



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



# **Применение метода Монте-Карло для моделирования физических процессов в РФЯЦ-ВНИИТФ**

Моделирование  
работы специзделий



Оптимизация конструкций  
защиты от излучения

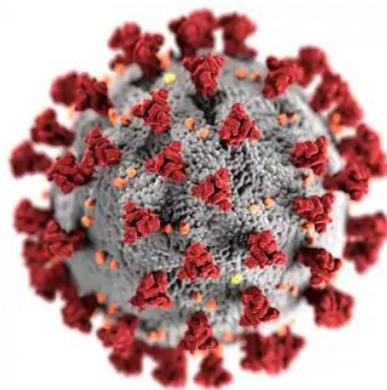


Расчеты нейтронно-физических  
характеристик ядерных реакторов

## Метод Монте-Карло



Радиационная медицина



Моделирование эпидемий



Расчет доз на радиационно-  
загрязненной территории

Расчет дозовых  
нагрузок на технику и  
персонал



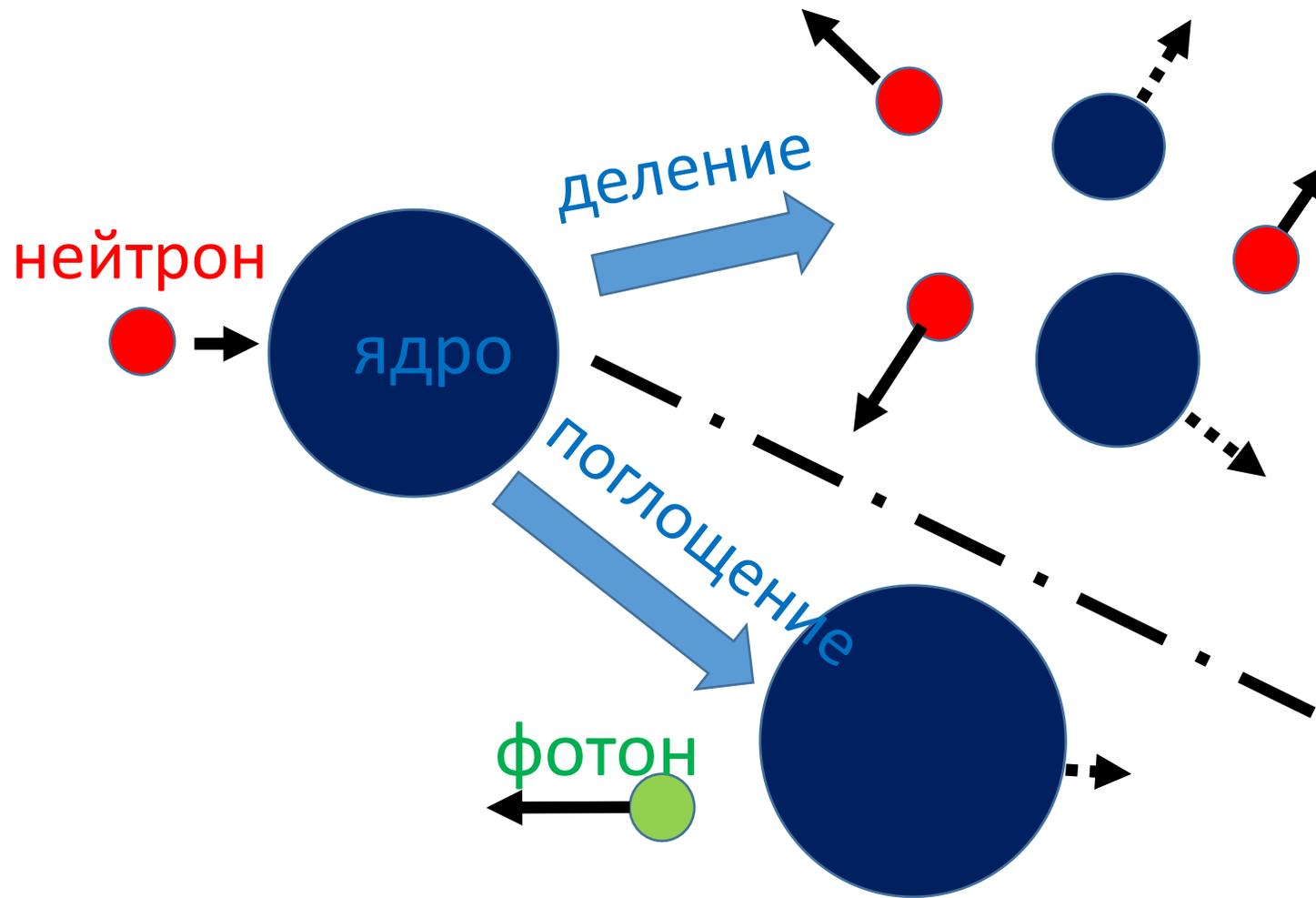
# Ядерные устройства

# Ядерные взрывные устройства

- Ядерные заряды
- Термоядерные заряды
- Заряды для мирных целей

