

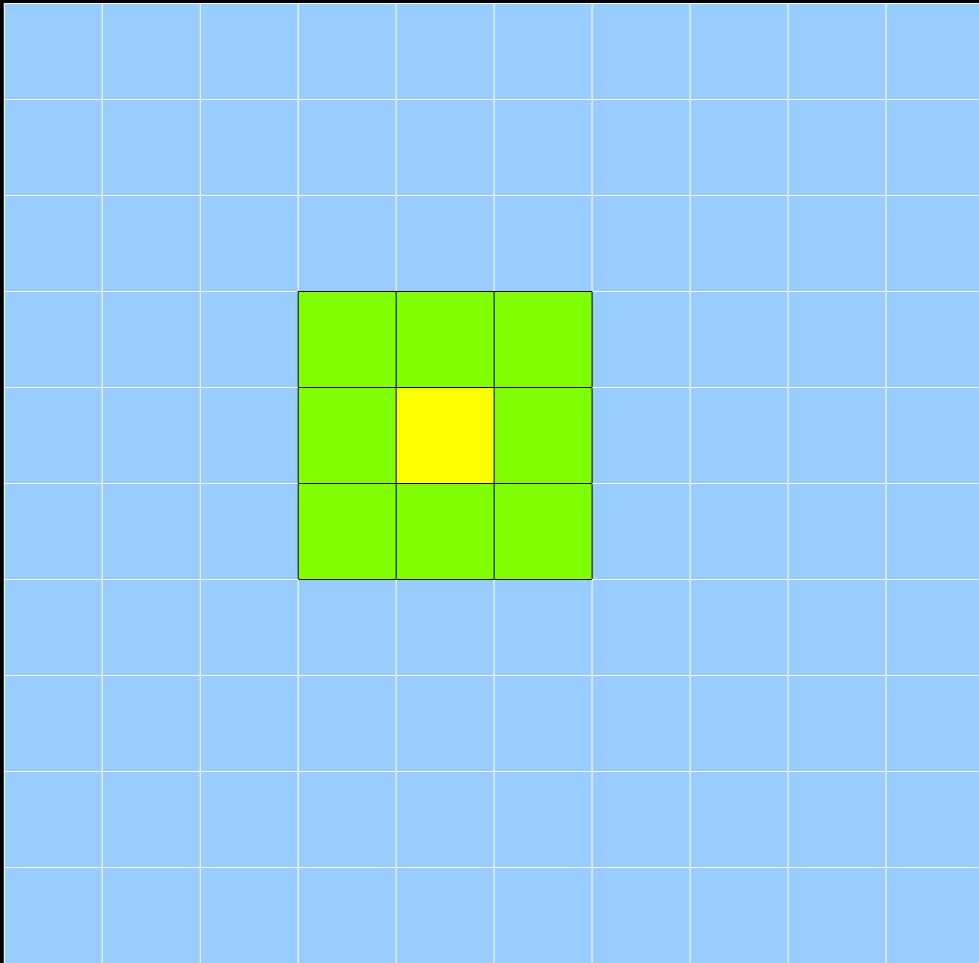
Клеточно-автоматное моделирование природных процессов

Медведев Юрий Геннадьевич

Доцент кафедры параллельных вычислений ФИТ НГУ

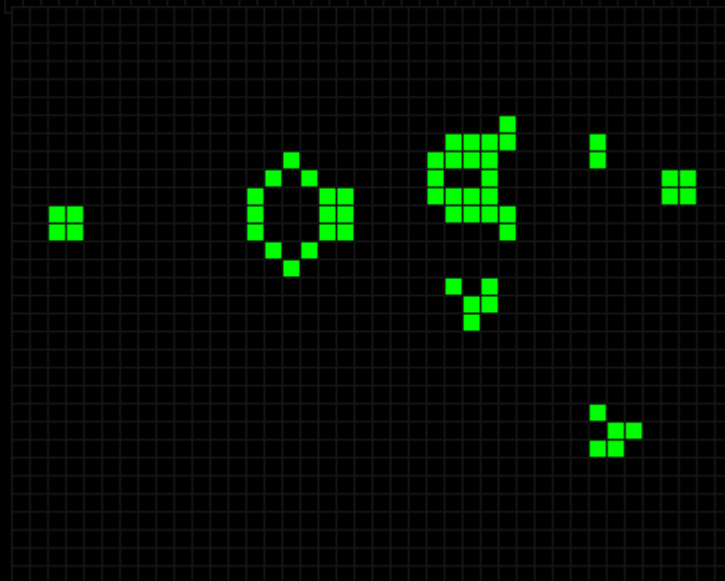
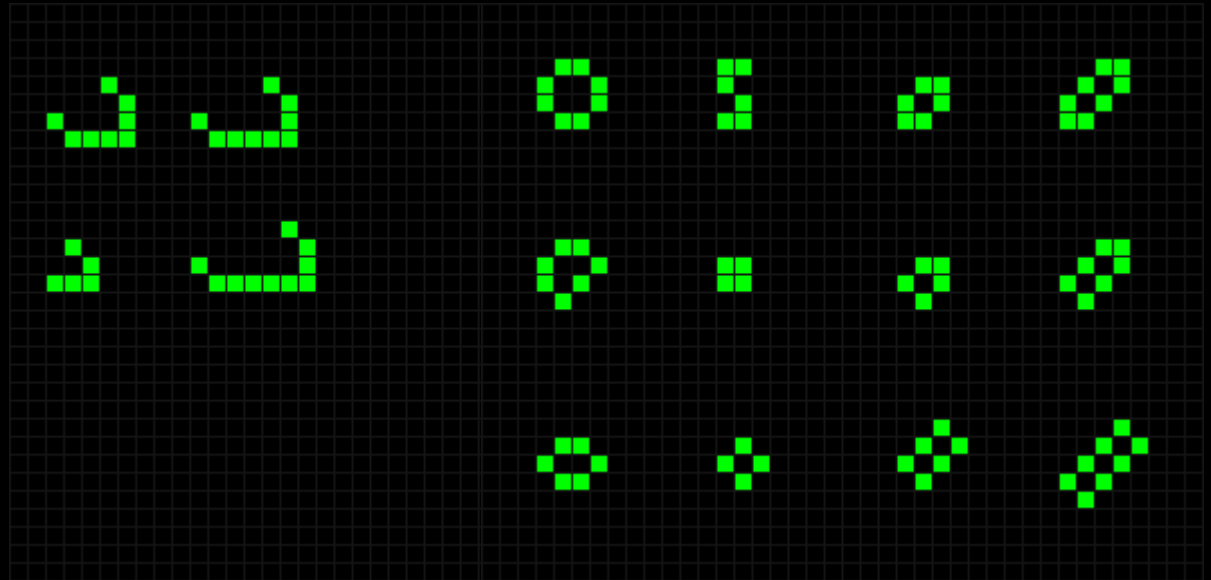
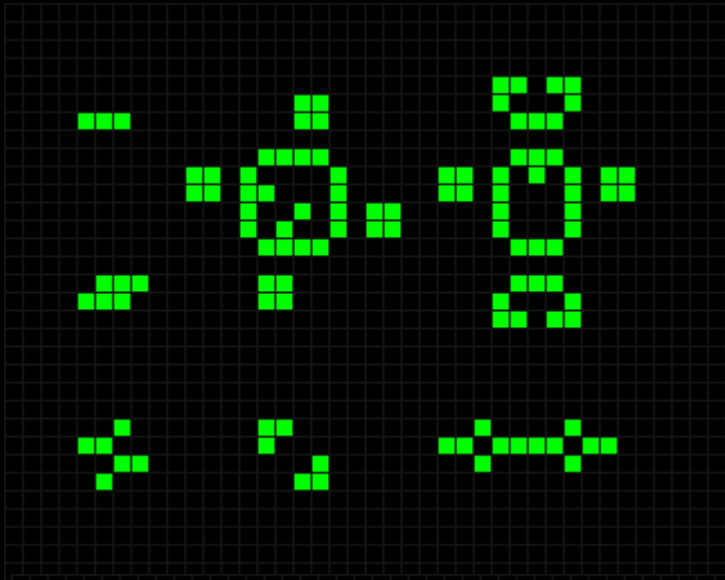
8 июля 2026 г.

Игра “Жизнь” Дж. Конвея. Правила



- У каждой клетки (например, у желтой) 8 соседних клеток (зеленых)
- Состояние клетки:
1 (живая) или
0 (мертвая)
- Живая клетка умирает, если среди ее соседей < 2 или > 3 живых
- Мертвая клетка оживает, если у нее 3 живых соседа

Игра “Жизнь”. Примеры конфигураций



<https://life.written.ru>

<https://golly.sourceforge.io/webapp/golly.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=Wfuhbl8HE7s>

<https://www.youtube.com/watch?v=xP5-ileKXE8>

<https://www.youtube.com/watch?v=C2vgICfQawE>

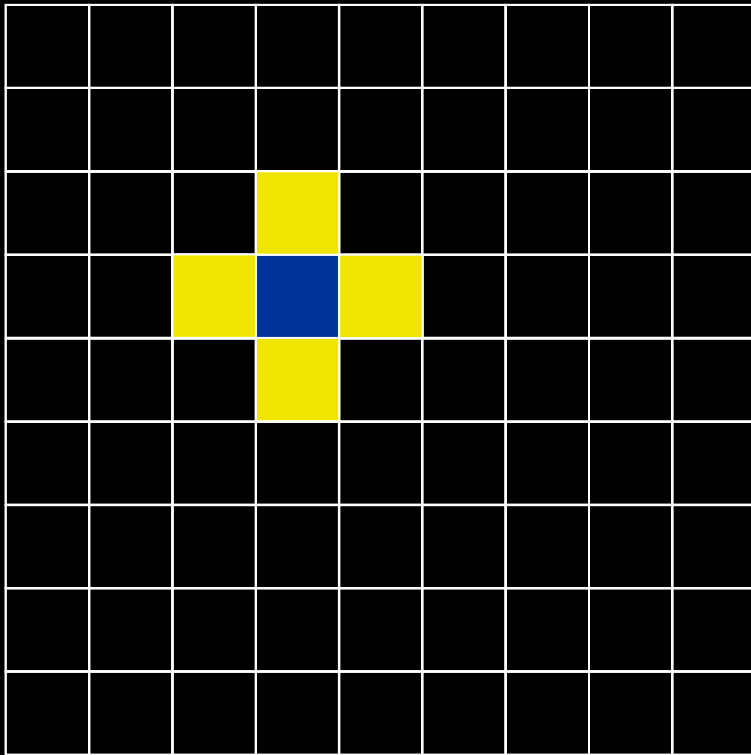
Определения



- Клеточный автомат (КА) – регулярная структура клеток (кубы, ромбодедекаэдры – 3D, квадраты, шестиугольники – 2D, отрезки – 1D), каждая из которых функционирует как конечный автомат, входы которого связаны с выходами его соседей
- Состояние клетки – двоичный разряд, целое число, символ химического элемента или даже структура данных
- Функция переходов – функция, определяющая состояние клетки в следующий момент дискретного времени, в зависимости от ее текущего состояния и состояний ее соседей
- Итерация – смена состояний заданного числа клеток
- Операционный режим – способ смены состояний клеток:
 - синхронный – смена состояний клеток происходит одновременно
 - асинхронный – состояния клеток меняются в случайные моменты времени

Модель диффузионного процесса. Асинхронный клеточный автомат

Автомат с 4 соседями

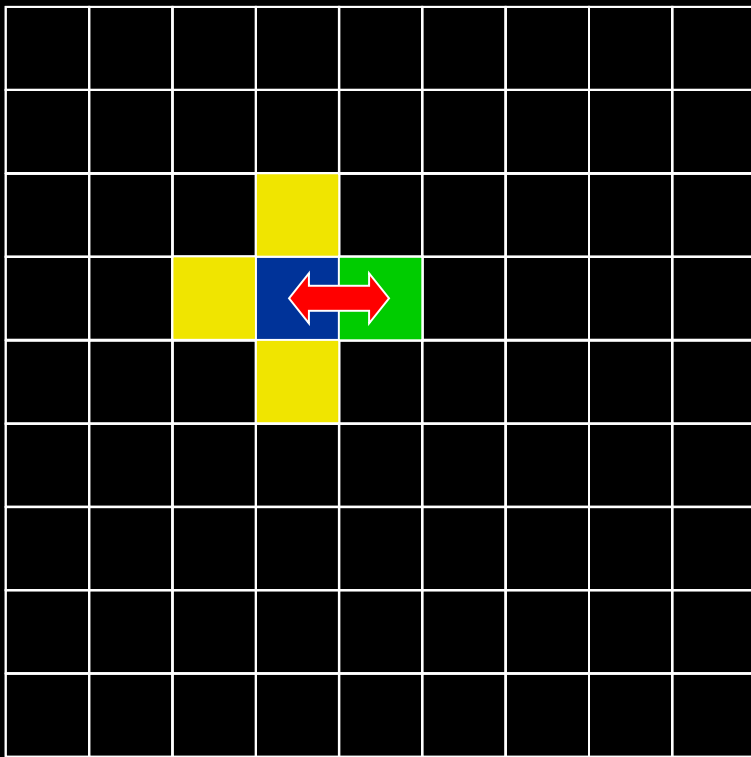


- Выбираем клетку
- У нее есть четыре соседа
- Выбираем одну из соседних клеток равновероятно
- Обмениваем состояния клеток друг с другом

