



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

# АГЕНТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭПИДЕМИИ COVID-19 В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»*

*ФГБНУ «ФИЦ ИПФ» РАН, Нижний Новгород*

*ФГУ «ФИЦ ИПМ им. М.В. Келдыша» РАН, Москва*

*ФГУН «ИВМ им. Г.И. Марчука» РАН, Москва*

*ФГБУ «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи» Минздрава России, Москва*

*ФГБУ «НМИЦ ФПИ» Минздрава России, Москва*

2021

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

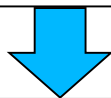


РФЯЦ-ВНИИФ  
РОСАТОМ

- 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:

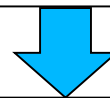
- Сечения взаимодействия нейтронов с веществом определяются в независимых экспериментах и хорошо известны
- Геометрия и состояние системы хорошо известны и слабо изменяются при штатной работе
- Эффективность мер регулирования режима работы строго определена



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

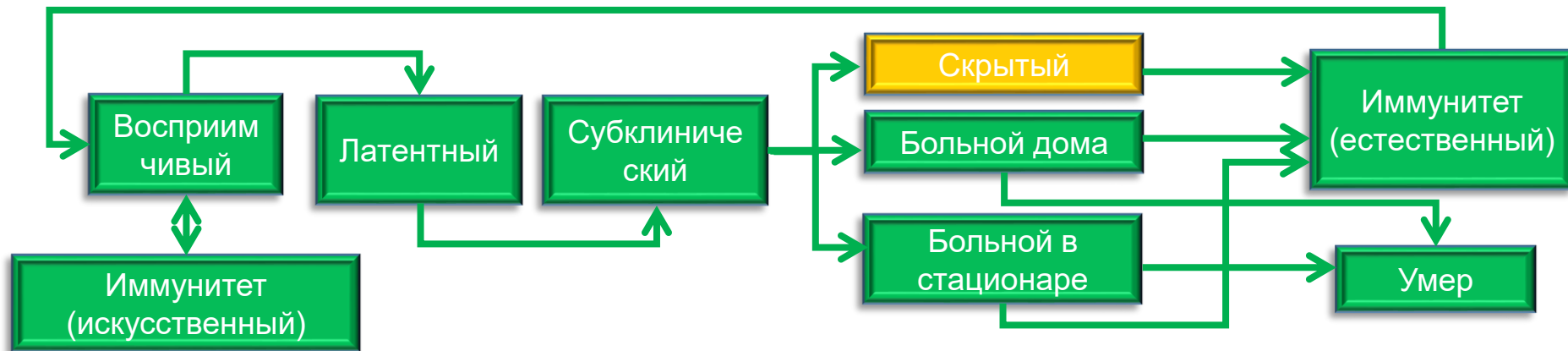
**Основная задача компьютерного моделирования развития эпидемии - прогноз эффективности регулирующих мер для обоснованного принятия решений с целью минимизации неблагоприятных последствий для населения.**