Необходим делящийся материал

# Цепная реакция



временная постоянная:  
 $\alpha$  – характеристика  
системы

число нейтронов  $\sim e^{\alpha t}$

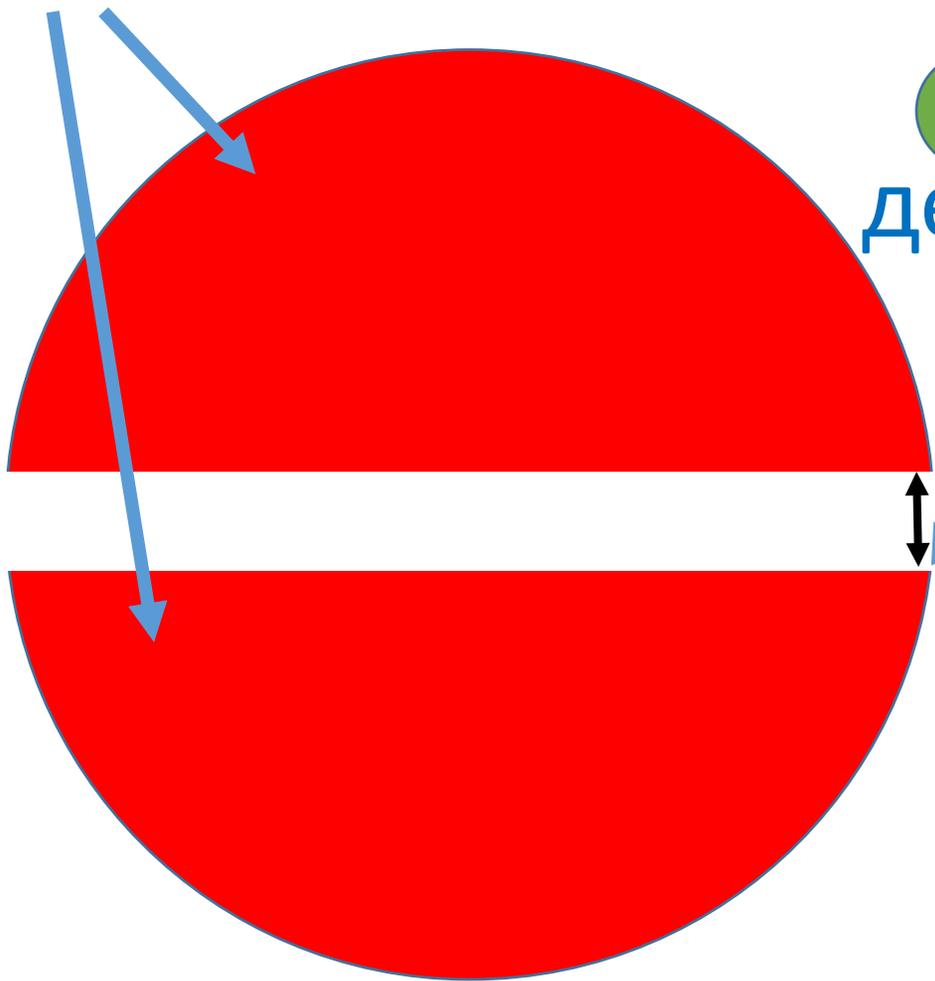
$\alpha < 0$  – подкритичная

$\alpha = 0$  – критичная

$\alpha > 0$  – надкритичная

# Критические сборки

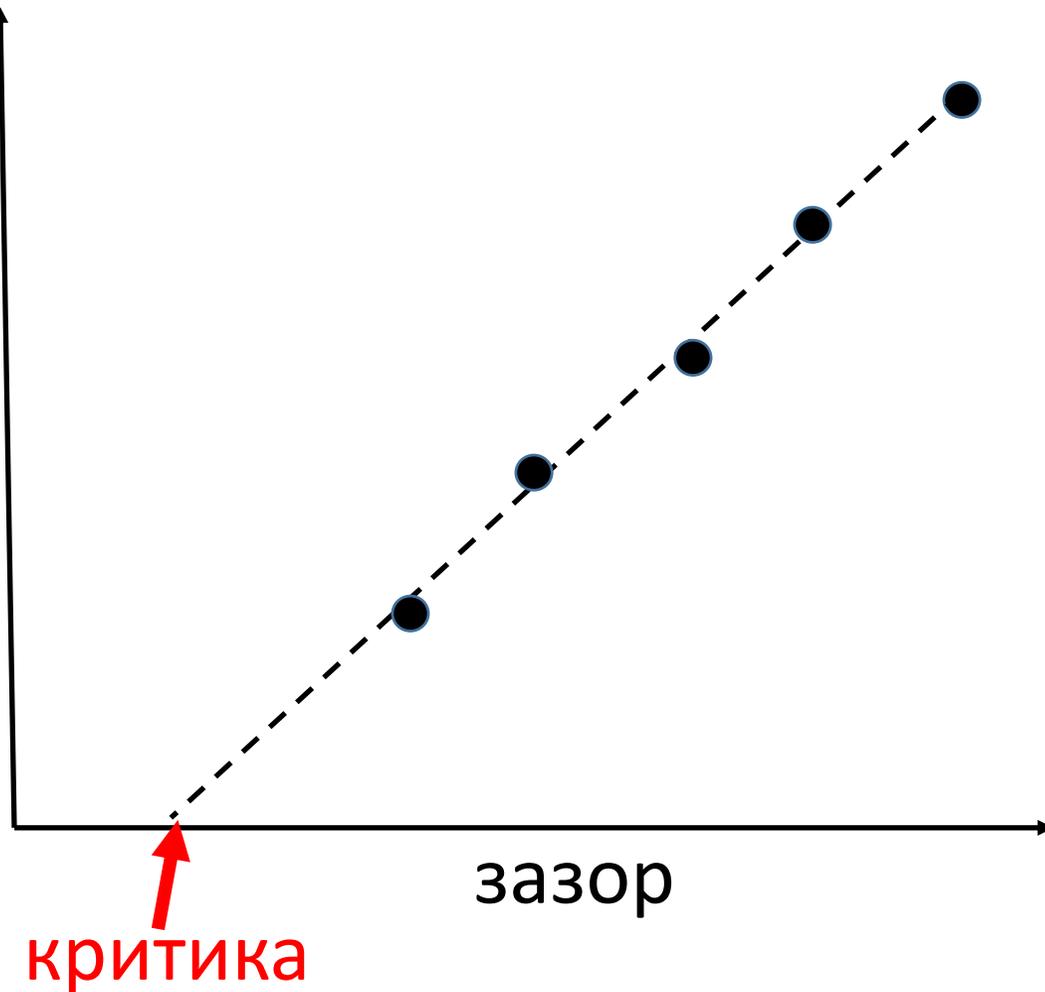
делящийся материал



детектор

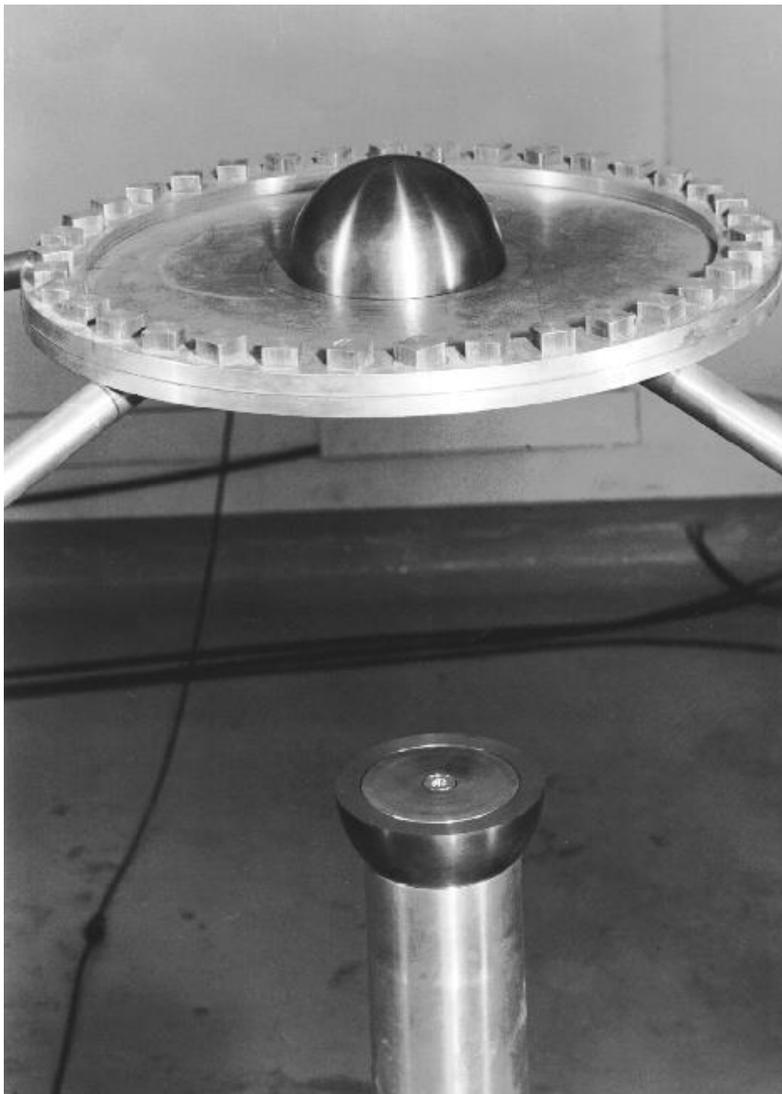
зазор

$1/(\text{число отсчётов})$



# Критические сборки

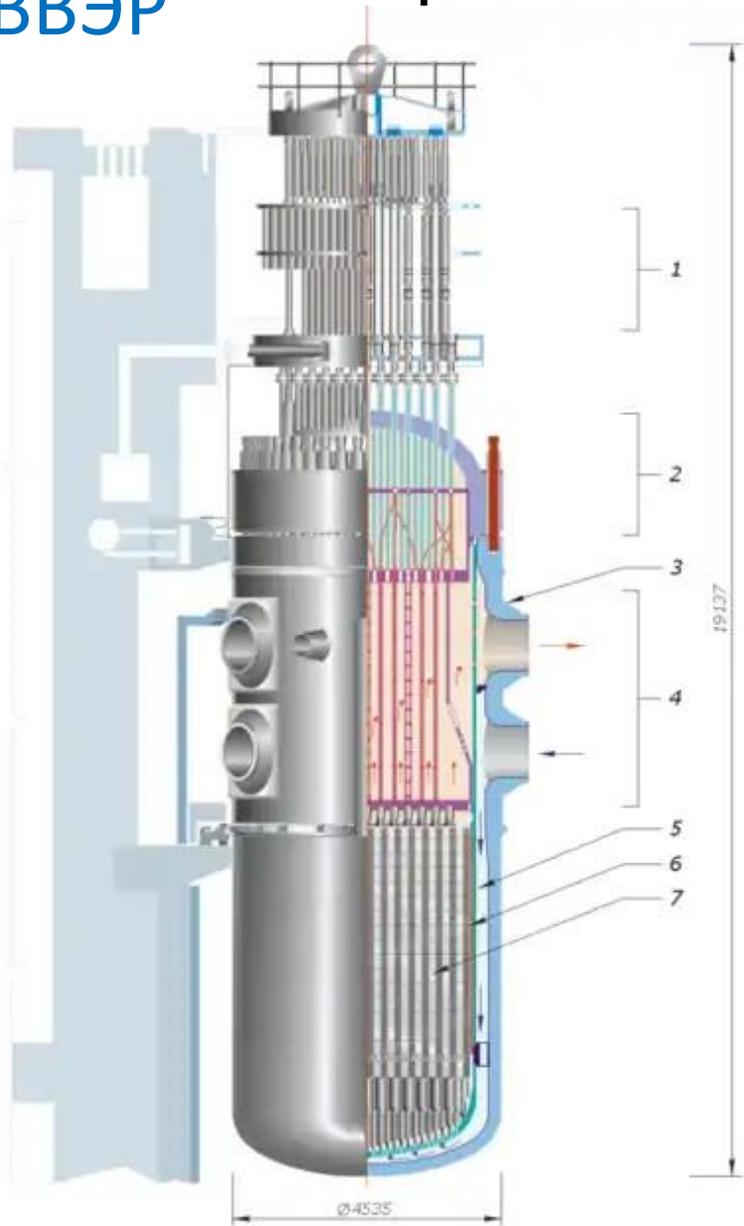
Godiva



ZPPR



# ВВЭР Энергетические реакторы - особенности



## особенности функционирования:

1. продолжительная работа на критике

регулирование критичности  
охлаждение