Состояние клетки – 0 или 1

Модель диффузионного процесса. Асинхронный клеточный автомат

Автомат с 4 соседями

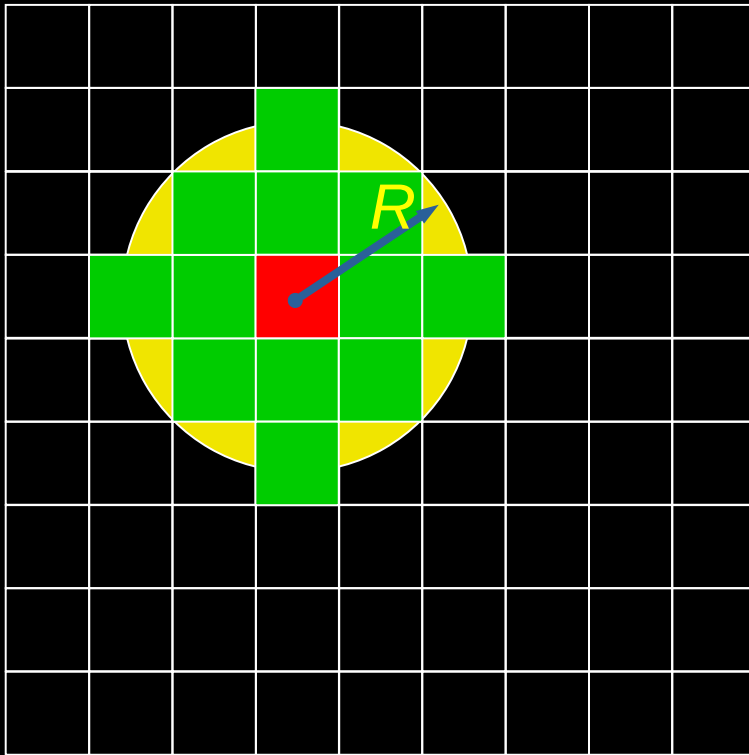


- Выбираем клетку
- У нее есть четыре соседа
- Выбираем одну из соседних клеток равновероятно
- Обмениваем состояния клеток друг с другом

Состояние клетки – 0 или 1

Осреднение значений

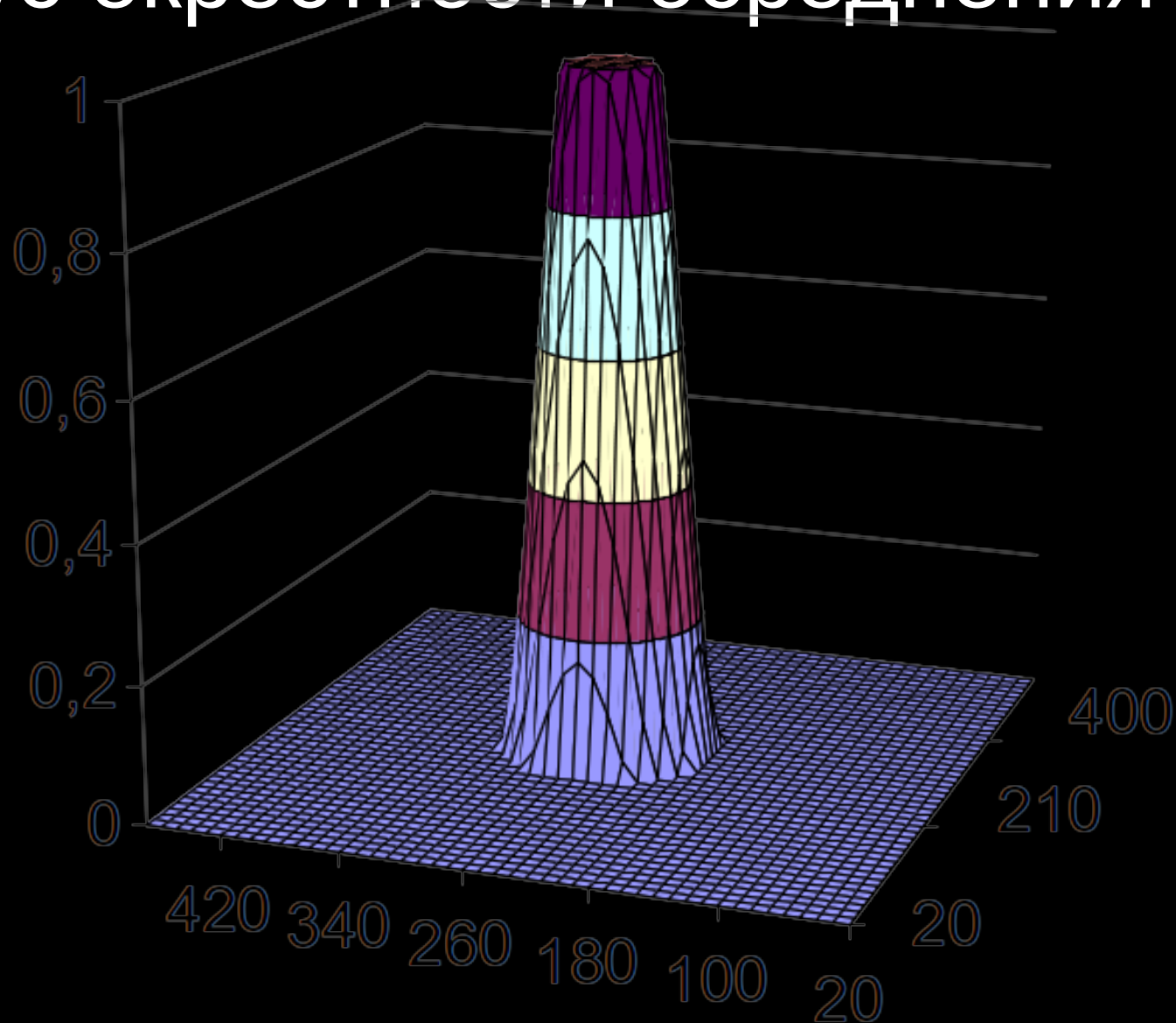
Автомат с 4 соседями



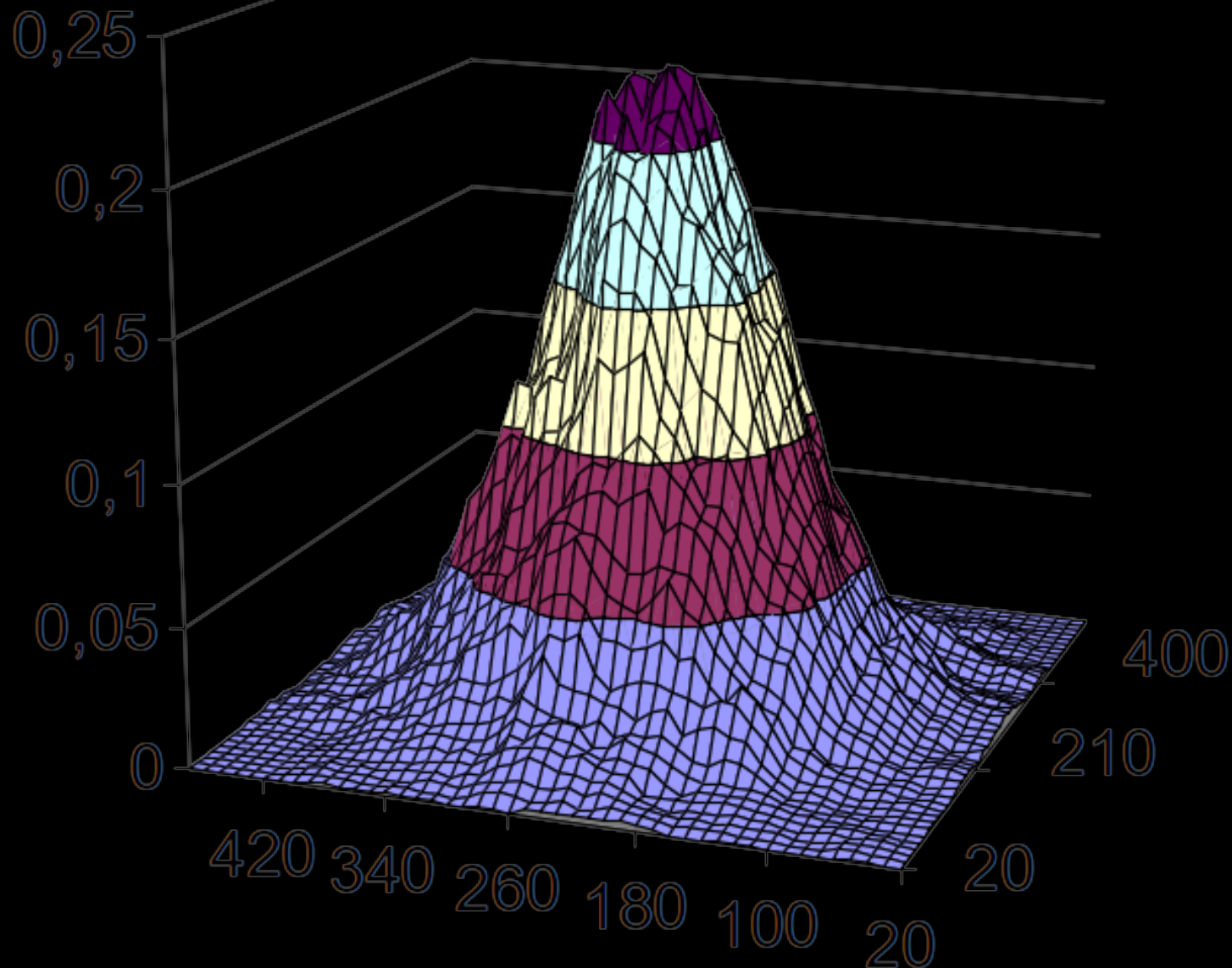
- Выбираем центр
- Выбираем радиус осреднения R
- Строим окрестность осреднения
- Подсчитываем осредненные значения

Состояние клетки – любое

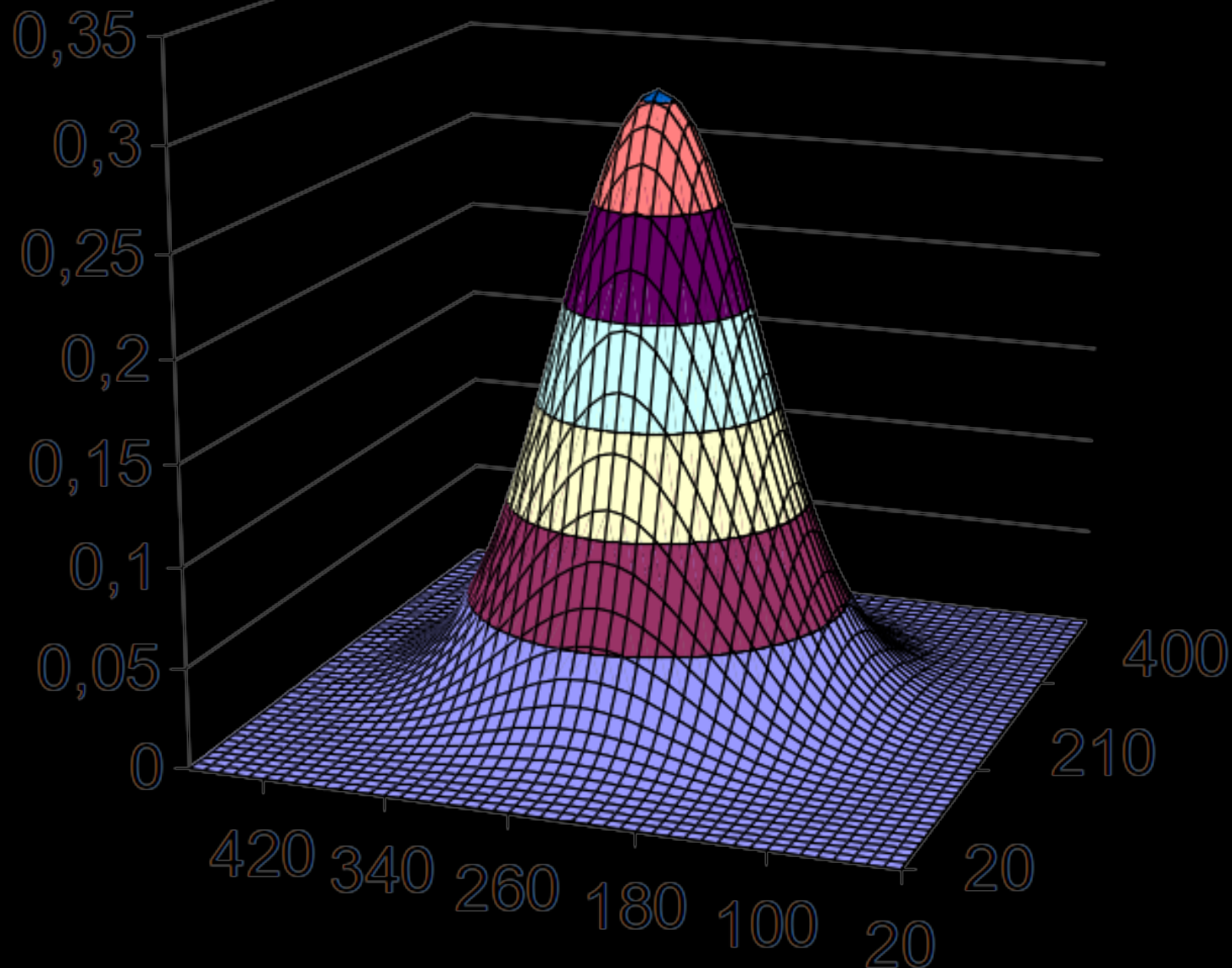
Исходное состояние – круг,
радиус окрестности осреднения $R = 15$



