно
неэтично

VIRTUAL WORLD

перезапустили
исправили
сравнили

Summary

Когда помогает симуляция

опасно

дорого

долго

редкое событие

слишком много вариантов

Реальность не всегда подходит для эксперимента.

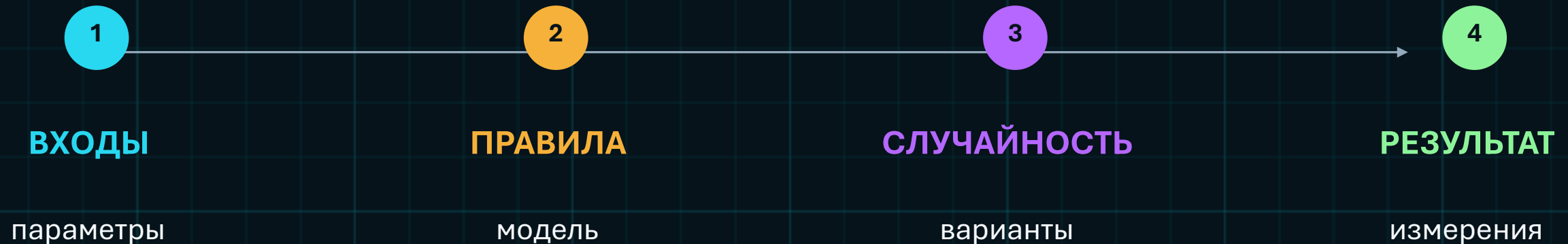
Три пути к ответу

Реальный эксперимент, формула и симуляция не конкуренты.



Симуляция = эксперимент над моделью

Один запуск — одна история. Много запусков — картина возможностей.