# Агентная модель

## Аналогии с уравнением переноса нейтронов

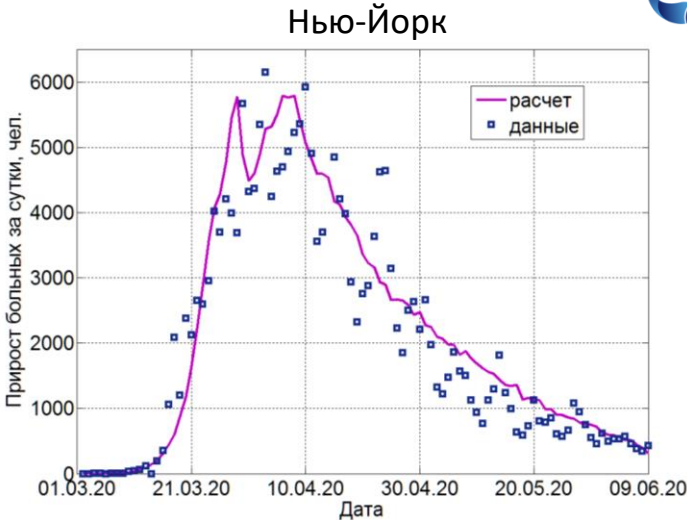
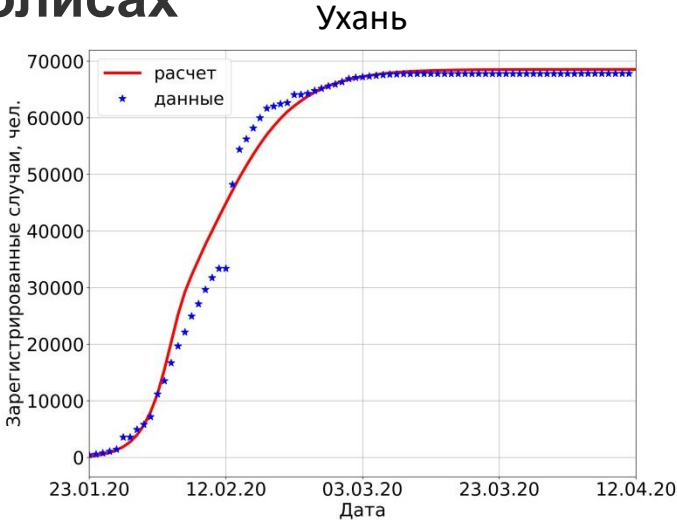
Агентная модель вирусной инфекции	Перенос нейтронов и ядерные реакции
<p>➤ <b>Виртуальная популяция</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• профессиональные группы (дошкольники, учащиеся, студенты, работники офисов и предприятий, работники сферы жизнеобеспечения, пенсионеры)</li><li>• возрастные группы и пол</li><li>• наличие хронических заболеваний</li><li>• место и условие проживания</li></ul>	<p>Многогрупповое приближение</p>
<p>➤ <b>Виртуальная городская среда - зоны контакта</b></p> <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> <p>➤ <b>Модель перемещения населения (транспортные потоки)</b></p>	<p>Гетерогенная среда</p>
<p>➤ <b>Медицинская модель заболевания</b></p> <p>➤ <b>Модель поведения</b></p>	<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

# Моделирование начального этапа эпидемии в мегаполисах



РАЙОН	% положительных тестов на антитела (с 20 по 30.04.20)	Инфицированных на 100 тыс.	Зарегистрировано случаев на 100 тыс.	Доля скрытых, %
BRONX	27.6	27 600	2 624	90.5
STATEN ISLAND	19.2	19 200	2 407	87.5
QUEENS	18.4	18 400	2 093	88.6
BROOKLYN	19.2	19 200	1 654	91.4
MANHATTAN	17.3	17 300	1 111	93.6
<b>TOTAL</b> (выборка 15 тыс. чел.)	<b>20</b>	<b>20 000</b>	<b>1 943</b>	<b>90.3</b>

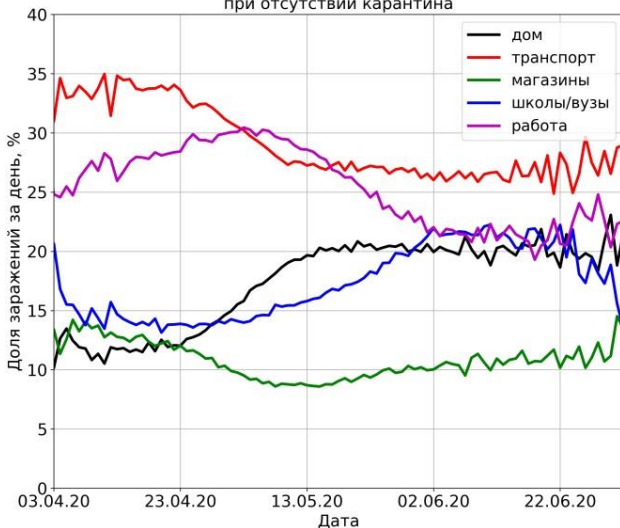
Максимальное значение прироста заболеваемости в значительной степени зависит от доли скрытых больных. В параметрах модели заболевания для доли скрытых больных принято значение 80%.