Булева модель, 5 000 итераций, $R = 15$

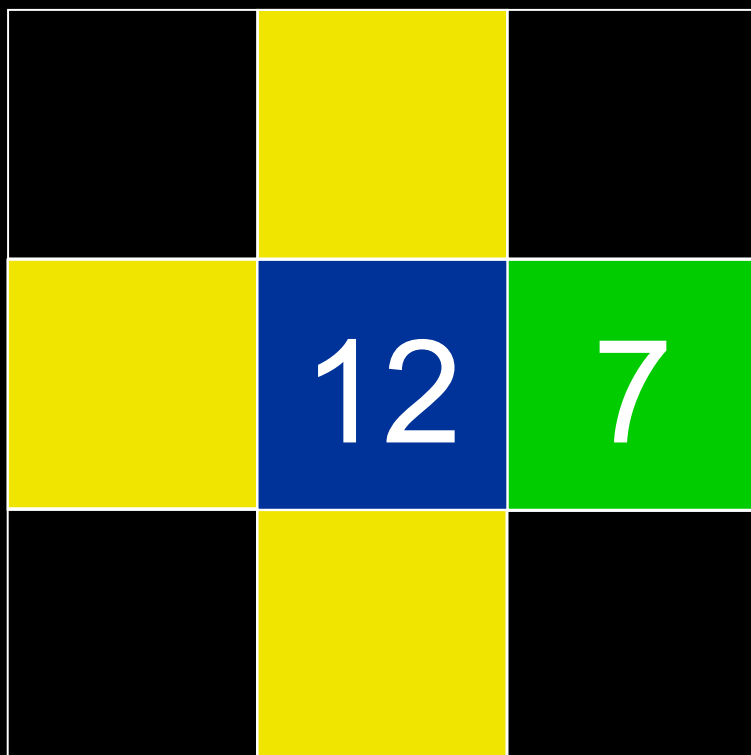


Целочисленная модель, $k = 0.5$,
10 000 итераций, $R = 0$, $s_{\max} = 1\,000$



Асинхронный клеточный автомат. Многочастичный вариант

Автомат с 4 соседями

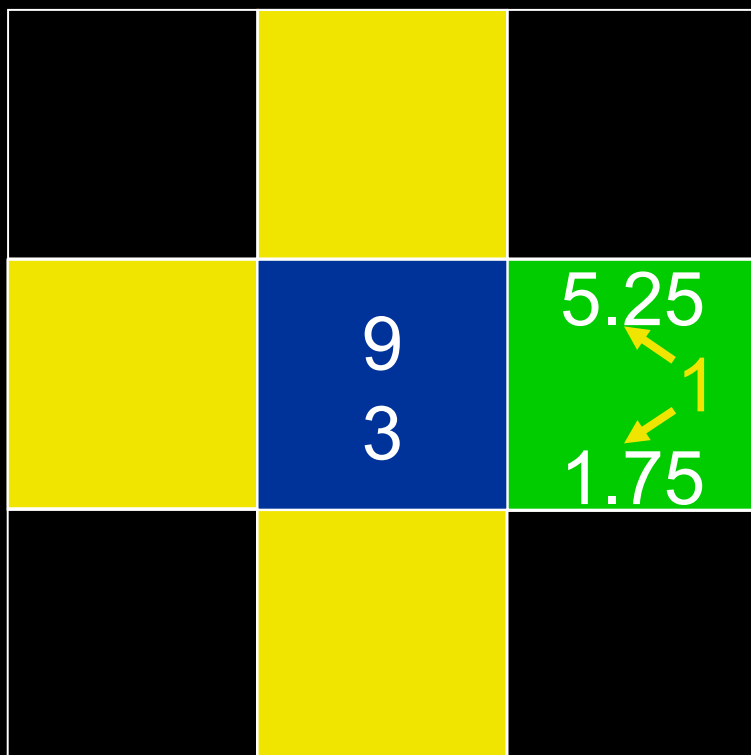


Состояние клетки —
целое число $\leq S_{\max}$

- Выбираем клетку и ее соседа
- Делим частицы на две группы, в соотношении $k : 1 - k$ (0.75 : 0.25)
- Если нацело не делится, то оставшуюся единицу распределяем с вероятностью, пропорциональной остатку (0.25 : 0.75)
- Обмениваем группы друг с другом
- Получаем результат суммированием

Асинхронный клеточный автомат. Многочастичный вариант

Автомат с 4 соседями



Состояние клетки —
целое число $\leq s_{\max}$

- Выбираем клетку и ее соседа
- Делим частицы на две группы, в соотношении $k : 1 - k$ (0.75 : 0.25)
- Если нацело не делится, то оставшуюся единицу распределяем с вероятностью, пропорциональной остатку (0.25 : 0.75)
- Обмениваем группы друг с другом
- Получаем результат суммированием

Асинхронный клеточный автомат. Многочастичный вариант

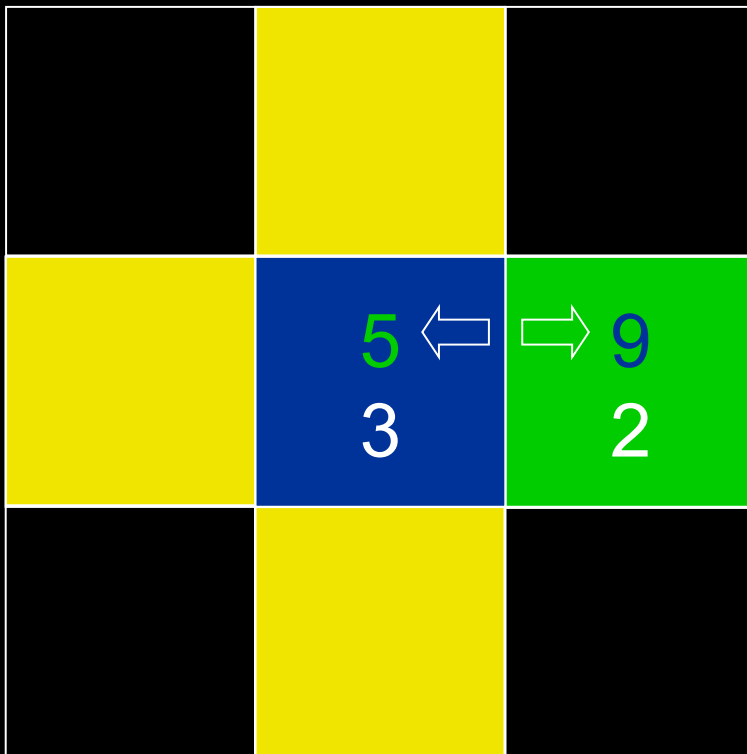
Автомат с 4 соседями

Состояние клетки —
целое число $\leq S_{\max}$

- Выбираем клетку и ее соседа
- Делим частицы на две группы, в соотношении $k : 1 - k$ (0.75 : 0.25)
- Если нацело не делится, то оставшуюся единицу распределяем с вероятностью, пропорциональной остатку (0.25 : 0.75)
- Обмениваем группы друг с другом
- Получаем результат суммированием

Асинхронный клеточный автомат. Многочастичный вариант

Автомат с 4 соседями

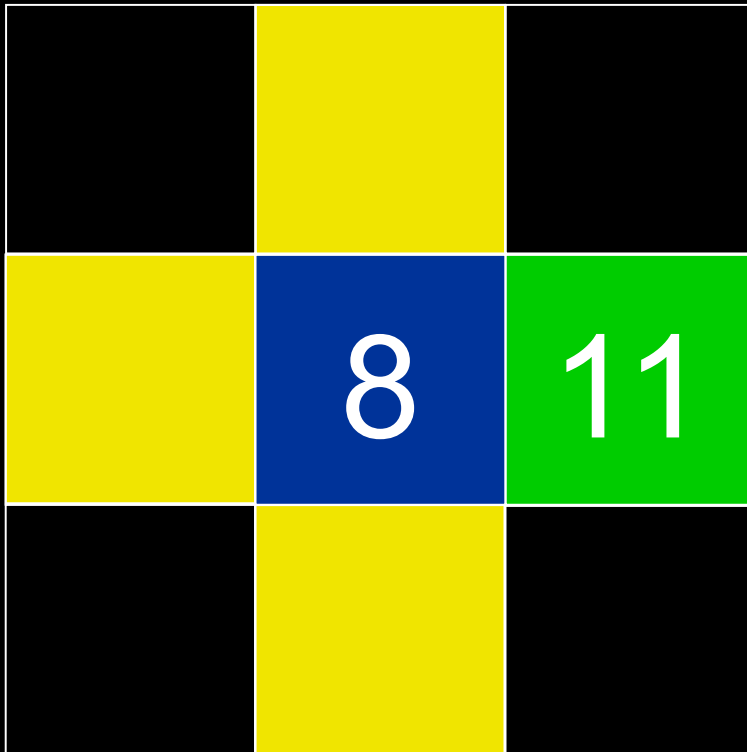


Состояние клетки —
целое число $\leq S_{\max}$

- Выбираем клетку и ее соседа
- Делим частицы на две группы, в соотношении $k : 1 - k$ (0.75 : 0.25)
- Если нацело не делится, то оставшуюся единицу распределяем с вероятностью, пропорциональной остатку (0.25 : 0.75)
- Обмениваем группы друг с другом
- Получаем результат суммированием

Асинхронный клеточный автомат. Многочастичный вариант

Автомат с 4 соседями

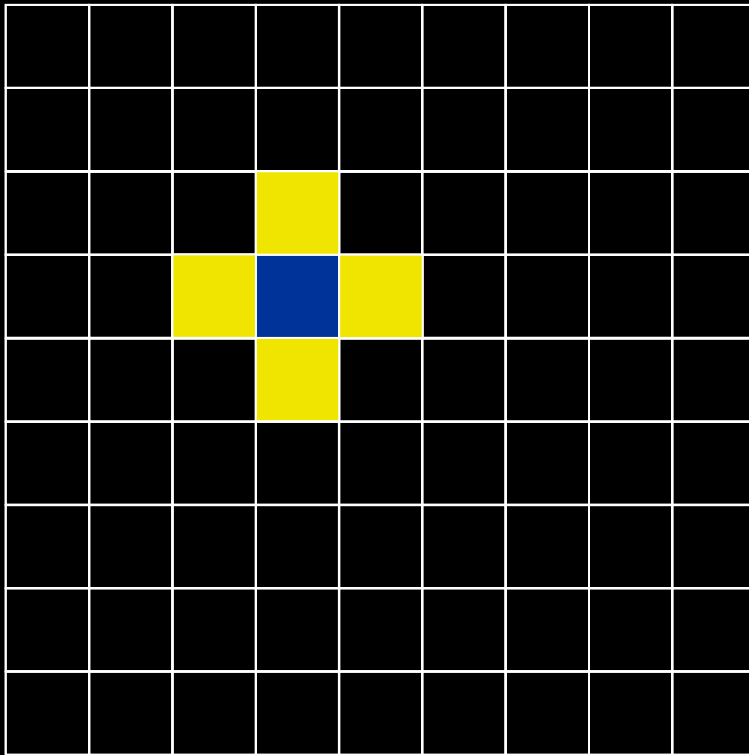


Состояние клетки —
целое число $\leq S_{\max}$

- Выбираем клетку и ее соседа
- Делим частицы на две группы, в соотношении $k : 1 - k$ (0.75 : 0.25)
- Если нацело не делится, то оставшуюся единицу распределяем с вероятностью, пропорциональной остатку (0.25 : 0.75)
- Обмениваем группы друг с другом
- Получаем результат суммированием