Summary

Три лица симуляции

**статическая: повторяем
эксперимент**

**динамическая: система живёт
во времени**

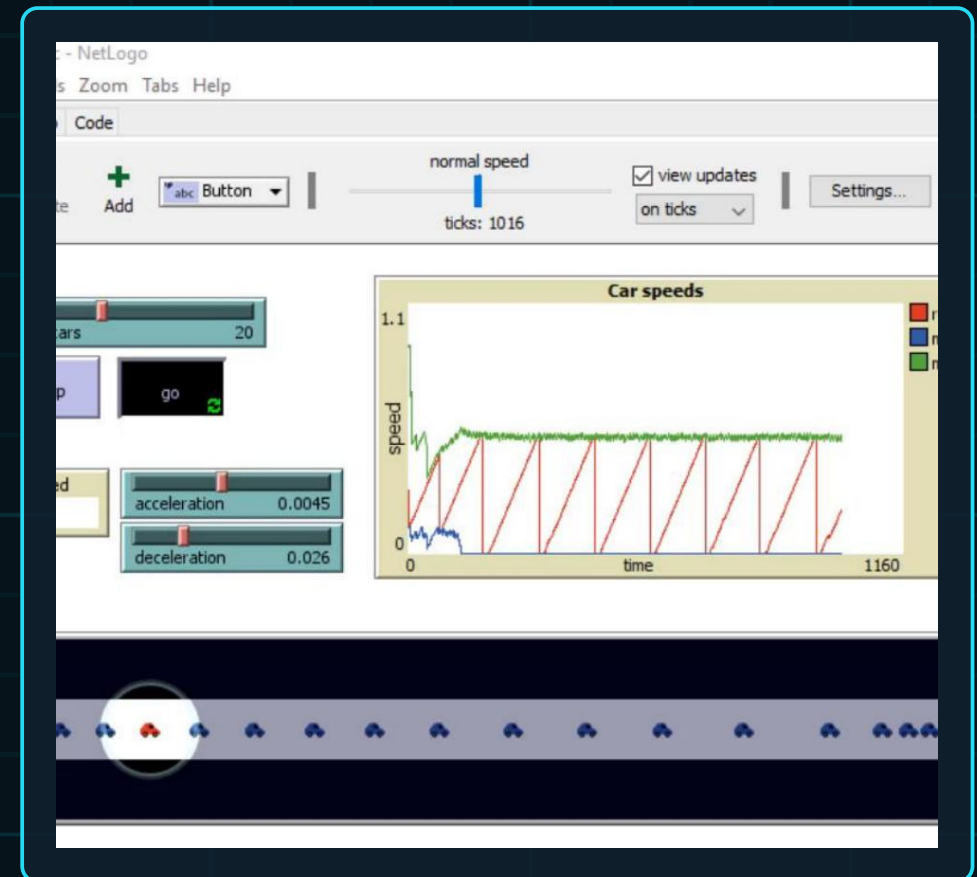
agent-based: действуют отдельные агенты

Сегодня берём идею, а не полный курс simulation.

NetLogo: маленькая лаборатория миров

Задаём правила агентам и запускаем время.

Вместо одной формулы мы наблюдаем, как меняется искусственный мир.



Traffic Basic

В модели нет «аварии». Есть только машины, скорость и реакция на соседа.

простые правила → волна пробки

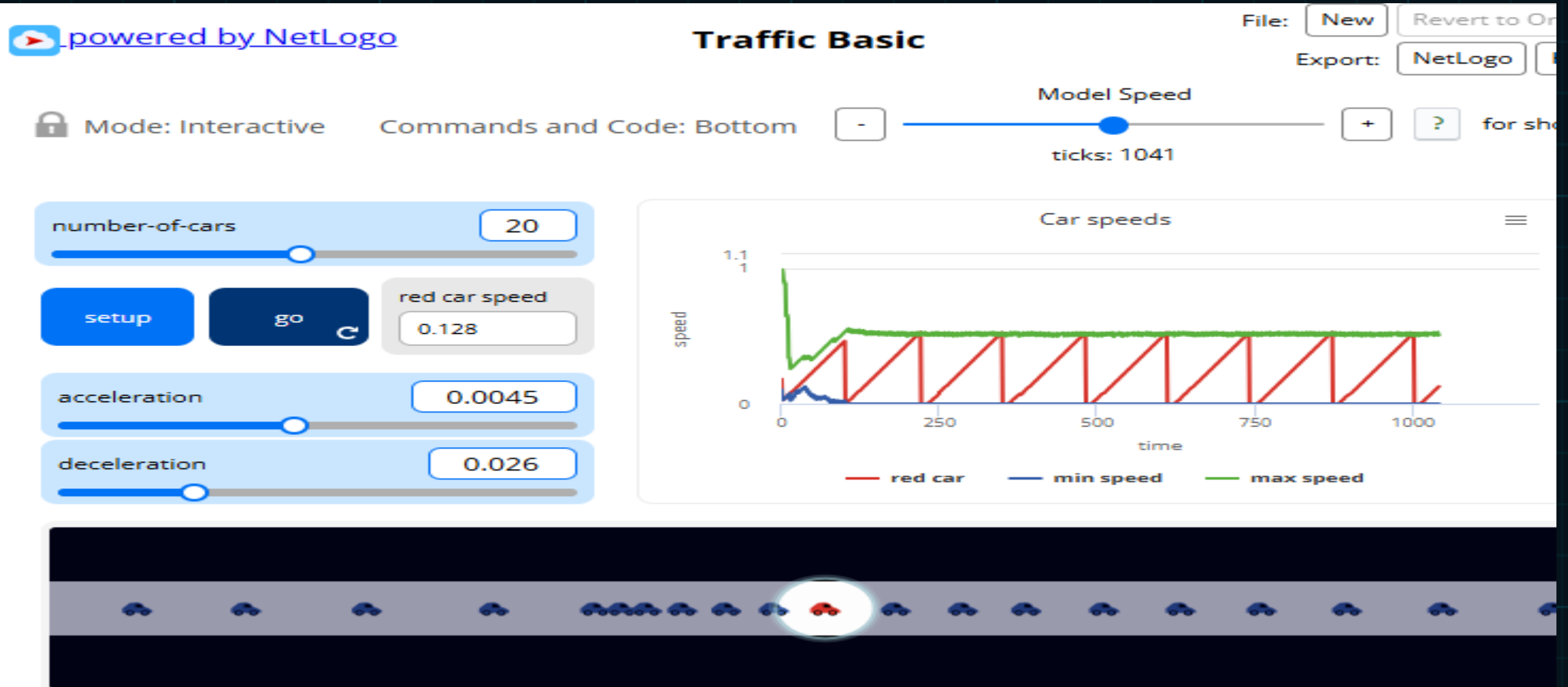
Два правила машинки

Свободно — ускоряйся. Близко машина — тормози.