2. отбор энергии (тепло в электричество)  
передача тепла (например на турбину)

## особенности конструкции:

органы управления

теплоноситель

# Энергетические реакторы - типы

## назначение

наработка ядерных материалов  
производство электроэнергии - АЭС  
ядерные двигатели  
сжигание ядерных отходов  
исследовательские реакторы  
нейтронная терапия

## ТОПЛИВО

основные ядра:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$  (Th) и др.  
твёрдое (ТВЭЛ) или жидкое (оно же теплоноситель)

## энергия нейтронов

от медленных (тепловых) до быстрых

## замедлитель (для медленных нейтронов)

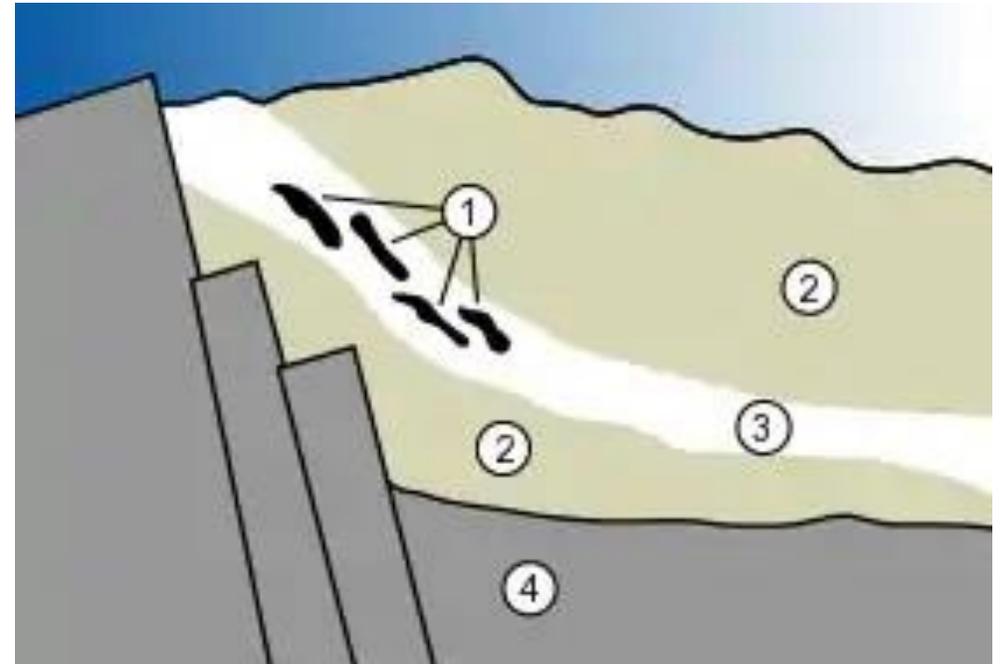
графит, гидриды, в том числе лёгкая и тяжёлая вода