Модель диффузионного процесса. Синхронный клеточный автомат

Автомат с 4 соседями



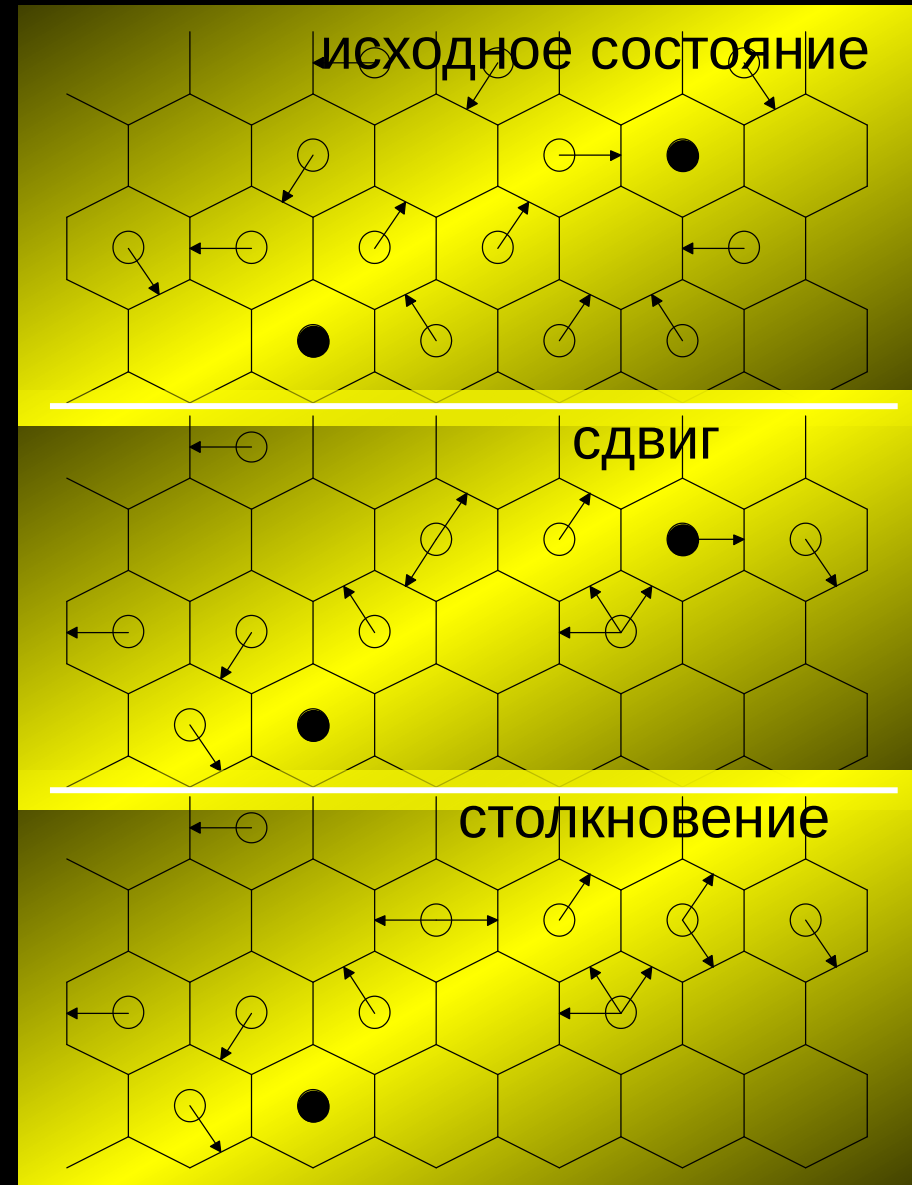
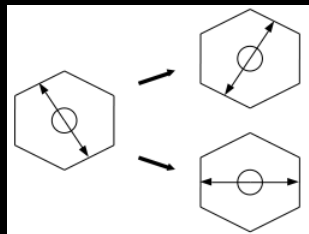
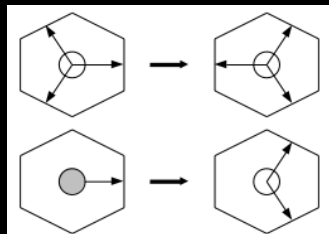
Состояние клетки —
целое число $\leq s_{\max}$

Для каждой клетки:

- Делим частицы на две группы, в соотношении $k : 1 - k$
- Группу k делим на 4 части и передаем 4 соседям
- Добавляем принятые от 4 соседей частицы к оставшимся в клетке, сохраняем сумму во второй массив

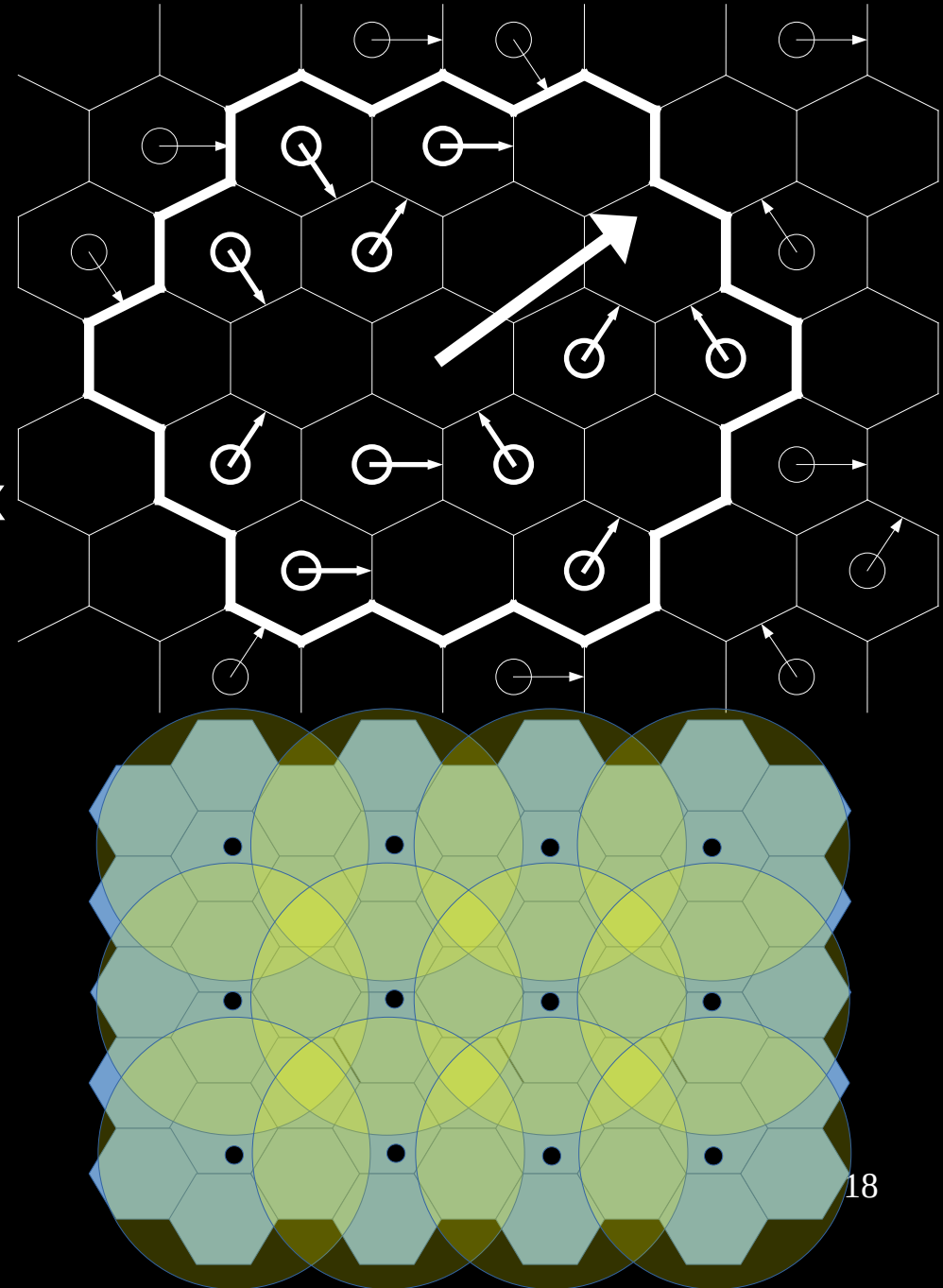
Газовый поток

- Молекулы жидкости
- Молекулы газа
- Дискретные частицы
 - Клеточный автомат с клетками гексагональной формы и частицами в них
 - Единичная масса частиц
 - Единичный модуль скорости частиц (белые) или нулевой (черные)
 - 6 направлений скорости
 - Сохранение массы
 - Сохранение импульса

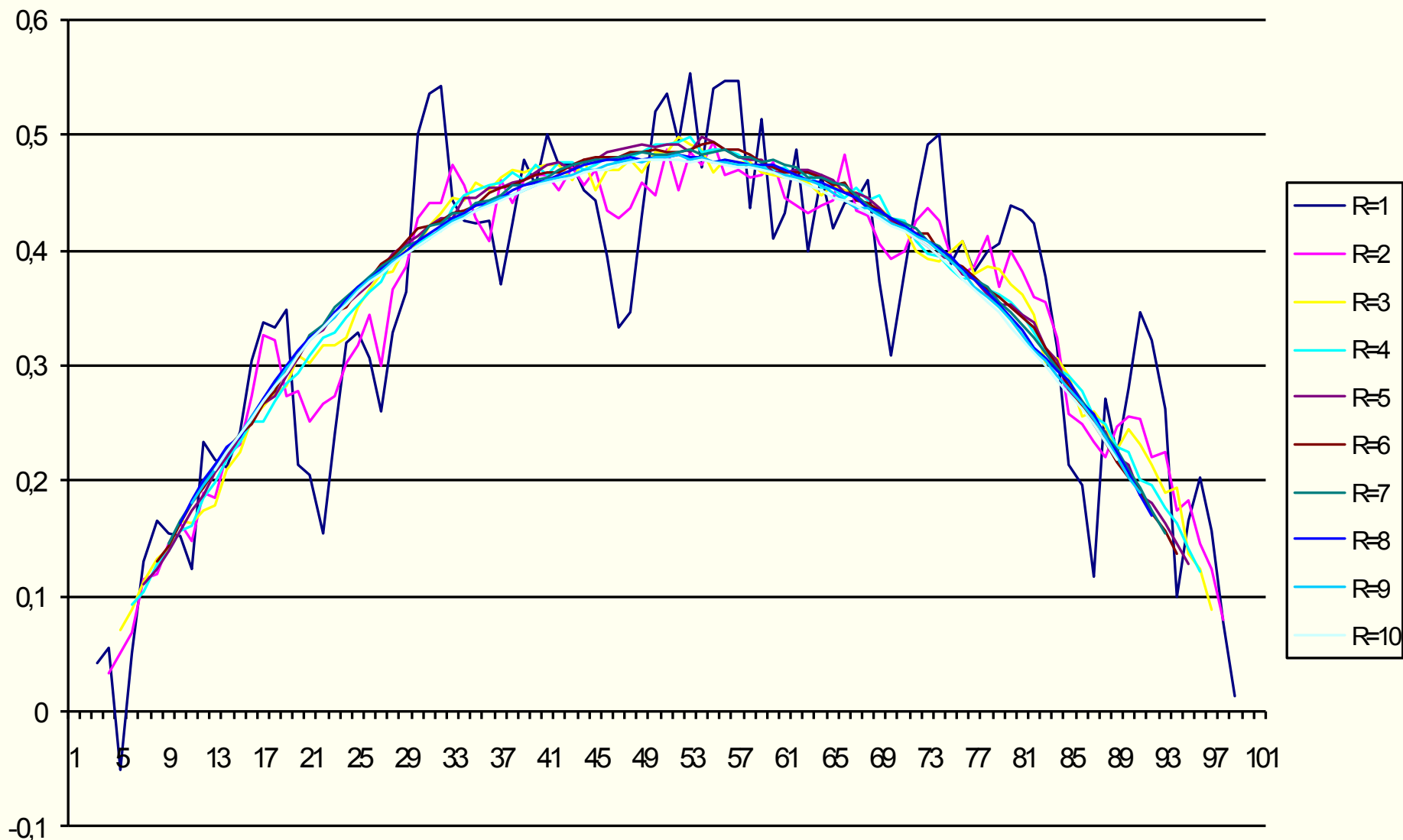


Газовый поток

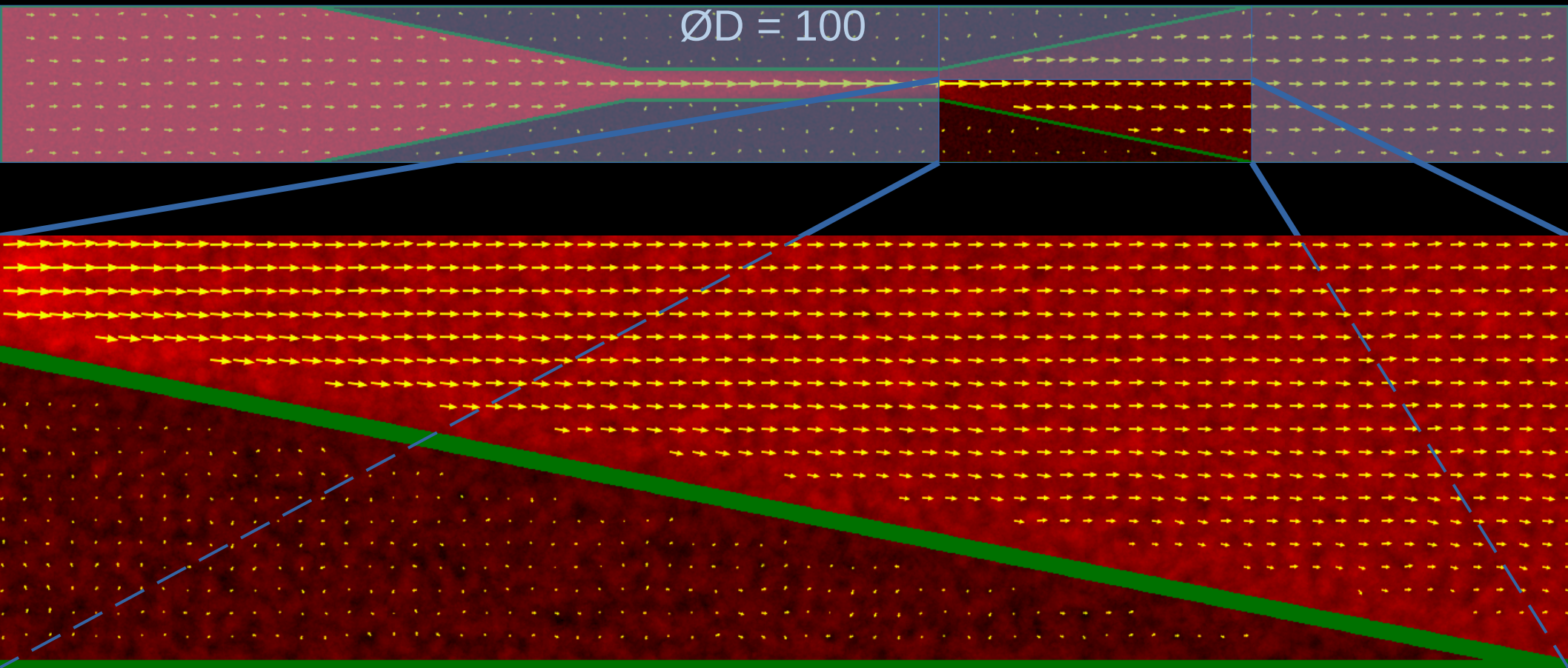
- Молекулы жидкости
- Молекулы газа
- Дискретные частицы
 - Клеточный автомат с клетками гексагональной формы и частицами в них
 - Единичная масса частиц
 - Единичный модуль скорости частиц
 - 6 направлений скорости
 - Сохранение массы
 - Сохранение импульса