# Оценка влияния каналов распространения инфекции и эффекта от регулирующих мер

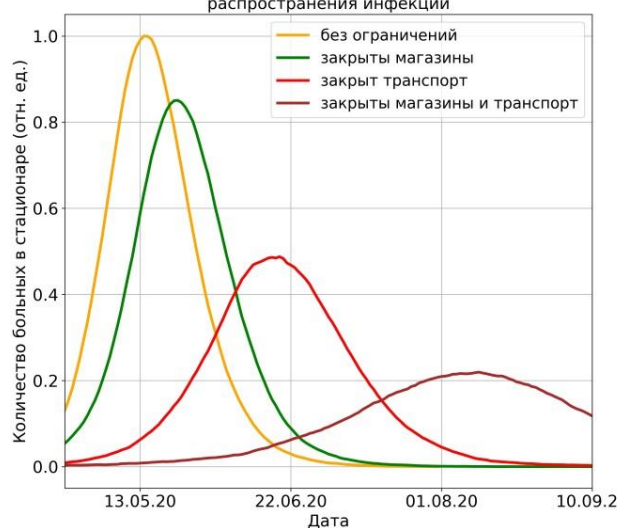


РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ

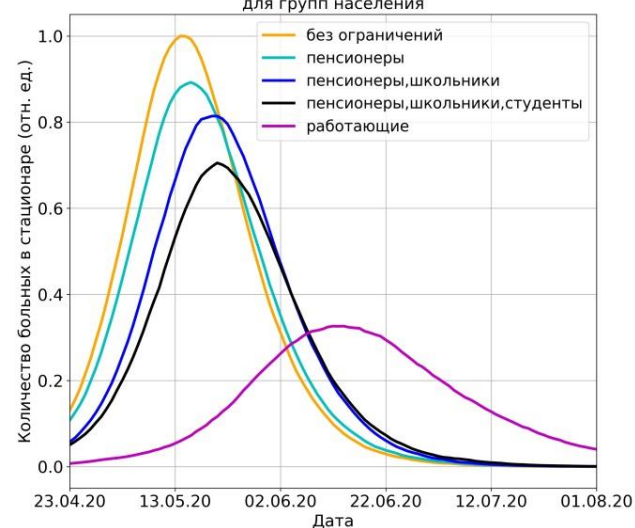
Распределение заражений при отсутствии карантина



Оценка влияния каналов распространения инфекции



Оценка влияния ограничений для групп населения



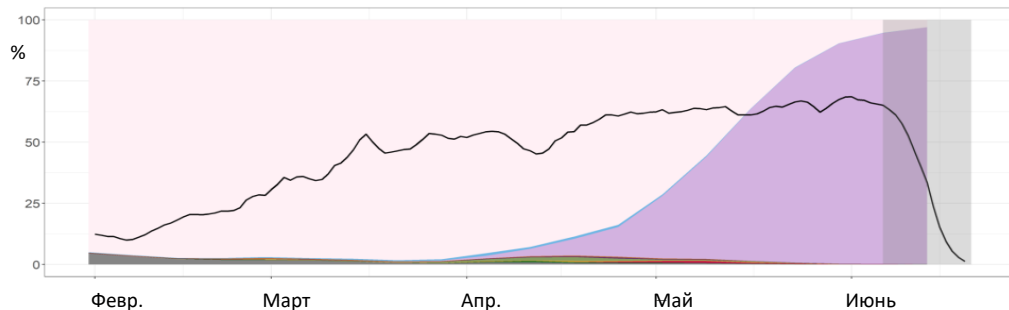
Ограничения	Магазины	Транспорт	Пенсионеры	Пенсионеры, школьники	Пенсионеры, школьники, студенты	Работающие (кроме сферы жизнеобеспечения)
Коэффициент уменьшения макс. нагрузки на мед. систему	1.2	2.0	1.1	1.2	1.4	3.0

**Степень доверия к результатам зависит от точности описания развития эпидемии!!!**

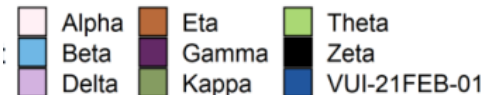
# Моделирование замещения исходного штамма штаммом Delta в Москве