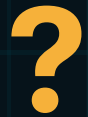
<https://www.netlogoweb.org/launch#https://www.netlogoweb.org/assets/modelslib/Sample%20Models/Social%20Science/Traffic%20Basic.nlogox>

Два правила машинки



Вопрос

12.2 NetLogo



**Если в модели нет аварии, может ли в ней
появиться пробка?**

Ответ звучит парадоксально только до запуска.

Ответ

12.2 NetLogo



Да. Пробка может возникнуть из локальных торможений.

Это пример emergent behavior: глобальная картина появляется из множества простых реакций.

Summary

12.2 Виртуальный эксперимент

**мы строим не мир, а полезную
модель**

один запуск — одна история

много запусков дают картину возможностей

Теперь можно перейти к Monte Carlo.

От иголки Бюффона к Monte Carlo

Случайный эксперимент может оценивать величины, которые мы хотим вычислить.

12.3

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер



Граф Бюффон бросает иголки

XVIII век. Термина Monte Carlo ещё нет, но идея уже видна.



Повторяем случайный эксперимент и из доли пересечений восстанавливаем число π .

Правила эксперимента

На полу параллельные линии. Иголки падают случайно.



Считаем долю иголок, которые пересекли линию.

10 иголок: результат может быть странным

Маленькая симуляция легко обманывает.



10

**слишком мало
для уверенного вывода**

1 000 иголок: картинка стабилизируется

Случайность не исчезает, но шум становится меньше.



Один и тот же эксперимент — разные числа

Это не ошибка. Это случайность.

ЗАПУСК 1

$\pi \approx 3.10$

ЗАПУСК 2

$\pi \approx 3.18$

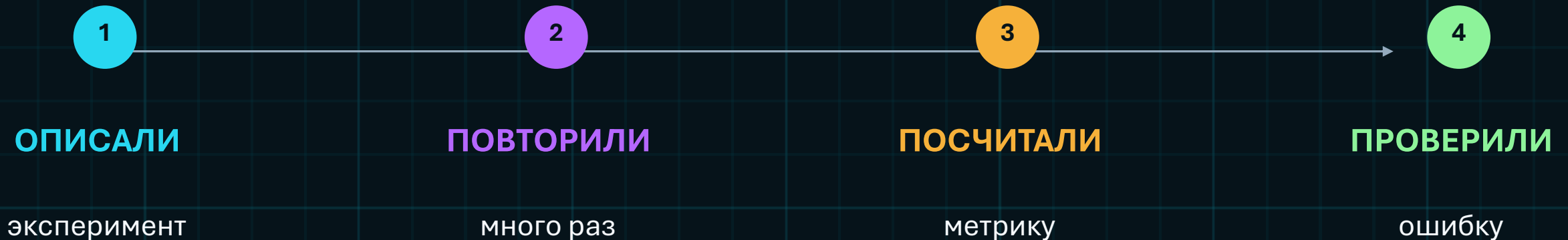
Историческая оговорка

Бюффон — не «первый Monte Carlo» в современном смысле.

Лучше: предшественник идеи Monte Carlo.

Monte Carlo: четыре шага

Простой алгоритм, который будет повторяться весь урок.



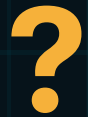
Статическая симуляция

Если событие A произошло в 173 случаях из 1000, мы оцениваем вероятность как 0.173.

$$P(A) \approx \text{число успехов} / \text{число повторений}$$

Вопрос

12.3 Monte Carlo



Почему один запуск симуляции почти никогда не является ответом?