# Природный энергетический реактор

содержание  $^{235}\text{U}$  в природном = 0.720%

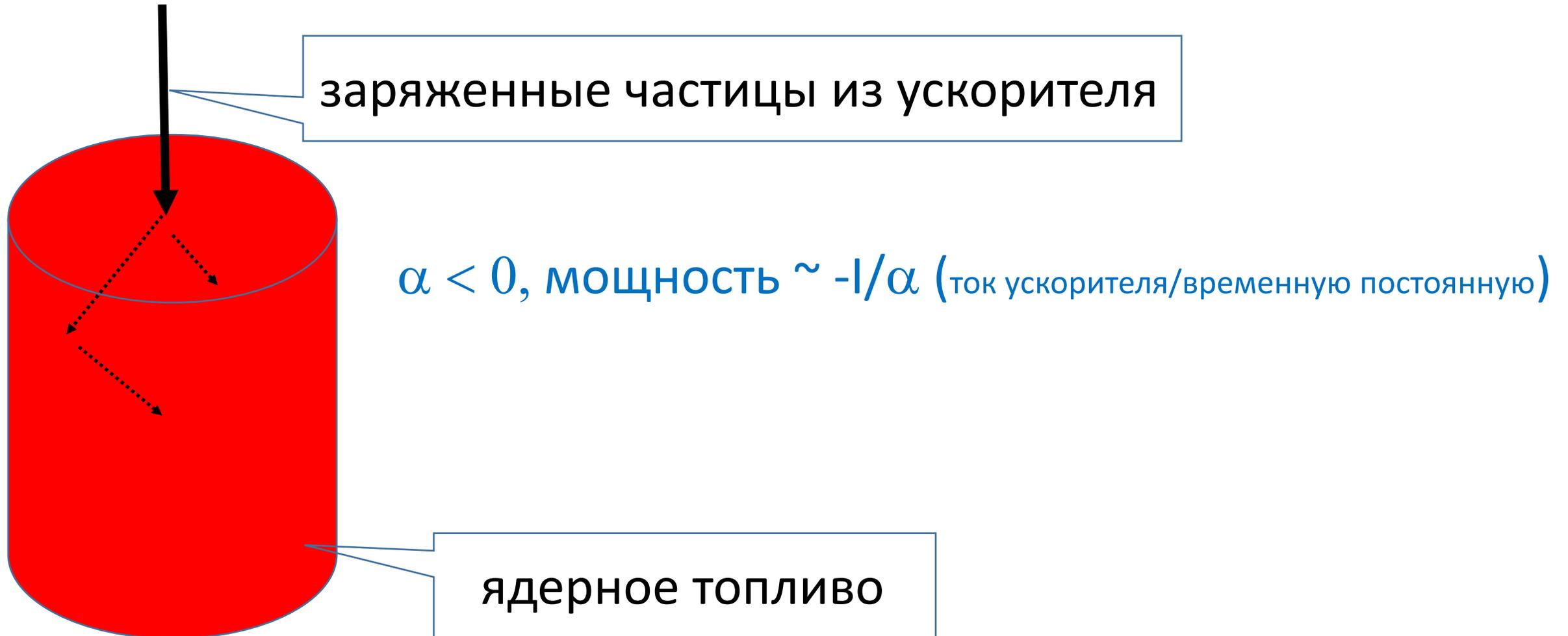
содержание  $^{235}\text{U}$  в руде из Окло = 0.717%

Кто похищает ценный материал?



# Электроядерная установка (ЭЛЯУ)

функционирование реактора = балансирование на критике!



# Ускорительные системы

мишень

$$\alpha \ll 0$$

назначение

фундаментальные исследования

промышленные установки

протонная терапия

заряженные частицы из ускорителя

# Пример: БАК в ЦЕРНе

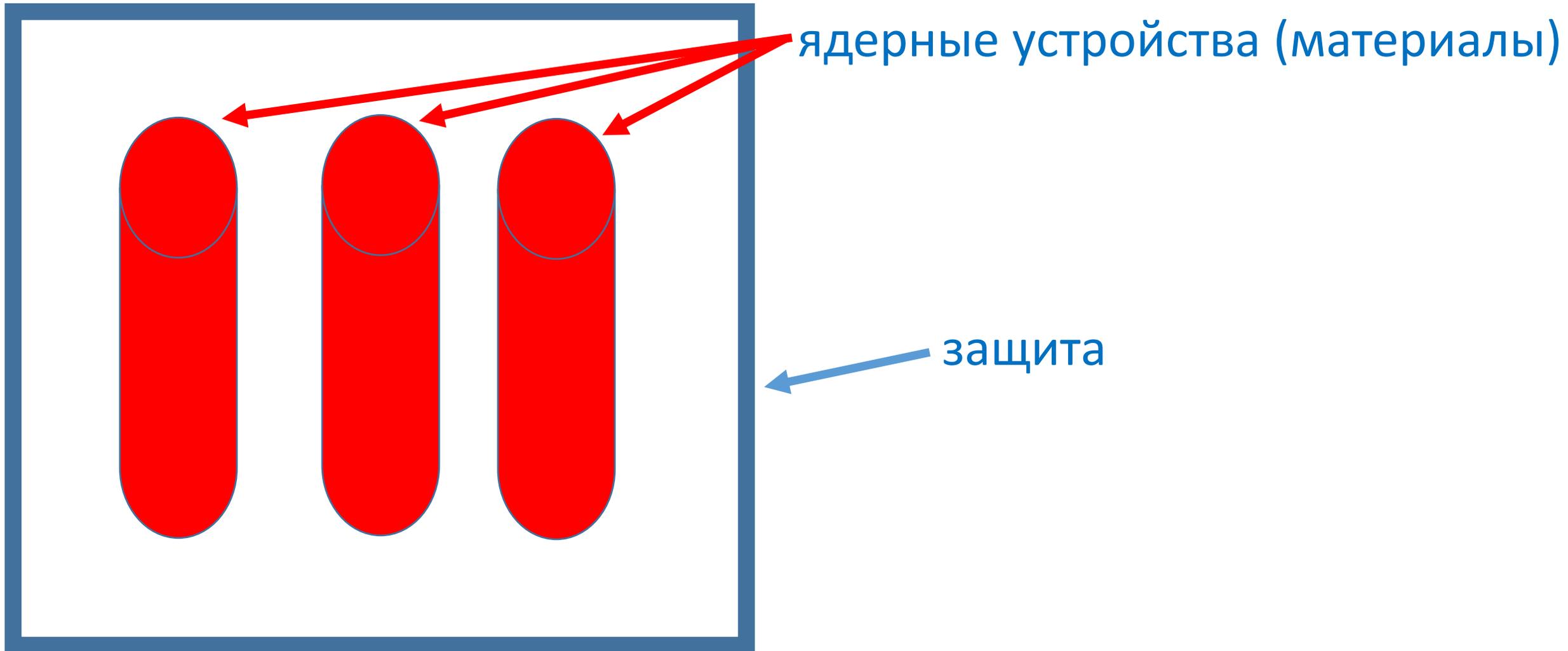
фрагмент ускорителя  
общая длина  $\sim 27$  км