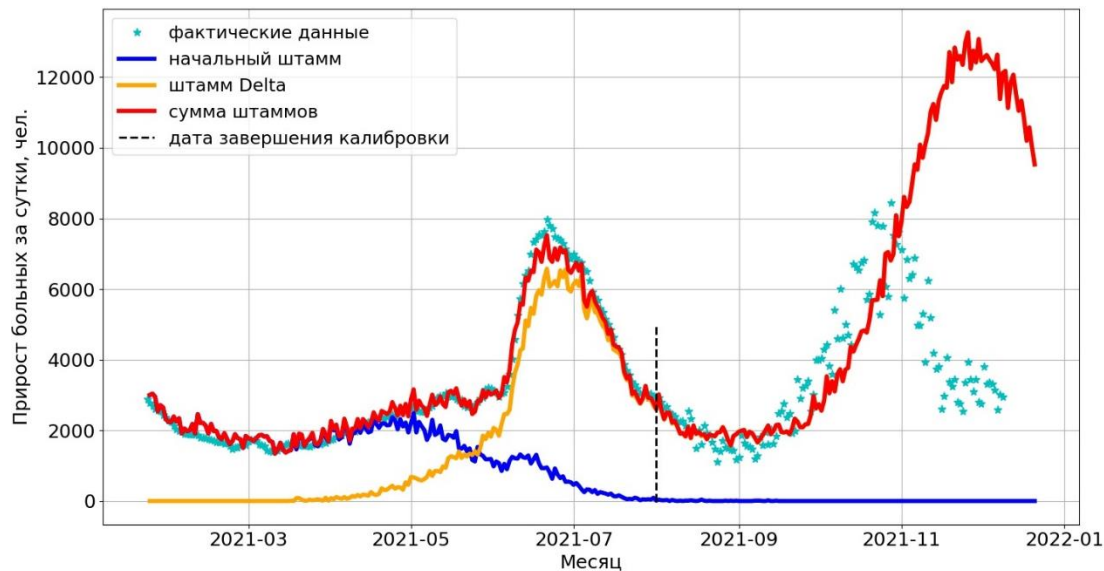
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



Замещение в Великобритании штамма Alpha на Delta по результатам секвенирования (технический брифинг №17 агентства Public Health при Министерстве здравоохранения Великобритании 25.06.2021)



Результаты расчетов по многоштаммовой модели. Контагиозность штамма Delta в соответствии с информацией «НИЦЭМ им. Н.Ф. Гамалеи», «НМИЦ ФПИ»



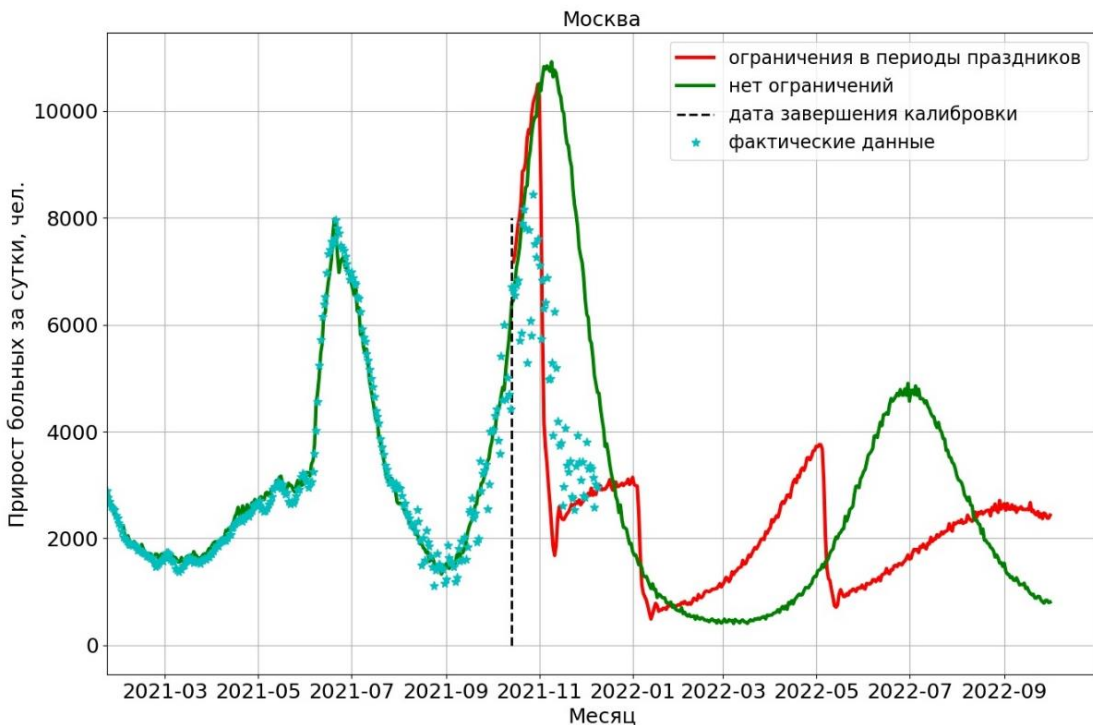
## Период замены начального штамма на $\delta$ штамм (дней)