Особенно если в модели есть случайность.

Ответ

12.3 Monte Carlo



Потому что один запуск — это одна случайная история.

Нам нужен устойчивый вывод: среднее, доля, распределение, доверительный интервал или хотя бы повторяемость результата.

Summary

12.3 Monte Carlo

случайный эксперимент может
быть инструментом вычисления

много повторений уменьшают
шум

исторические истории надо проверять аккуратно

Теперь проверим идею на кубике.

Monte Carlo на пальцах

Начинаем с задачи, где ответ известен,
чтобы проверить метод.

12.4

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер



Какова вероятность получить 3?

Кубик честный. Теория говорит: $1/6$.



$$P(3) = 1/6 \approx 0.1667$$

10 бросков: оценка гуляет

Может получиться 3 успеха из 10 — и это не значит, что кубик неправильный.

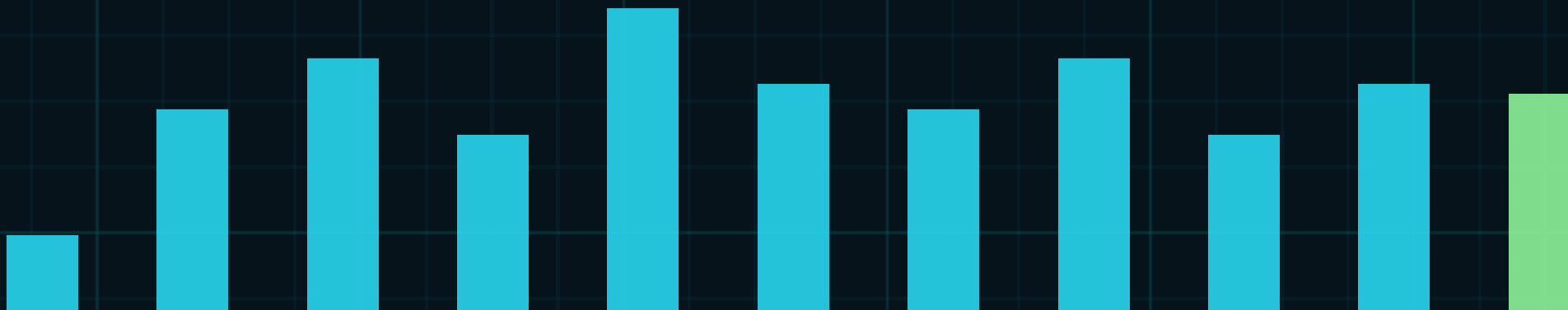


$$3 / 10 = 0.30$$

1 000 бросков: оценка устойчивее

Она всё ещё не обязана быть ровно $1/6$.

около 0.17



Закон больших чисел для нас

Повторяя независимый эксперимент много раз, мы обычно получаем всё более устойчивую оценку.

больше запусков → меньше случайного шума

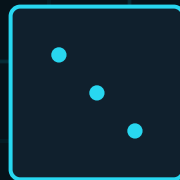
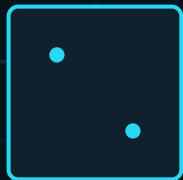
Но миллион запусков не спасает плохую модель

Если кубик в модели нечестный, симуляция очень точно оценит не ту реальность.

**больше повторений $\neq$ правильные
предположения**

Сумма четырёх кубиков

Уже считать руками неприятнее: сколько способов дают 14?



$$2 + 5 + 3 + 4 = 14$$

1000 бабушек Маш

Бабушка каждый день случайно звонит одному из трёх внуков и забывает, кому звонила.

за неделю позвонит всем троим?

Одна бабушка = одна виртуальная неделя

Семь случайных звонков. Проверяем, появились ли все 1, 2 и 3.



✓ все трое встретились

1 000 бабушек Маш одновременно

Компьютер спокойно переживёт такой семейный чат.