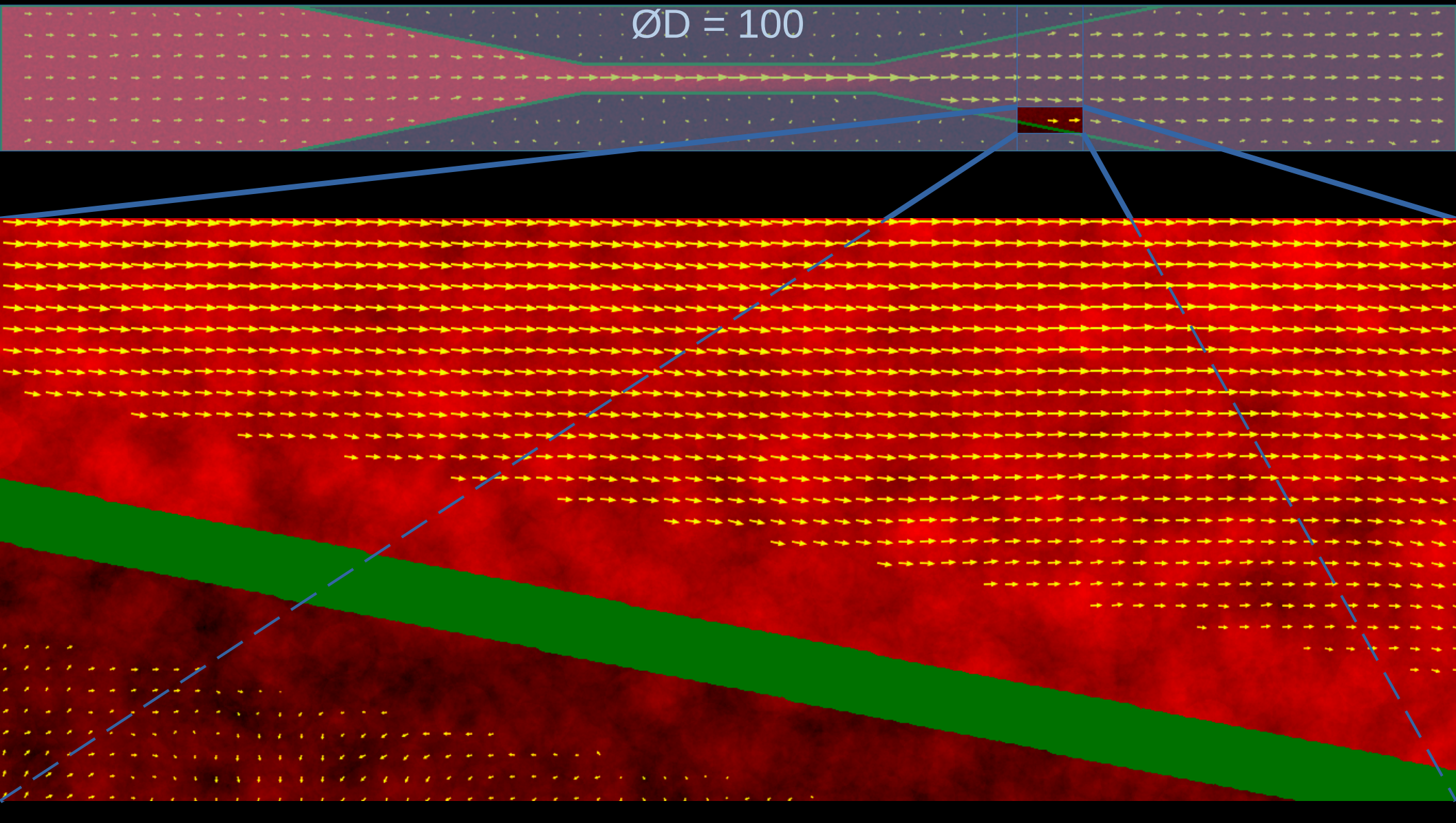
Зависимость автоматного шума от радиуса окрестности осреднения в 3D модели