Великобритания (факт)	~ 70
Москва (расчет)	~ 70

# Москва. Прогноз эффекта от ограничений и вакцинации



РФЯЦ-ВНИИЭФ  
РОСАТОМ



## Периоды ограничения активности населения

28.10.21 – 07.11.21

31.12.21 – 09.01.22

30.04.22 – 08.05.22



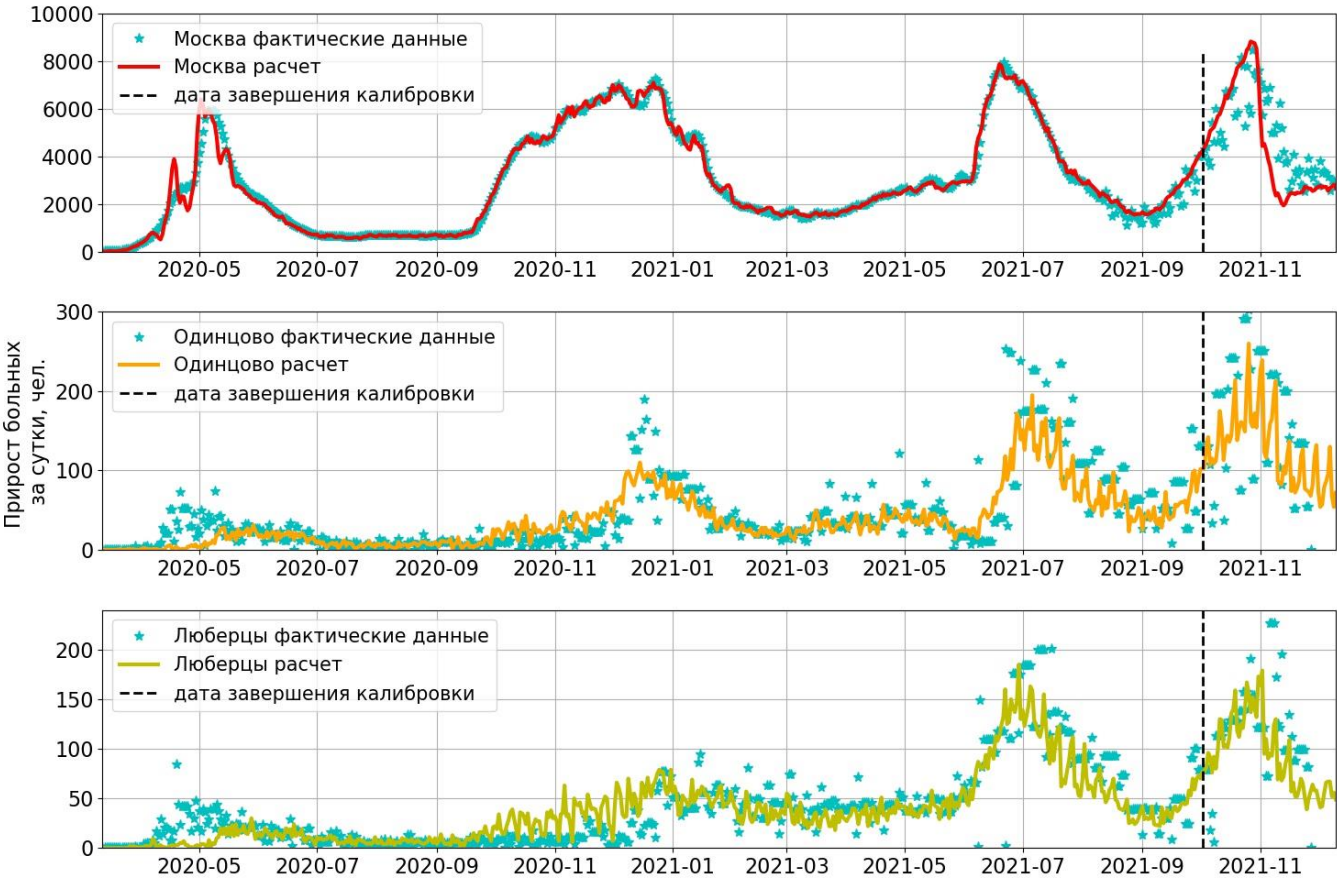
**Для подавления эпидемии необходим  
темп вакцинации 50 000 ч./д.**