детектор CMS



# Хранение и транспортировка



# Вопросы проектирования ядерных устройств

## проблемы:

полезный эффект

заряды – выделенная энергия

энергетические реакторы – мощность

исследования – полезный сигнал

промышленные установки – глубина просвечивания

медицина – локализация повреждений

ядерная безопасность

радиационная безопасность

мониторинг функционирования

практически для всех стадий проектирования необходимо  
расчётное сопровождение!

# Уравнение переноса

# Уравнение переноса

плотность частиц

источник

$$\frac{d}{dt} n = \hat{R} \cdot n + s$$

оператор реакции

$$\hat{R} = \sum_i \hat{R}_i$$

частота реакции  $\Lambda_i = \sum_i v$

$$\hat{R}_i = \hat{\mu}_i \circ \Lambda_i - \Lambda_i$$

оператор рождения частиц

полная производная по времени

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \hat{T} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial}{\partial \vec{r}} + \vec{a} \frac{\partial}{\partial \vec{v}}$$

для заряженных частиц

# Задачи уравнения переноса

$$\frac{d}{dt} \mathbf{n} = \hat{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{n} + s \quad \text{быстропротекающие процессы}$$

$$\hat{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{n} = \hat{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{n} + s \quad \text{стационарная задача (системы с ускорителями)}$$

$$\alpha \cdot \mathbf{n} + \hat{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{n} = \hat{\mathbf{R}} \cdot \mathbf{n} \quad \text{определение критичности (есть проблемы)}$$

$$\hat{\mathbf{R}} = \hat{\mathbf{R}}_0 + \hat{\mathbf{R}}_p \quad \hat{\mathbf{T}} \cdot \mathbf{n} = \hat{\mathbf{R}}_0 \cdot \mathbf{n} + \frac{1}{k} \hat{\mathbf{R}}_p \cdot \mathbf{n} \quad \text{условно-критическая задача}$$

$$\alpha < 0 \Leftrightarrow k < 1, \quad \alpha > 0 \Leftrightarrow k > 1$$

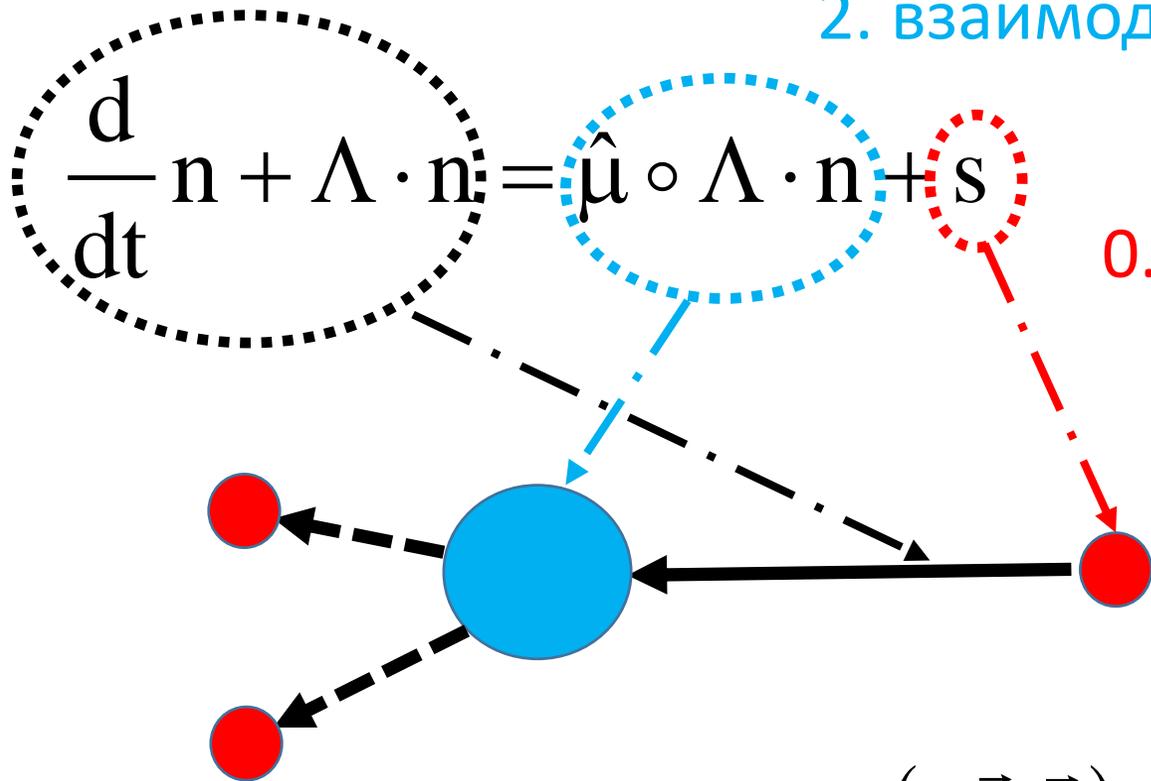
реакция размножения

# Метод Монте-Карло

## моделирование траекторий частиц

1. свободный пробег

2. взаимодействие – рождение вторичных частиц



0. частица источника

$N$  – число траекторий

результаты на  
столкновении

$$X = \sum_{\text{траектории}} \frac{\varphi(t, \vec{r}, \vec{v})}{\Lambda(t, \vec{r}, \vec{v})}$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \rightarrow \int dt d\vec{r} d\vec{v} \cdot n(t, \vec{r}, \vec{v}) \varphi(t, \vec{r}, \vec{v})$$

# Метод Монте-Карло

**Основные операции** при моделировании траекторий:

0. рождения частицы в источнике
1. пробег до взаимодействия со средой
2. взаимодействие частицы со средой
3. повторение с пункта 1 для каждой вторичной частицы

Результаты расчёта – функционалы вида:

$$\int dt d\vec{r} d\vec{v} \cdot n(t, \vec{r}, \vec{v}) \varphi(t, \vec{r}, \vec{v})$$

Например, количество реакций и вторичных частиц, поглощенная энергия, число пересечений границ веществ частицами

# Численное решение задач переноса

аппроксимация набором функций (включая конечные разности)