1 000

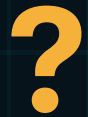
виртуальных недель

≈ 0.826

доля успешных недель

Вопрос

12.4 На пальцах



**Зачем симулировать задачу, если у неё
существует формула?**

Например, задачу с бабушкой можно посчитать руками.

Ответ

12.4 На пальцах



Симуляция — это ещё и способ проверить понимание.

На простой задаче сравниваем с формулой. Потом меняем условия: 5 внуков, разная вероятность, пропущенные дни — формула усложняется, а симуляция остаётся похожей.

Совет от Игоря

Совет перед практикой



**Симулируйте один случай руками.
Если один случай понятен — компьютер сможет
повторить его тысячи раз.**

Summary

12.4 На пальцах

**частота оценивает
вероятность**

**много повторений
стабилизируют результат**

простые задачи проверяют нашу модель

Теперь переходим от вероятности к решению.

Овербукинг: симуляция принимает решение

Сколько билетов продавать на самолёт с
20 местами?

12.5

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер



Билетов больше, чем кресел

Почему авиакомпании так делают? Потому что часть пассажиров не приходит.



Но если придут больше чем есть мест — кому-то не хватит места. Деньги и риск сталкиваются.

Summary

Условия учебной модели

20 мест в самолёте

вероятность отмены билета 0.1

билет стоит 500

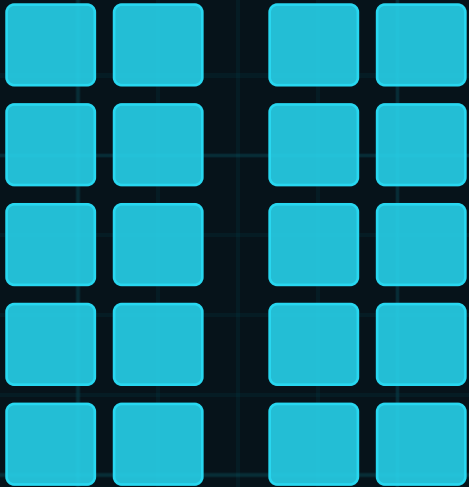
при отмене компании остаётся 100

если нет места: -700

Сначала фиксируем правила виртуального мира.

20 билетов → летят все

Идеальный, но не всегда повторяющийся день.

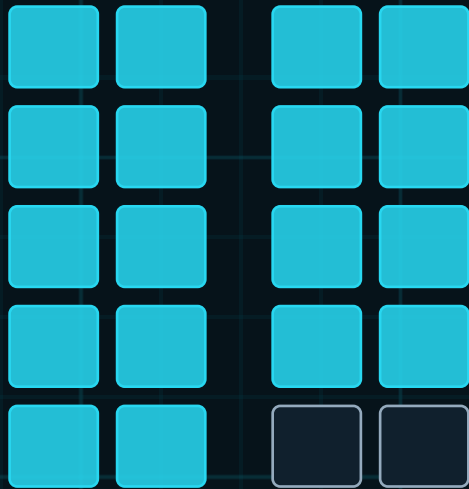


$$20 \times 500 = 10\,000$$

Все кресла заняты. Отказов нет.

20 билетов → двое не летят

Пустые кресла уже нельзя продать после вылета.

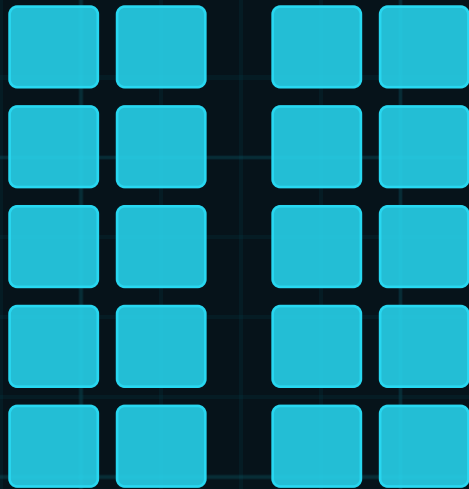


$$18 \times 500 + 2 \times 100 = 9\,200$$

Два кресла пустуют — деньги потеряны.