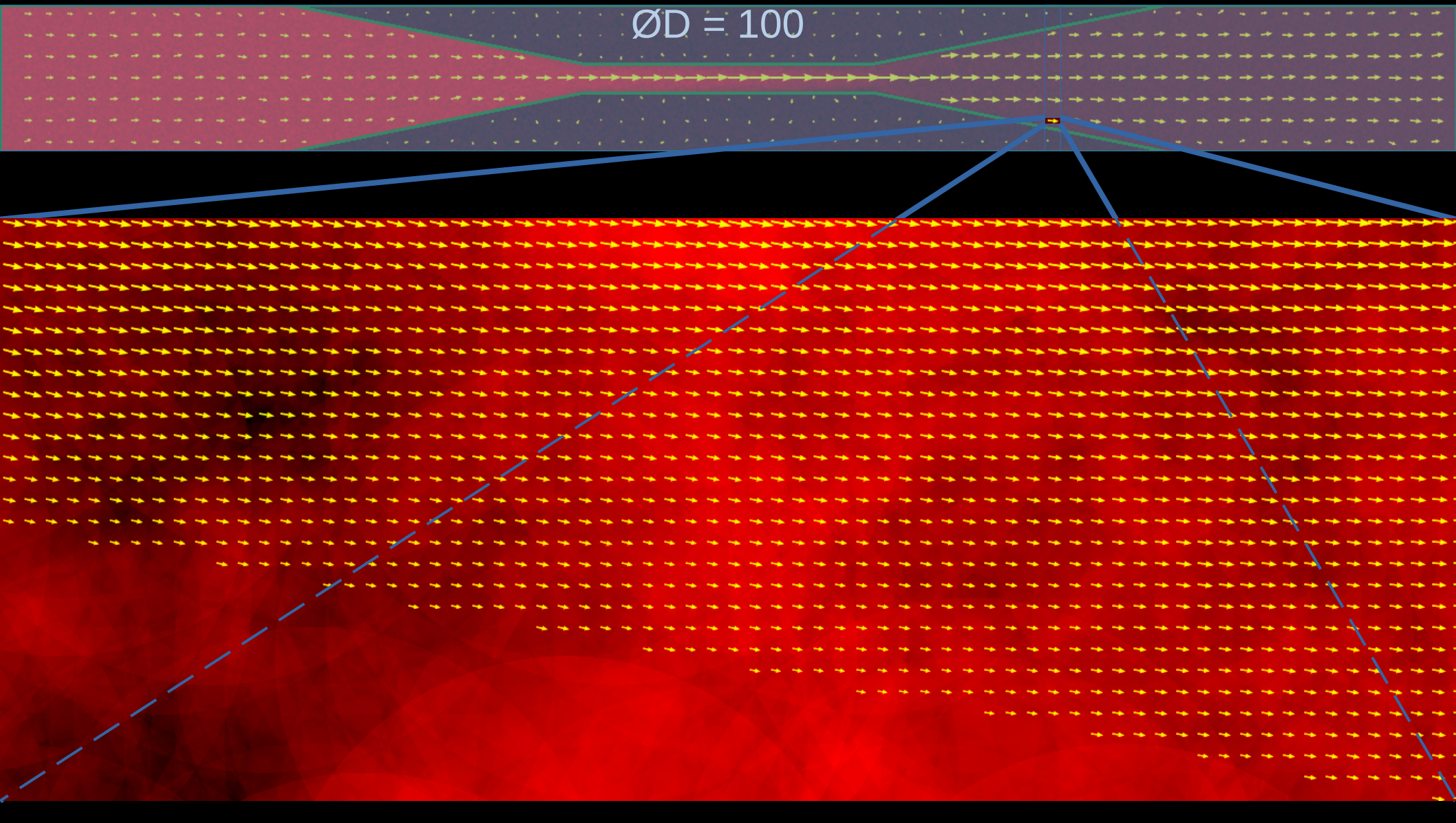
Ламинарный поток



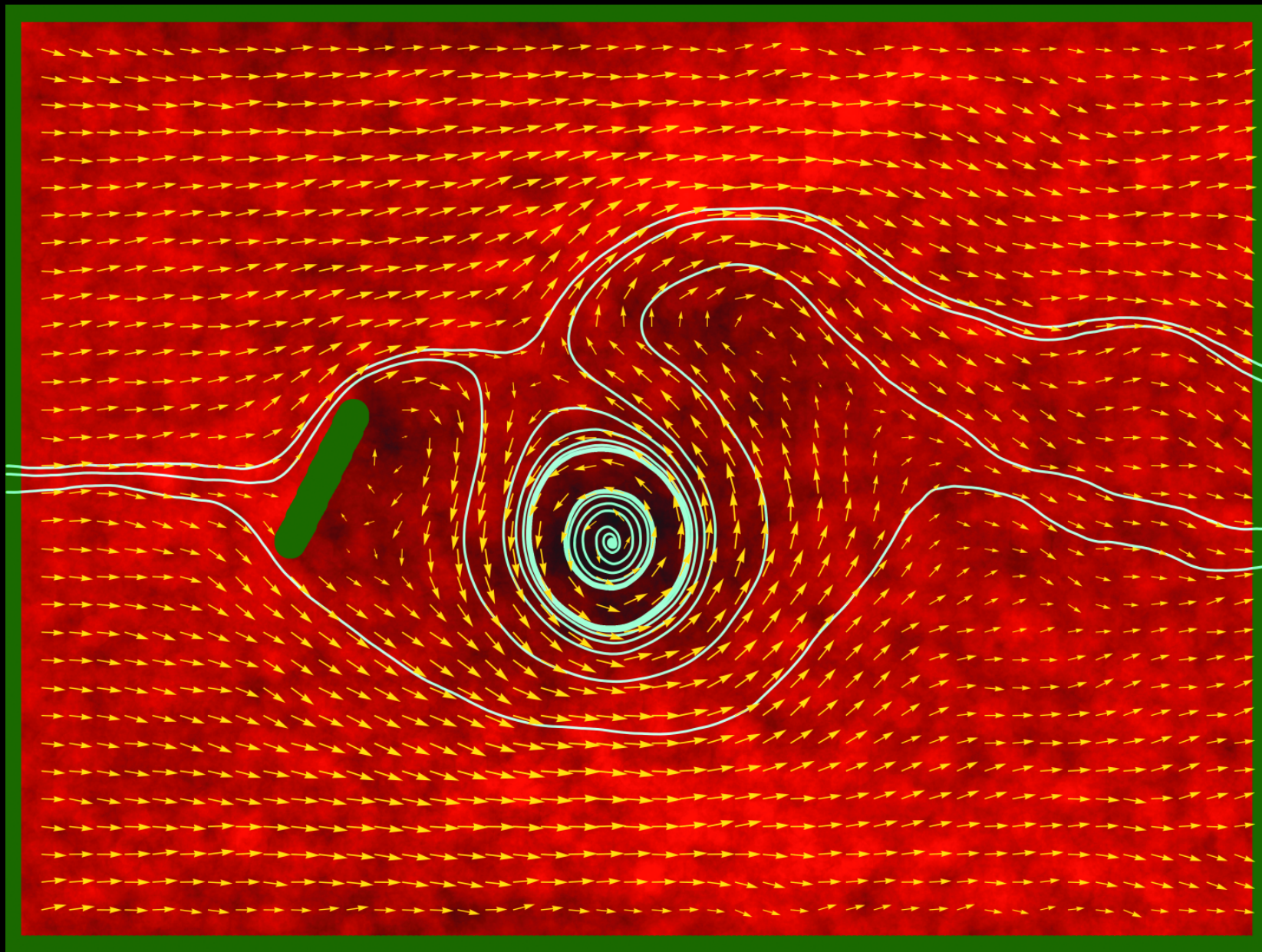
Ламинарный поток



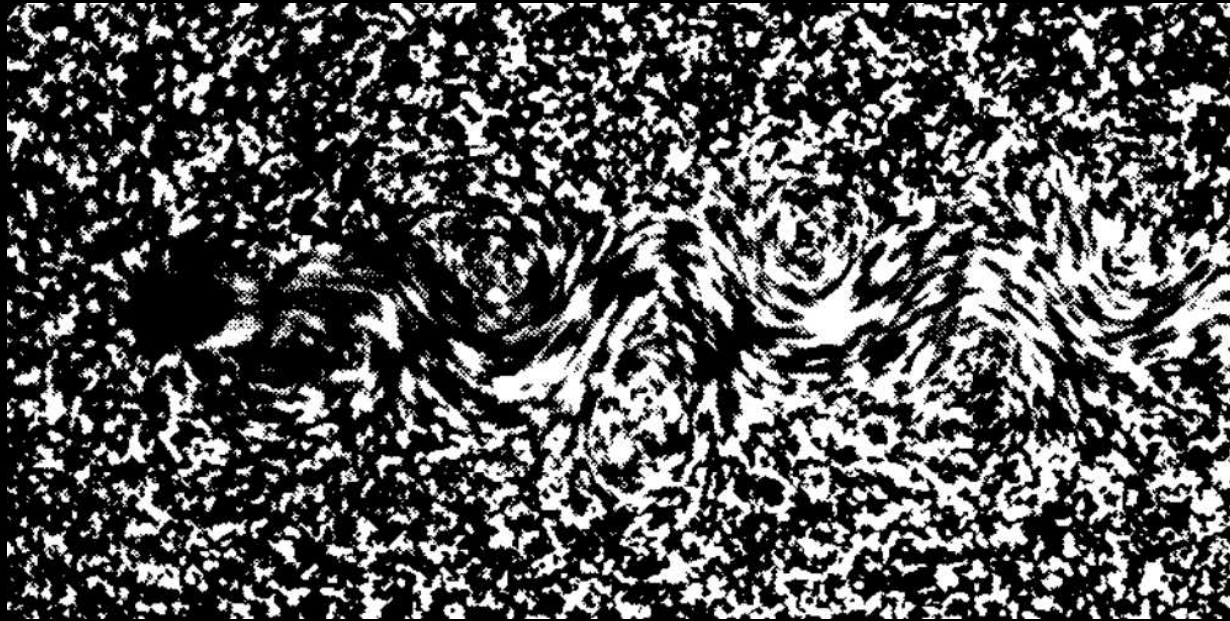
Ламинарный поток



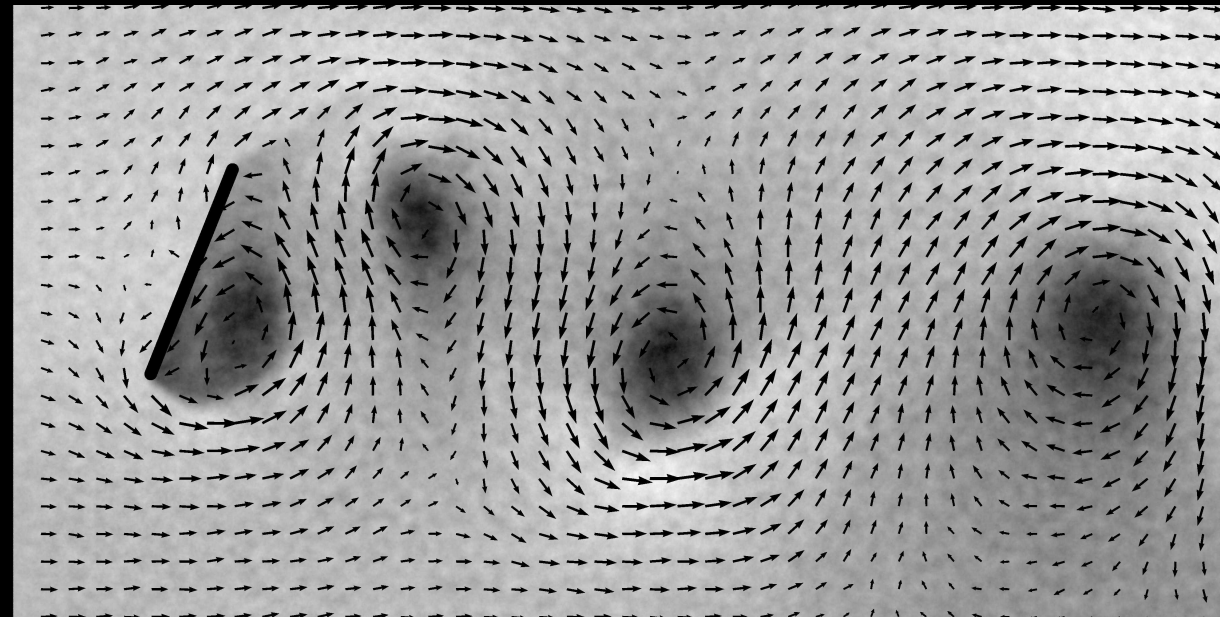
Поток с вихрем



Вихревая дорожка Кармана

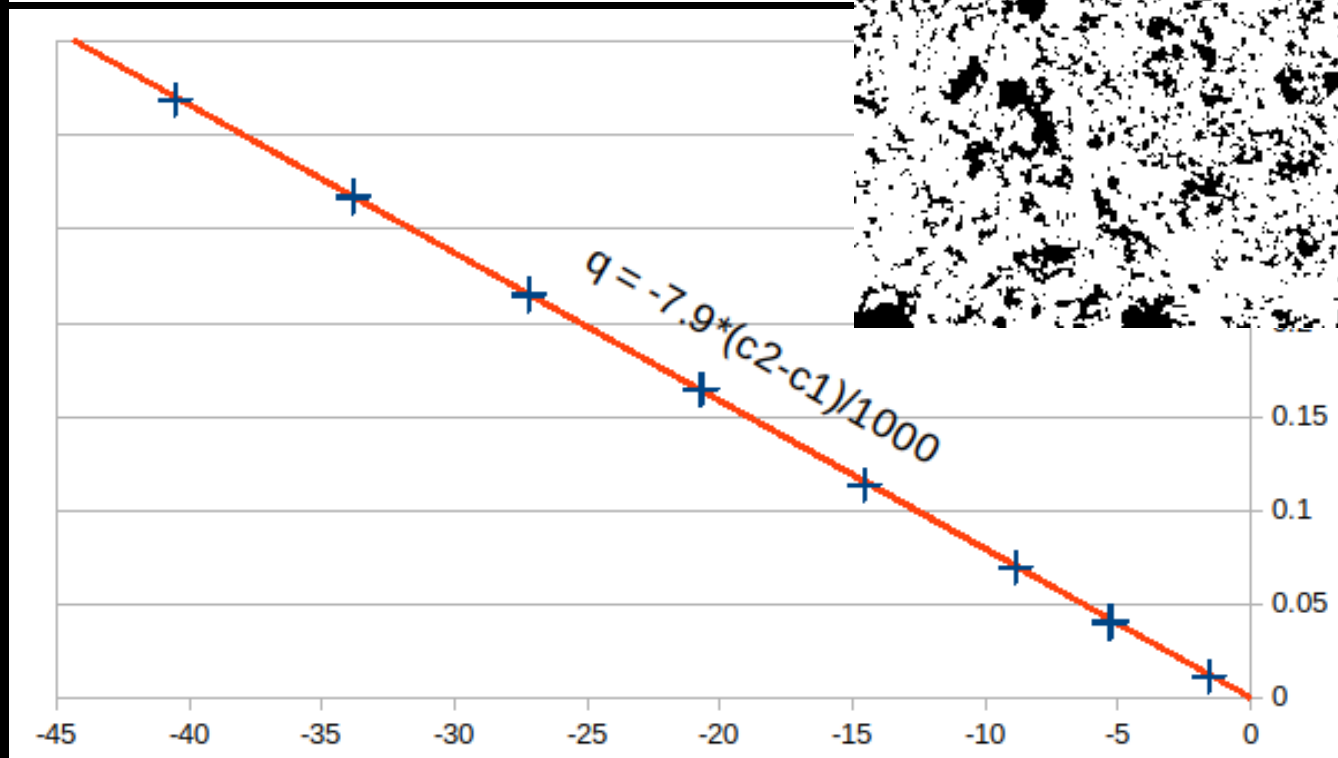
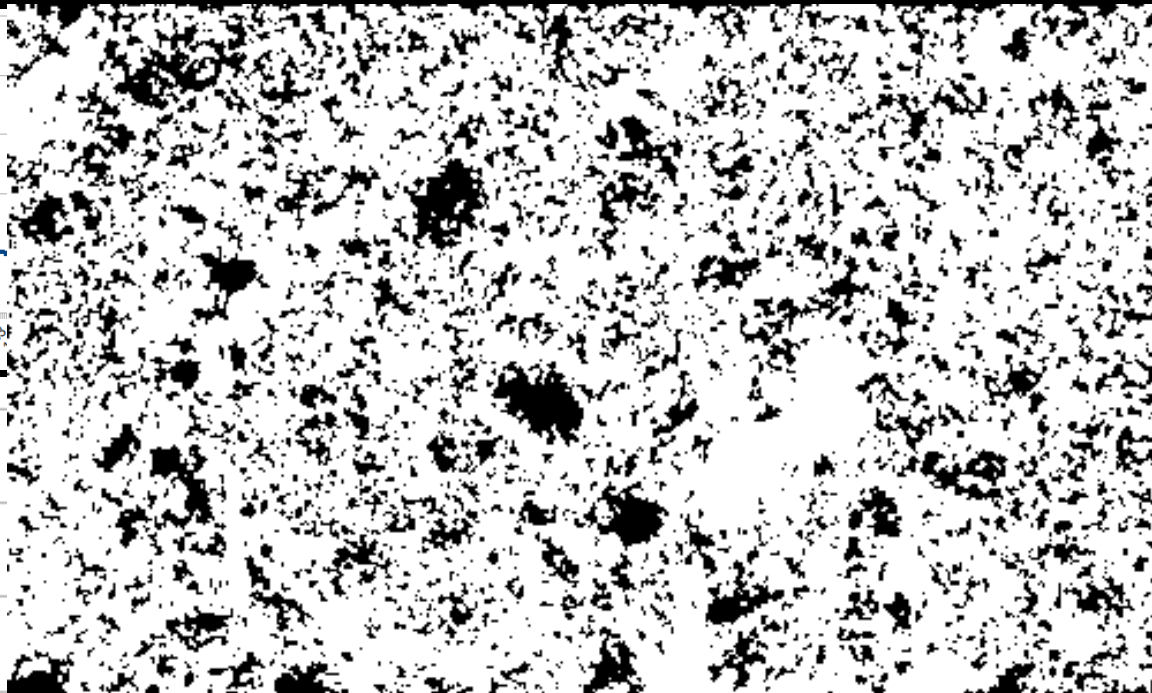
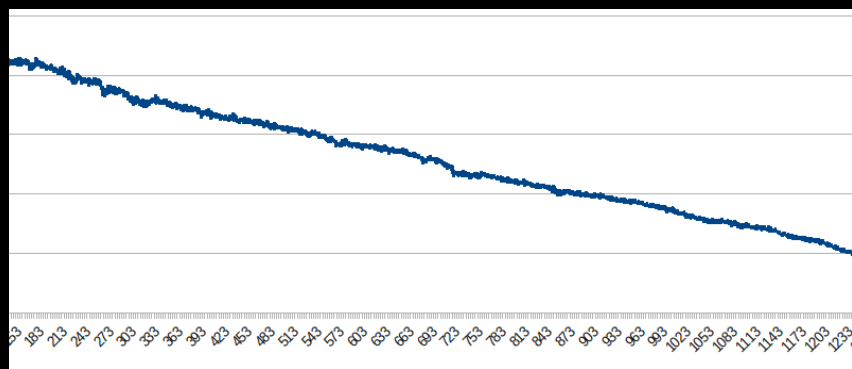


Фотография вихревой дорожки в книге Kármán T, (1963) Aerodynamics. First McGraw-Hill Paperback Edition: ISBN 07-067602-x. рис. 31, стр. 68.

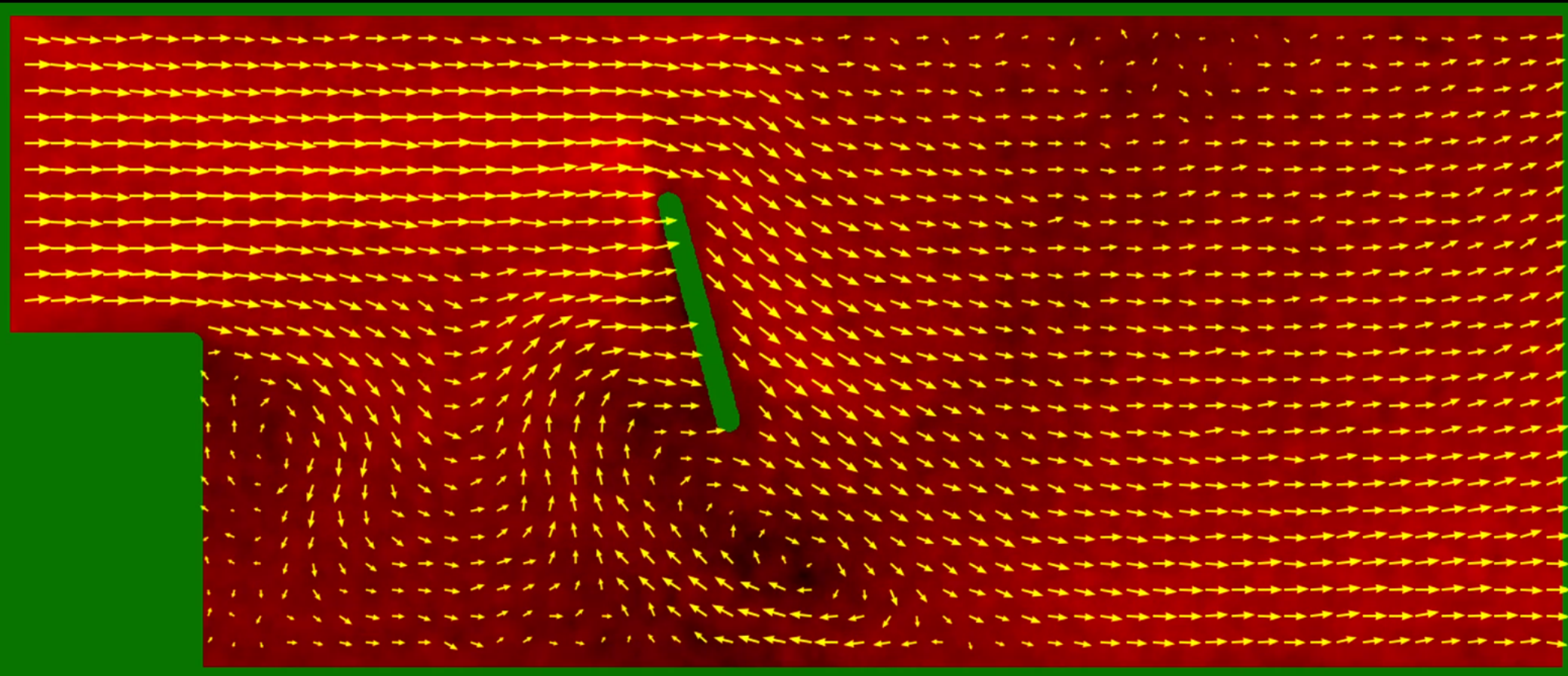


Вихревая дорожка Кармана, результат моделирования. Размер области: 3000 x 1500 клеток. Количество итераций: 30 тысяч. Период отделения пары вихрей: ~11 тысяч итераций. Стрелки отображают направление и скорость потока в точке. Темные участки фона – низкое давление, светлые – 24 высокое.