сходимость –  $N^{-1}$  ( $N$  – количество функций)

геометрия – аппроксимация полиэдрами

описание взаимодействий – приближённое

теория возмущений – расчёт сопряжённой функции

распараллеливание – насыщение при увеличении числа ядер

статистическое моделирование

сходимость –  $N^{-1/2}$  ( $N$  – количество траекторий)

геометрия – приближается как угодно точно

описание взаимодействий – с точностью до опытных данных

теория возмущений – дополнительные приближения

распараллеливание – на любое количество независимых ядер

# Направления развития методов статистического моделирования

## Уточнение данных о взаимодействиях

### Описание взаимодействий:

1. функциональная зависимость от параметров частиц
2. алгоритм моделирования

### Направления работ:

дифференциальные эксперименты – прямая оценка характеристик  
интегральные эксперименты – сравнение значений функционалов  
разработка математических моделей взаимодействий  
разработка методов моделирования взаимодействий

# Направления развития методов статистического моделирования Совершенствование расчётных методик

1. Методы понижения дисперсии
2. Оценка собственных значений ( $\alpha$  и  $k$ )
3. Теория возмущений
4. Распараллеливание алгоритмов
5. Расширение функциональности

Направления развития методов  
статистического моделирования  
Самосогласованный учёт других физических процессов

## существенно нелинейные задачи

1. тепломассоперенос
2. изменение ядерного состава материалов (ядерная кинетика)
3. замена топлива
4. регулирование критичности

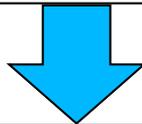
# Моделирование эпидемий вирусных инфекций

# Сходство и различие моделирования кинетики цепных ядерных реакций и развития вирусной эпидемии

- Описываются близкими дифференциальными уравнениями, следовательно имеют похожие типы решений.
- Методы решения уравнения переноса нейтронов и кинетики ядерных реакций, типы возможных решений хорошо известны.
- Один из методов, метод Монте-Карло, может быть достаточно просто адаптирован к моделированию развития эпидемии.

## Ядерный реактор:

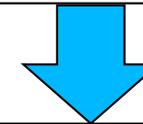
- Сечения взаимодействия нейтронов с веществом определяются в независимых экспериментах и хорошо известны
- Геометрия и состояние системы хорошо известны и слабо изменяются при штатной работе
- Эффективность мер регулирования режима работы строго определена



Точное описание поведения системы, возможность предсказания количественных результатов

## Вирусная эпидемия:

- Характеристики инфекции, параметры протекания заболевания не известны и определяются в процессе протекания эпидемии
- Состояние системы (популяции), устойчивость (иммунитет) к инфекции не известны
- Эффективность мер сдерживания развития эпидемии зависит от поведения индивидуума



Приближенное описание поведения системы, возможность предсказания результатов только на качественном уровне

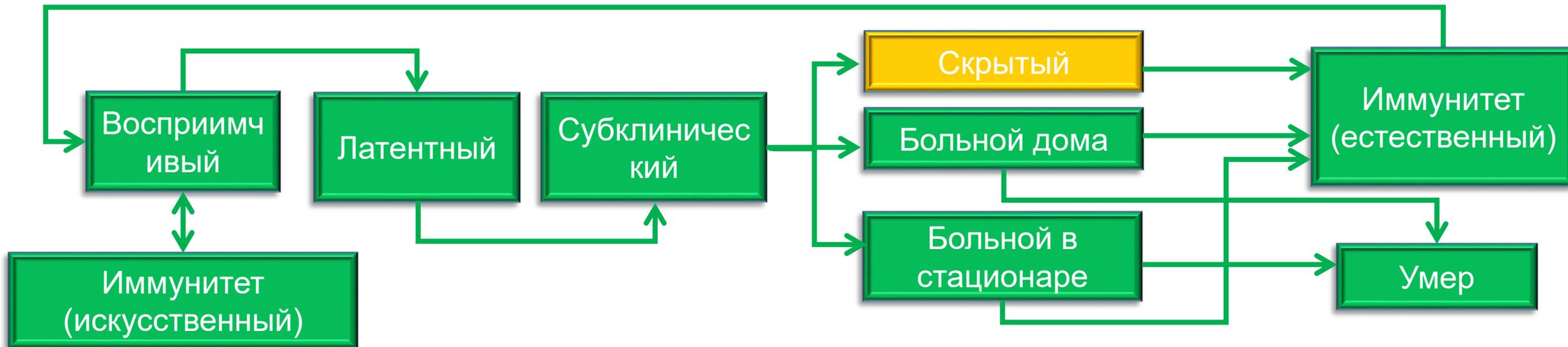
**Основная задача компьютерного моделирования развития эпидемии - прогноз эффективности регулирующих мер для обоснованного принятия решений с целью минимизации неблагоприятных последствий для населения.**

# Агентная модель

## Аналогии с моделированием переноса нейтронов

Агентная модель вирусной инфекции	Перенос нейтронов и ядерные реакции
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Виртуальная популяция</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• профессиональные группы (дошкольники, учащиеся, студенты, работники офисов и предприятий, работники сферы жизнеобеспечения, пенсионеры)</li> <li>• возрастные группы и пол</li> <li>• наличие хронических заболеваний</li> <li>• место и условие проживания</li> </ul> </li> </ul>	<p>Многогрупповое приближение</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Виртуальная городская среда - зоны контакта</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• квартира (дом)</li> <li>• место работы или учебы</li> <li>• транспорт (3 типа – метро, автобус (троллейбус, трамвай) и микроавтобус)</li> <li>• магазины и торговые центры (3 типа – гипермаркеты, супермаркеты, магазины шаговой доступности)</li> <li>• общественные места (стадионы, театры, фитнес и т.п.)</li> </ul> </li> <li>➤ <b>Модель перемещения населения (транспортные потоки)</b></li> </ul>	<p>Гетерогенная среда</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Медицинская модель заболевания</b></li> <li>➤ <b>Модель поведения</b></li> </ul>	<p>Кинетика ядерных реакций</p>