22 билета → двое не пришли

В этот раз overbooking выглядит гениально.

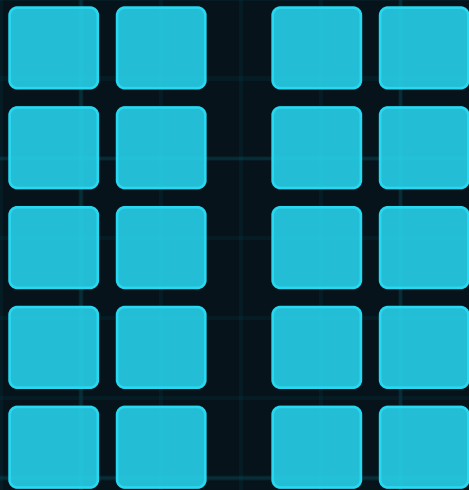


$$20 \times 500 + 2 \times 100 = 10\,200$$

Полный самолёт. Отказов нет.

22 билета → отменил только один

Та же стратегия, но теперь кому-то нет кресла.



+1

без кресла

$$21 \times 500 + 100 - 700 = 9\,900$$

Один пассажир остаётся за бортом.

Один рейс ничего не доказывает

Стратегию оценивают не по одной истории, а по тысячам возможных рейсов.

решение → много виртуальных будущих

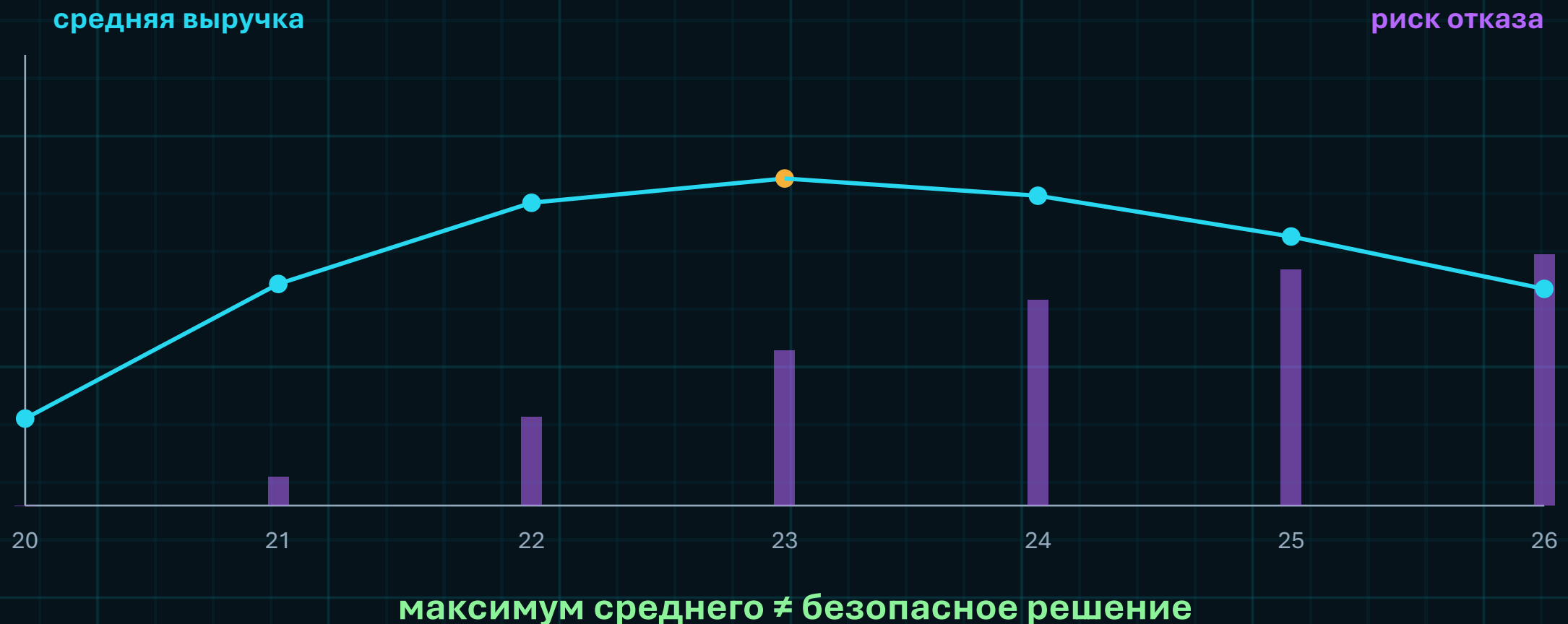
Меняем решение → повторяем мир

20, 21, 22, 23, 24... билета. Для каждого — тысячи виртуальных рейсов.



Средняя выручка максимальна около 23 билетов

Но риск отказа пассажиру растёт гораздо быстрее.



23 билета: больше средняя выручка...

...но риск overbooking уже большой.

≈ 9 883

средняя выручка

≈ 59%

риск отказа

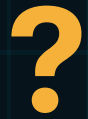
Оптимум зависит от метрики

Если цель — только средняя выручка, ответ один. Если есть лимит риска — другой.

симуляция считает то, что мы попросили

Вопрос

12.5 Овербукинг



Если 23 билета дают максимальную среднюю выручку, значит ли это, что всегда надо продавать 23?

Подумайте про риск, репутацию и ограничения.

Ответ

12.5 Овербукинг



Нет. Нужно учитывать ограничения и цену риска.