Моделирование пористой среды. Закон Дарси

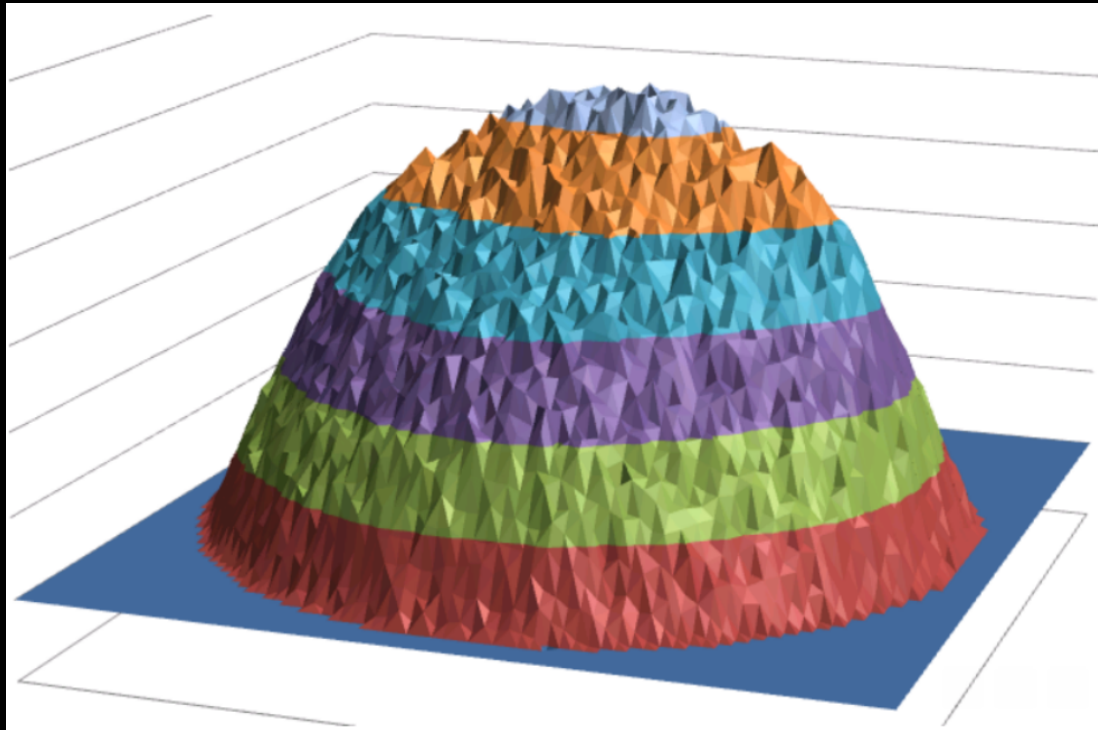


Модель движущихся в газовом потоке твердых объектов

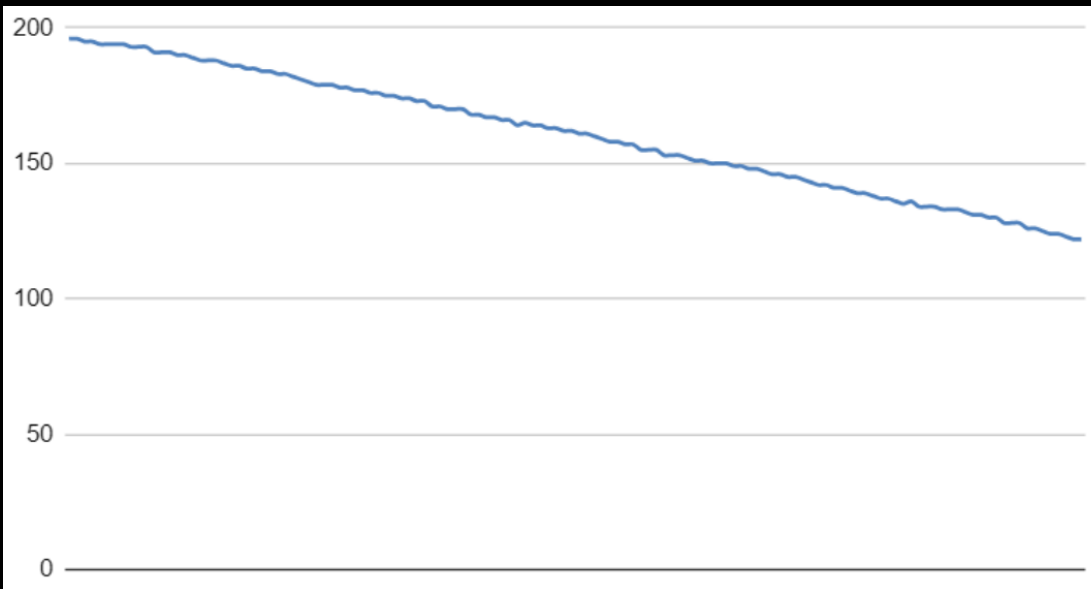


Стержень движется в потоке с переменным сечением канала

Трехмерная многочастичная клеточно-автоматная модель потока вязкой жидкости

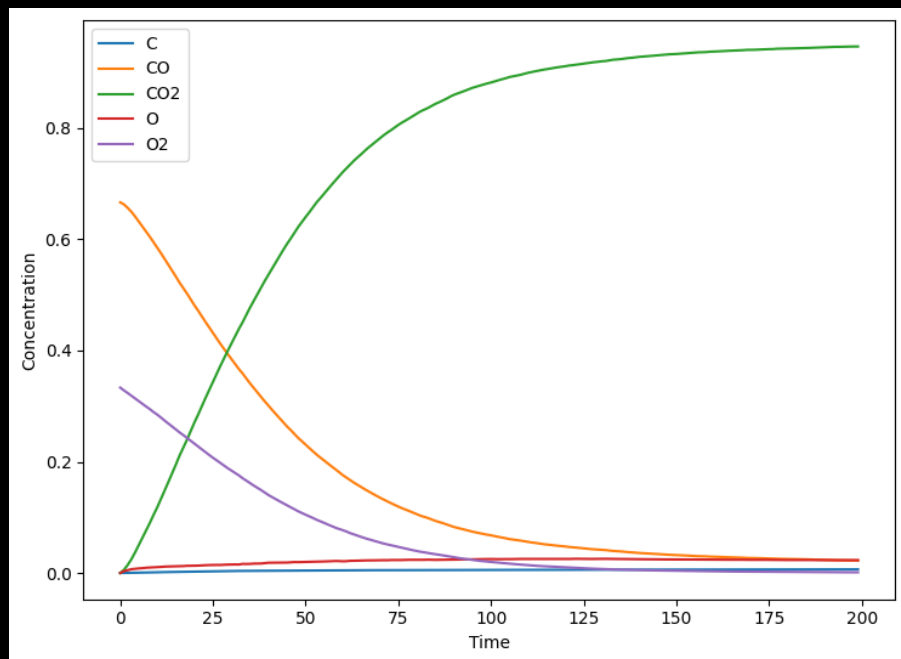


Параболоид Пуазейля

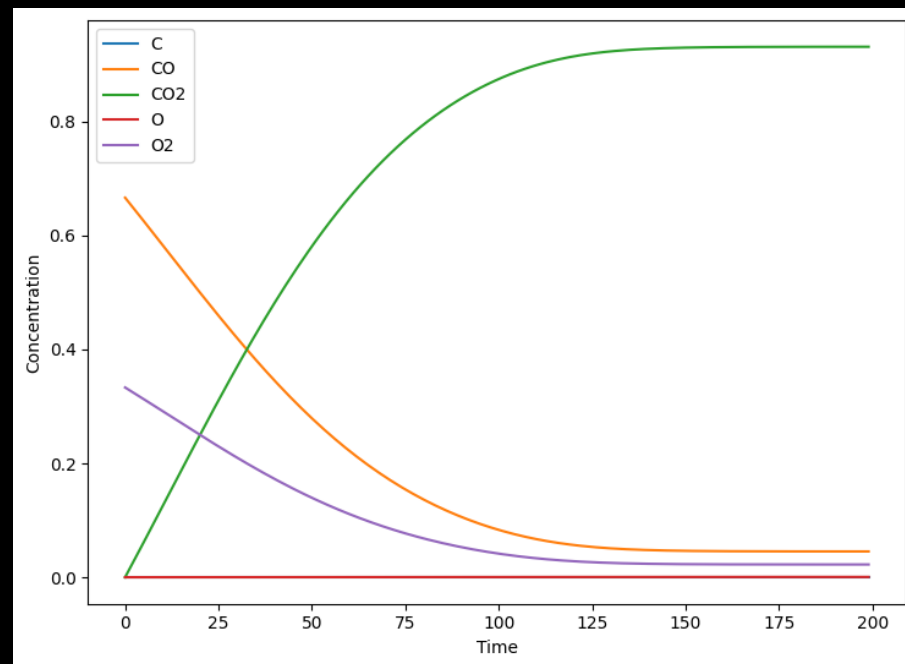


Распределение давления
вдоль капилляра

Модели химических реакций

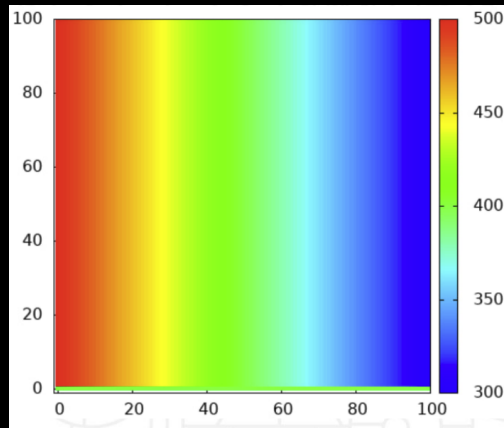


Реакция ZGB, КА-модель

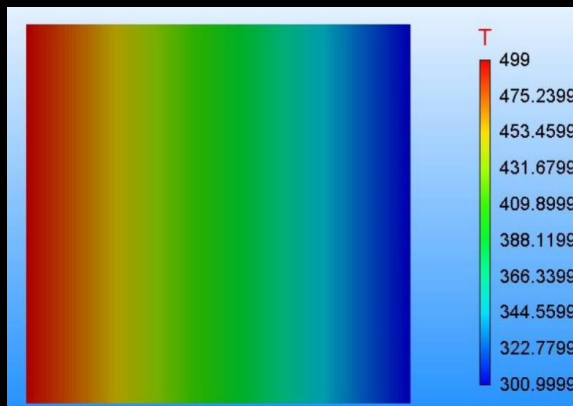
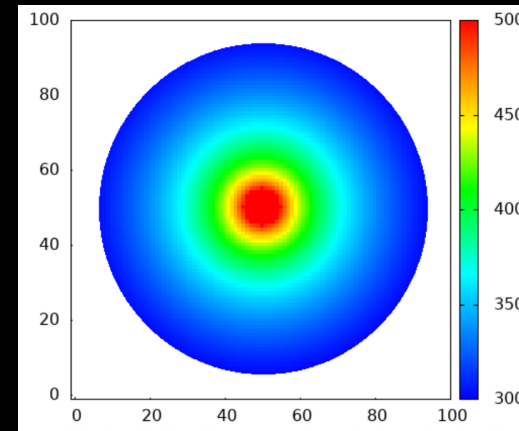


Реакция ZGB в Cantera

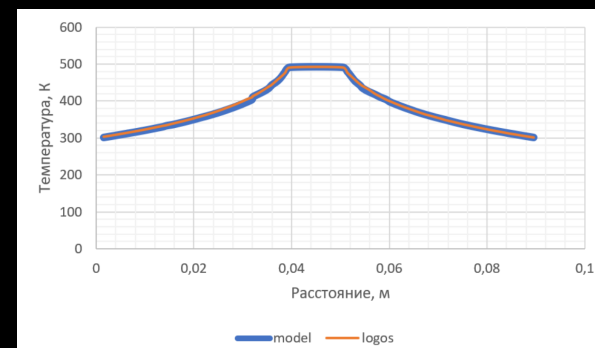
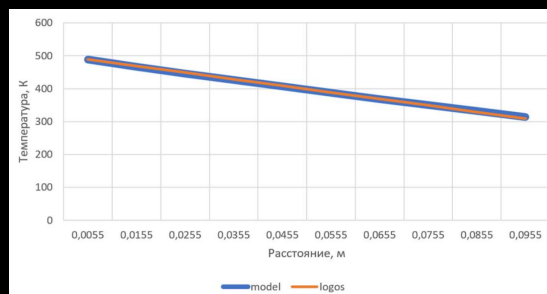
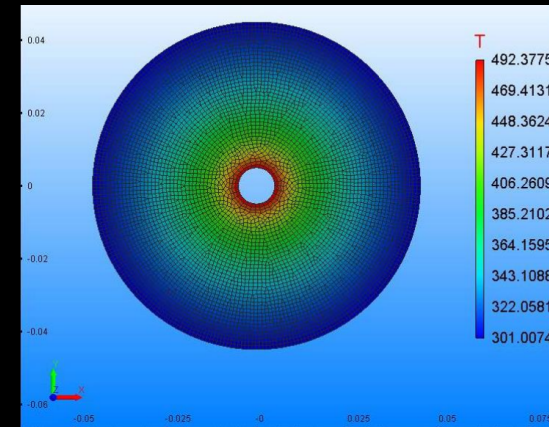
Модель теплопроводности



Клеточный
автомат



Пакет Логос-
Тепло



Распределение температуры в бруске

Распределение температуры
вдоль диаметра цилиндра

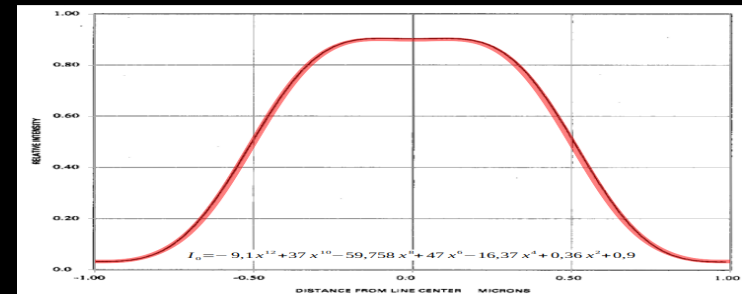
Модель плоской волны в фоточувствительном слое

F. H. Dill, A. R. Neureuther, J. A. Tuttle and E. J. Walker, "Modeling projection printing of positive photoresists," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 22, no. 7, pp. 456-464, July 1975, doi: 10.1109/T-ED.1975.18161.