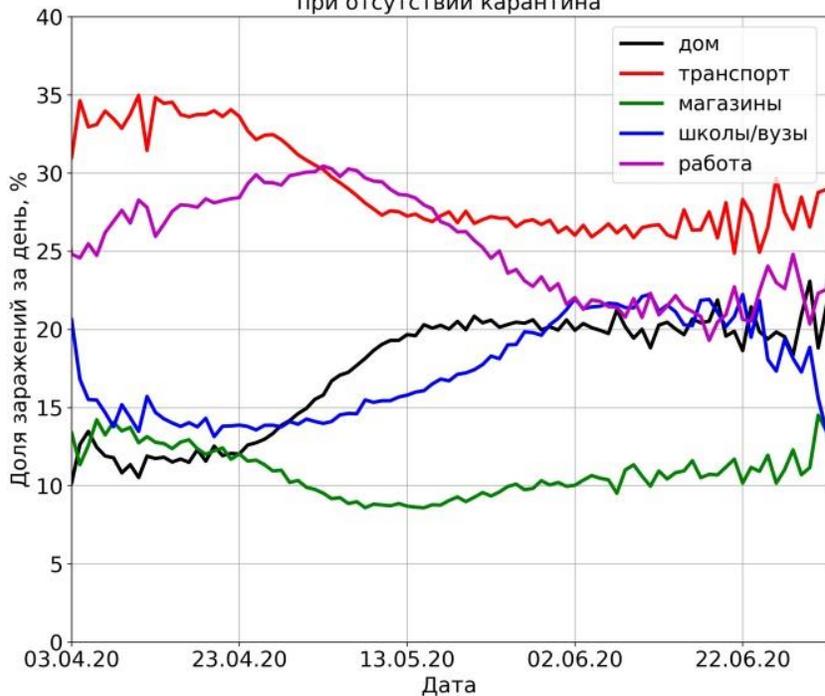
# Фазы заболевания



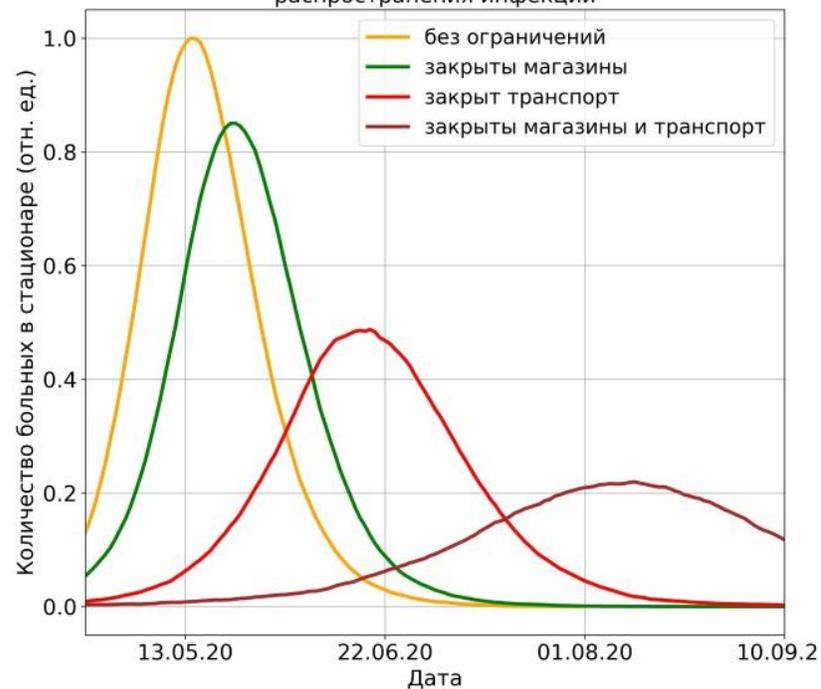
Фаза болезни	Описание фазы	Период [день]
ВОСПРИИМЧИВЫЙ	Здоровый человек, может заразиться	-
ЛАТЕНТНЫЙ	Инфицирован, но не заразен	3
СУБКЛИНИЧЕСКИЙ	Заразен, но не проявляет симптомов болезни	2
СКРЫТЫЙ БОЛЬНОЙ	Больной не выявлен, заразен	4
БОЛЬНОЙ ДОМА	Больной изолированный дома, заразен для семьи	10
БОЛЬНОЙ В СТАЦИОНАРЕ	Изолированный больной в больнице	12
ИММУНИТЕТ	Здоровый человек, не может заразиться	180/120-δ

# Оценка влияния каналов распространения инфекции и эффекта от регулирующих мер

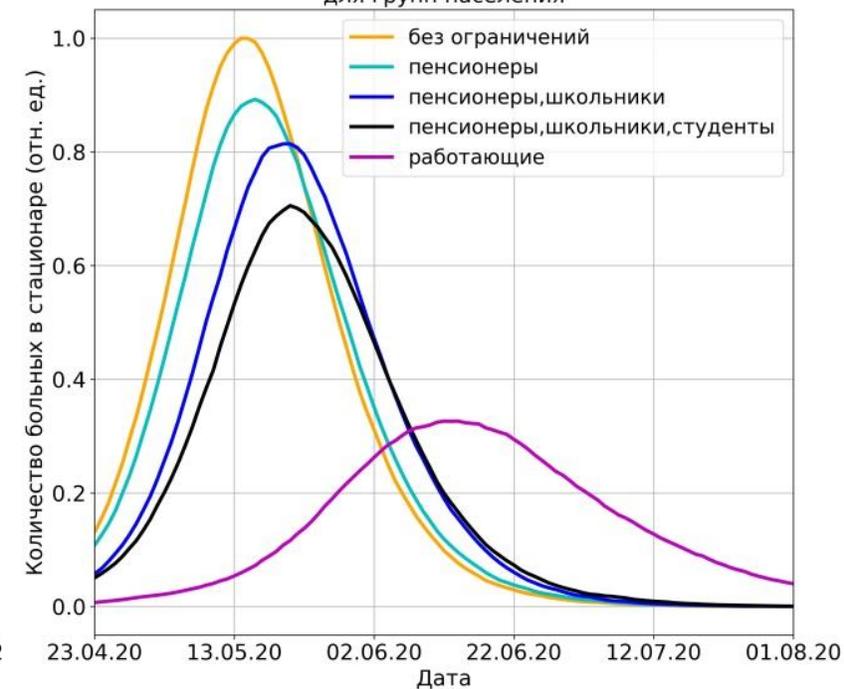
Распределение заражений при отсутствии карантина