Лучшее решение — это не просто максимум числа в таблице. Это решение, согласованное с целью, риском, законом, этикой и бизнес-контекстом.

Summary

12.5 Овербукинг

**симуляция оценивает
стратегию, а не один случай**

**среднее и риск могут спорить
друг с другом**

метрика определяет, что значит «лучше»

Теперь посмотрим на настоящее исследование.

Симуляция в настоящем исследовании

MIT + Beth Israel Deaconess Medical Center:
отделение неотложной помощи как модель
потока пациентов.

12.6

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер



Emergency Department — сложная система

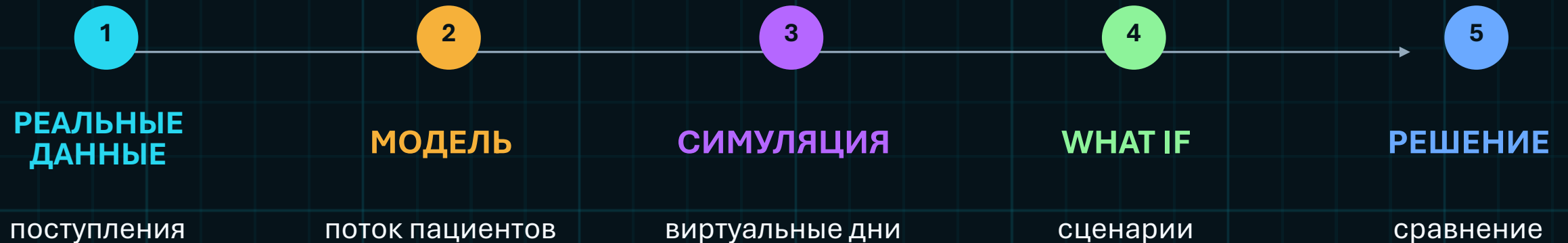
Пациенты приходят случайно, ресурсы ограничены, ожидание имеет реальную цену.

**Нельзя десять раз перестроить
настоящую больницу ради
эксперимента.**



Данные → модель → симуляция → решение

Хорошая симуляция начинается не с фантазии, а с данных и проверки.



Сначала проверка на реальности

Если модель не воспроизводит известное прошлое, не стоит верить её будущему.

ПРОШЛОЕ

**сравнить с реальными
ожиданиями**

БУДУЩЕЕ

**только потом проверять
what-if**

Summary

Что можно проверять виртуально

добавить койки

изменить лабораторные тесты

сократить простой между
пациентами

изменить маршруты пациентов

Это невозможно безопасно перебрать на настоящих пациентах.