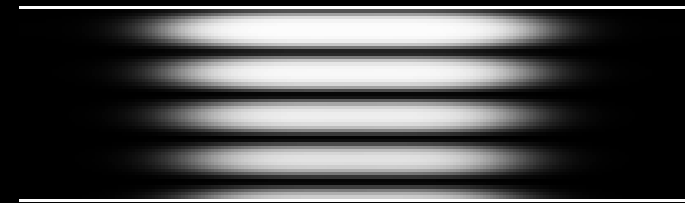
Двумерная клеточно-автоматная модель процесса экспонирования фотопластинки без учета проявки/промывки/сушки и т.п.

На вход подается освещенность (воздушное изображение), на выходе — распределение концентрации засвеченного фотоматериала вглубь пластинки (скрытое изображение)

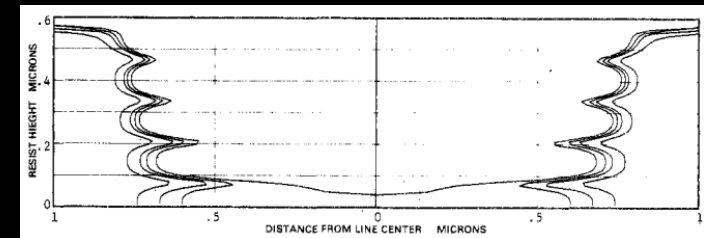
освещенность
вдоль
поверхности
фотопластинки



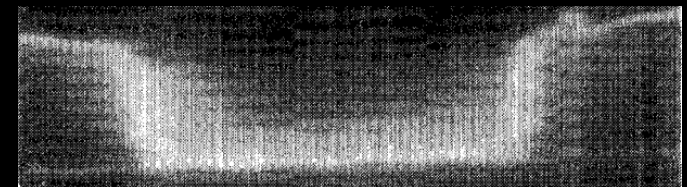
экспонирование
клеточный
автомат



экспонирование
+проявление
+промывка
численные
расчеты

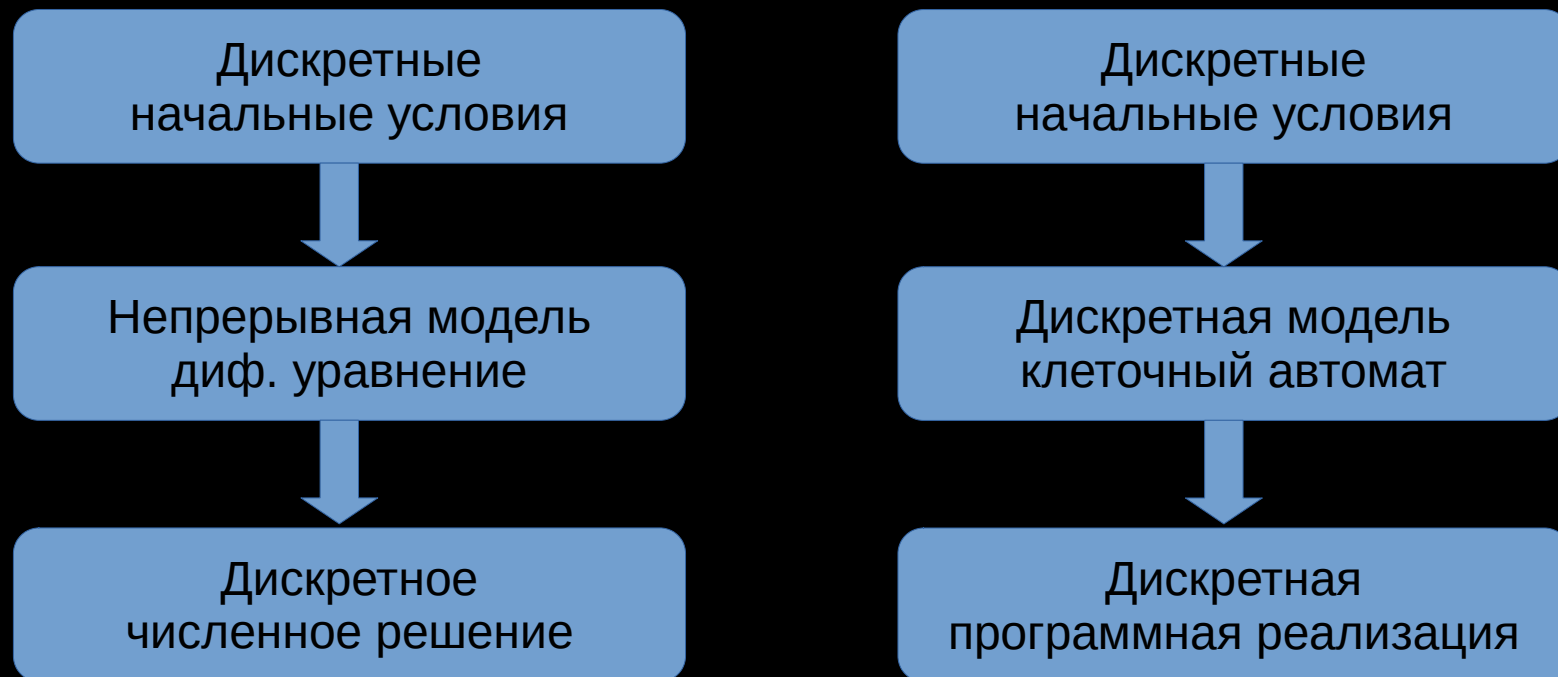


экспонирование
+проявление
+промывка
электронный
микроскоп

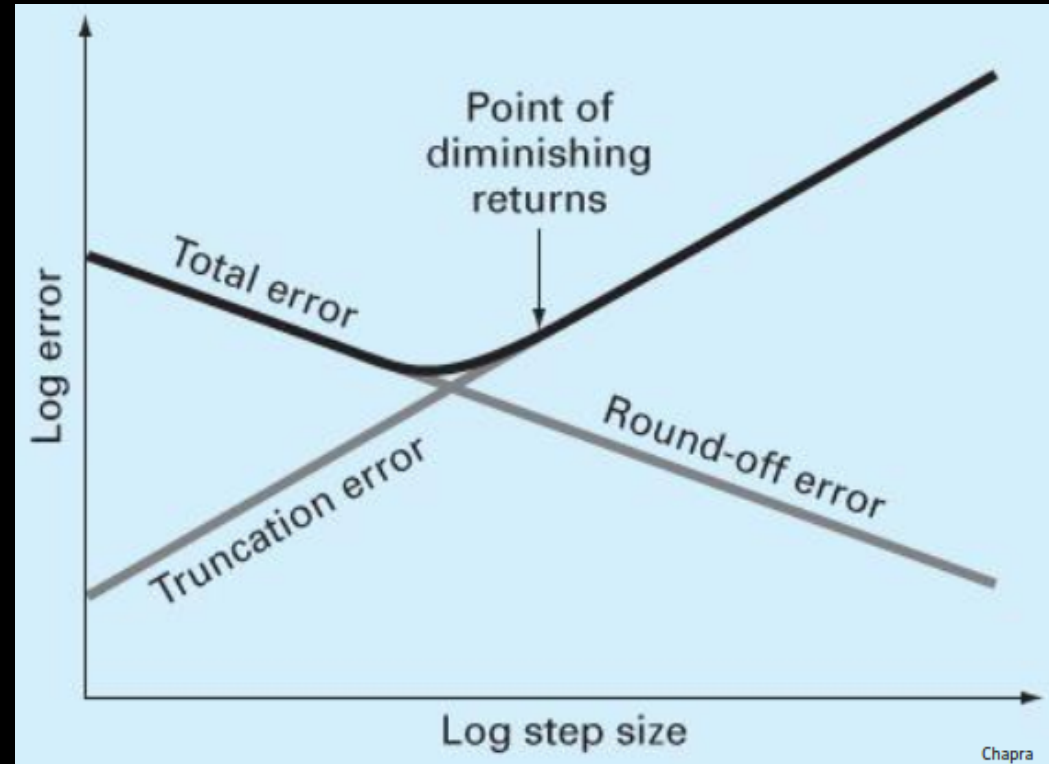
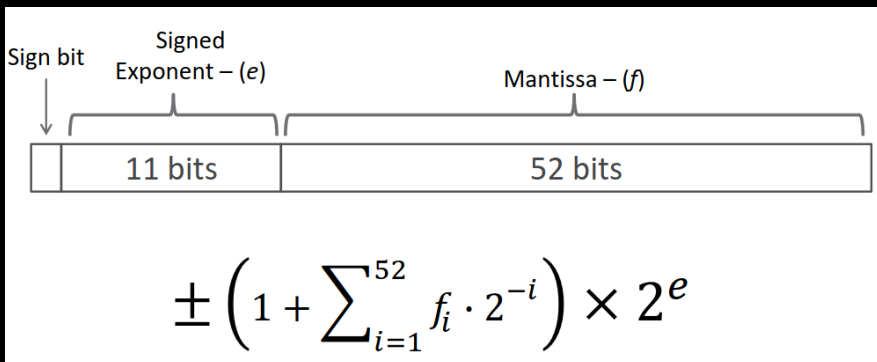
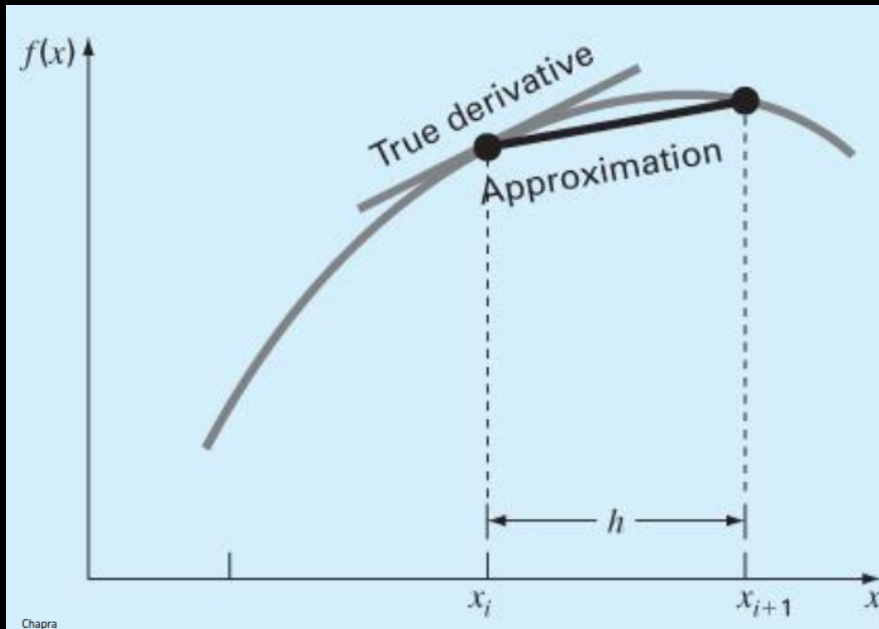


Традиционное моделирование, современные суперкомпьютеры и клеточно-автоматное моделирование

- Традиционные модели последовательные, архитектура суперкомпьютеров параллельная
- Традиционные модели оперируют с вещественными числами, суперкомпьютеры оперируют с двоичными числами



Ошибка дискретизации и ошибка округления в традиционных методах



Giving a total error of

$$\text{err} = \underbrace{\frac{e_{i+1} - e_{i-1}}{2h}}_{\text{Roundoff error}} - \underbrace{\frac{f^{(3)}(\xi)}{6} h^2}_{\text{Truncation error}}$$

«After the arithmetization of physics (Galileo), the mechanization of physics (Newton, Faraday, Maxwell), and the geometrization of physics (Poincaré, Einstein), we may envisage the informatization of physics not only at the statistical level (Boltzmann, Gibbs) but also at the fundamental level.»

Tommaso Toffoli