Оценка влияния каналов распространения инфекции



Оценка влияния ограничений для групп населения

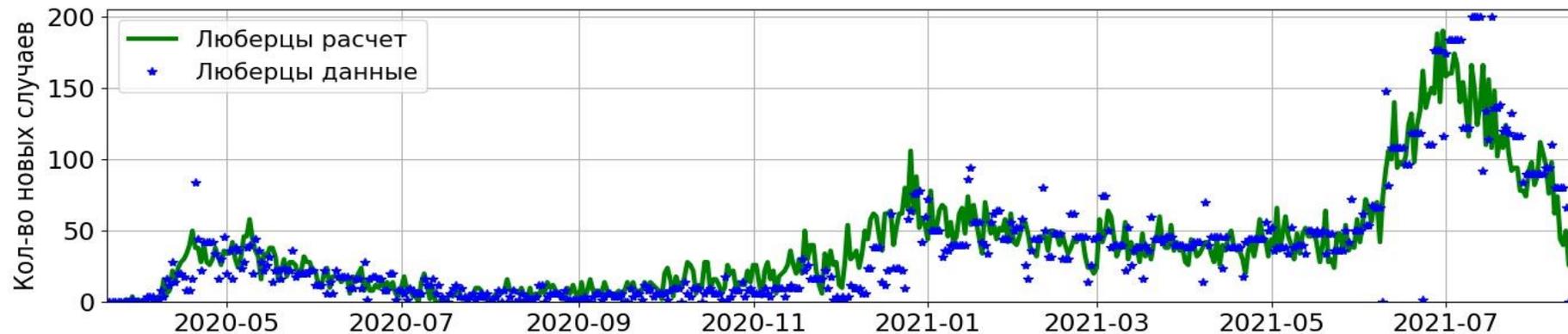
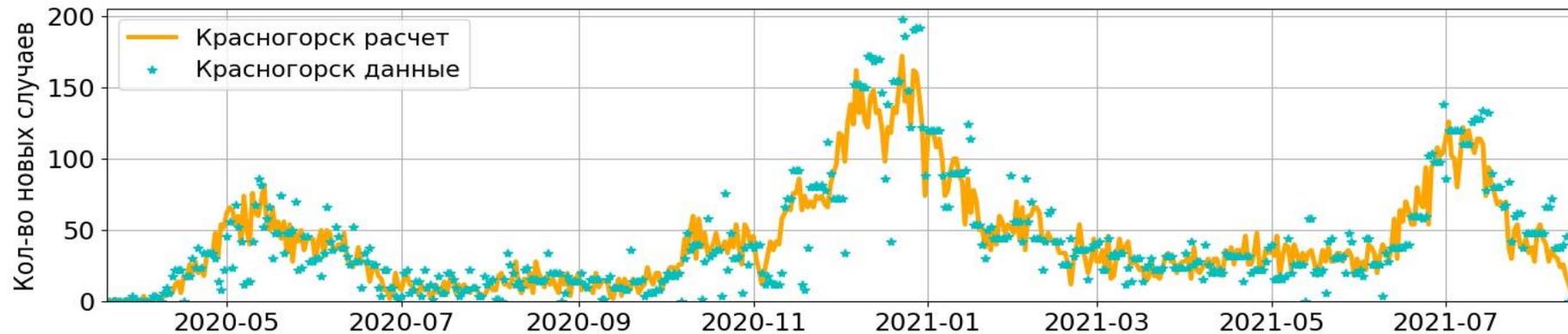
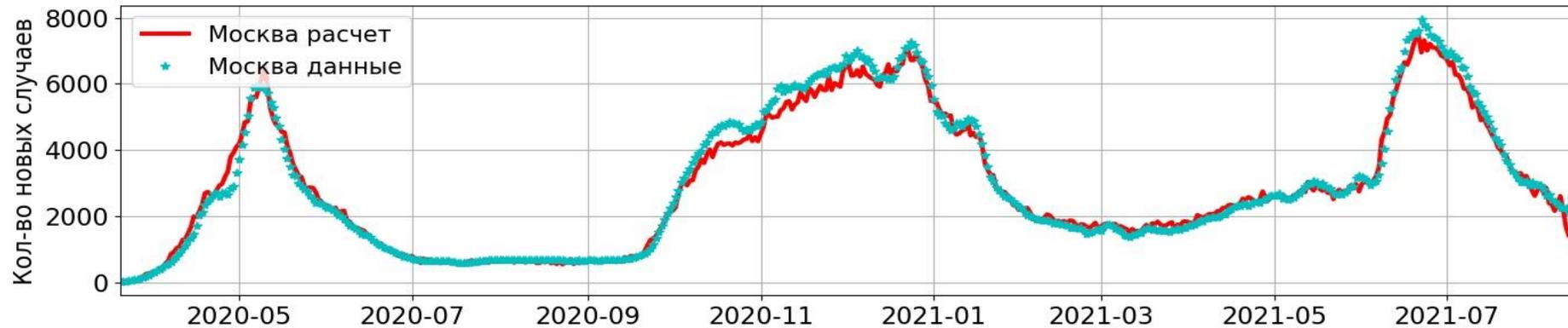


Ограничения	Магазины	Транспорт	Пенсионеры	Пенсионеры, школьники	Пенсионеры, школьники, студенты	Работающие (кроме сферы жизнеобеспечения)
Коэффициент уменьшения макс. нагрузки на мед. систему	1.2	2.0	1.1	1.2	1.4	3.0

# Моделирование развития эпидемии COVID-19 в Москве с учетом двух штаммов



# Моделирование развития эпидемии COVID-19 в Москве и Московской области



## Возможные темы работ студентов

1. Разработка методов Монте-Карло для неаналогового моделирования переноса нейтронов и гамма-квантов с целью повышения эффективности расчетов трудоемких задач.
2. Численная реализация моделей взаимодействия высокоэнергетических частиц с веществом методом Монте-Карло с использованием алгоритмов параллельных вычислений применительно к моделированию ускорителей и электро-ядерных установок.
3. Моделирование управления процессами в жидко-солевом ядерном реакторе.
4. Разработка высокоэффективных параллельных алгоритмов и программ для расчета переноса частиц методом Монте-Карло.
5. Моделирование развития эпидемии вирусной инфекции с применением агентной модели.

### Контакты:

Зацепин Олег Владимирович

[o.v.zatsepin@vniitf.ru](mailto:o.v.zatsepin@vniitf.ru)

(+7) 932 016 65 67

# Литература

1. Кейз К, Цвайфель П. Линейная теория переноса. М.: «МИР», 1972.
2. Спанье Д, Гелбард Э. Методы Монте-Карло и задачи переноса нейтронов. М.: Атомиздат, 1972.
3. Михайлов Г.Н. Некоторые вопросы теории методов Монте-Карло. Новосибирск: «НАУКА», 1972.
4. Кипин Д. Физические основы кинетики ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.
5. Белл Д., Глесстон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974.
6. Франк-Каменецкий А.Д. Моделирование траекторий нейтронов при расчете реакторов методом Монте-Карло. М.: Атомиздат, 1978.
7. Кольчужкин А.М., Учайкин В.В. Введение в теорию прохождения частиц через вещество. М.: Атомиздат, 1978, 256 с.
8. Смелов В.В. Лекции по теории переноса нейтронов. М.: Атомиздат, 1978, 216 с.
9. Золотухин В.Г., Майоров Л.В. Оценки параметров критичности реакторов методом Монте-Карло. М.: Энергоатомиздат, 1984, 120 с.
10. Ершов Ю.И., Шихов С.Б. Математические основы переноса нейтронов. Т.1. Основы теории. М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Романюха А.А. Математические модели в иммунологии и эпидемиологии инфекционных заболеваний. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011, 293 с.