Результат модели: около **-21%** ожидания

Комбинация изменений в симуляции дала заметное снижение времени ожидания.

**важно: это прогноз модели, а не магическая
гарантия**

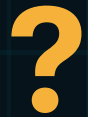
Они не перестраивали больницу десять раз

Они перестраивали её виртуальную копию.

и только потом обсуждали реальные изменения

Вопрос

12.6 Исследование



Если данные для результата получены симуляцией, это настоящая наука?

Провокационный вопрос перед проектом.

Ответ

12.6 Исследование



Да, если модель, данные, предположения и проверка описаны честно.

Симуляция не отменяет науку. Она становится частью метода:
вопрос → модель → валидация → эксперимент → ограничения.

Summary

12.6 MIT + BIDMC

реальные данные помогают
построить модель

модель надо валидировать

what-if даёт решения до дорогих вмешательств

Теперь осталось честно обсудить ограничения.

Симуляция — суперсила, но не магия

Она расширяет эксперимент, но не освобождает от проверки.

12.7

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер



Summary

Когда симуляция особенно помогает

реальный эксперимент опасен
или дорог

нужно проверить много сценариев

событие редкое, но важное

система меняется во времени

нужны данные для анализа

Это причины, а не украшения метода.

Summary

Сильные стороны симуляции

безопасное «что если?»

тысячи виртуальных
экспериментов

редкие события становятся
видимыми

можно сравнивать стратегии

симуляция создаёт таблицу данных

Симуляция превращает идеи в измеримые сценарии.

Summary

Как симуляция может красиво
соврать

неверные предположения

плохие входные данные

слишком мало запусков

непроверенный код

не та метрика успеха

Красивый график не доказывает правильность мира.

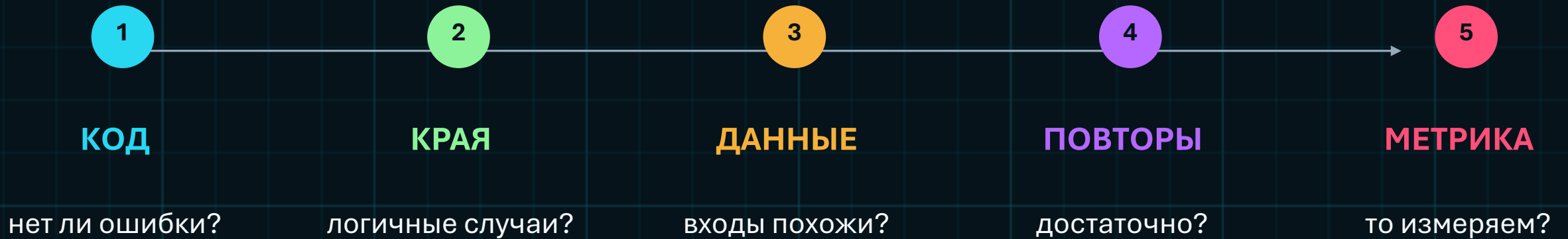
СТОП, ПРОВЕРЯЕМ!

Перед доверием к результату проверяем хотя бы крайние случаи.

людей почти нет → очереди почти нет

Мини-аудит симуляции

Пять вопросов перед тем, как верить результатам.



Совет от Игоря

Совет от Игоря



**Не спрашивайте у симуляции: «какой ответ?»
Спрашивайте: «насколько ответ устойчив?»**

Summary

Часть 1: что нужно унести

**модель — это полезное
упрощение**

один запуск не является
доказательством

Monte Carlo оценивает через
повторение

симуляция помогает выбирать
решения

доверие начинается с проверки

Теперь можно строить собственный виртуальный мир.

Теперь построим свой виртуальный мир

MIT моделировал emergency department. Мы начнём скромнее — с четырёх кабинок.



Вопрос простой. Ответ уже не такой простой.

Часть 2: симуляция → данные → Orange

Сгенерируем тысячи виртуальных дней и превратим их в обычную таблицу для анализа данных.

12.8

Сегодня снова: Стоп, проверяем!

Доктор Игорь Клейнер