# Моделирование ситуации в Московской области (маятниковая миграция)

Население Москвы	12.7 млн.
Агломерация	16.4 млн.
Ежедневная трудовая миграция	1.3 млн.*

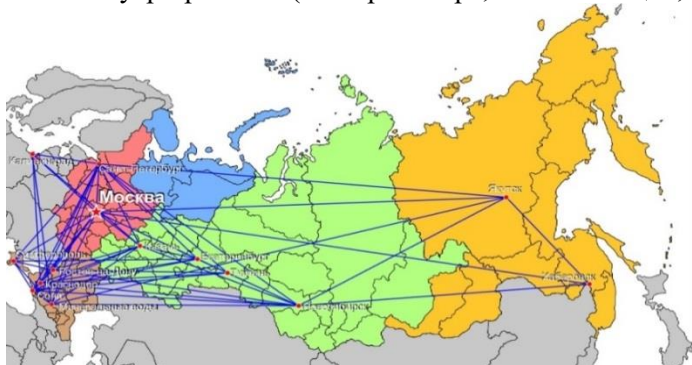
(\*) Исследование ВШЭ



Город / Округ	Население	Ежедневная маятниковая миграция
Балашиха	507307	179000
Подольск	308130	108800
Химки	259550	91600
Мытищи	235504	83200
Королев	225858	78000
Люберцы	205295	72500
Красногорск	175554	62000
Богородский	165000	58300
Электросталь	156026	55000
Коломна	140129	49500
Домодедово	137160	48500
Одинцово	135506	48000
Серпухов	126273	44600
...	...	...
Пушкино	107580	37900
Жуковский	107560	38000
Сергиев Посад	100335	35000
Сумма	3683185	1298200

# Развитие эпидемии в РФ

- ✓ Учтены крупные транспортные узлы (ж.д., авиа)
- ✓ Маятниковая миграция (агломерации)
- ✓ Связи внутри региона (автотранспорт, малая авиация, ж.д.)

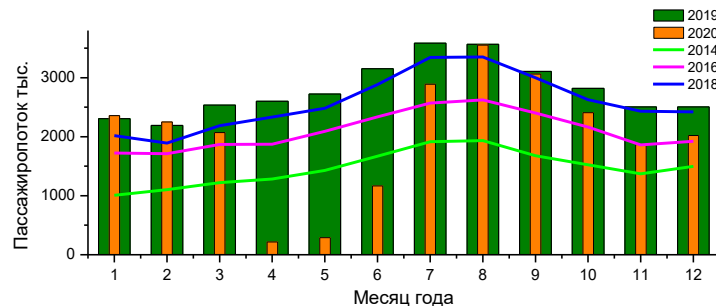
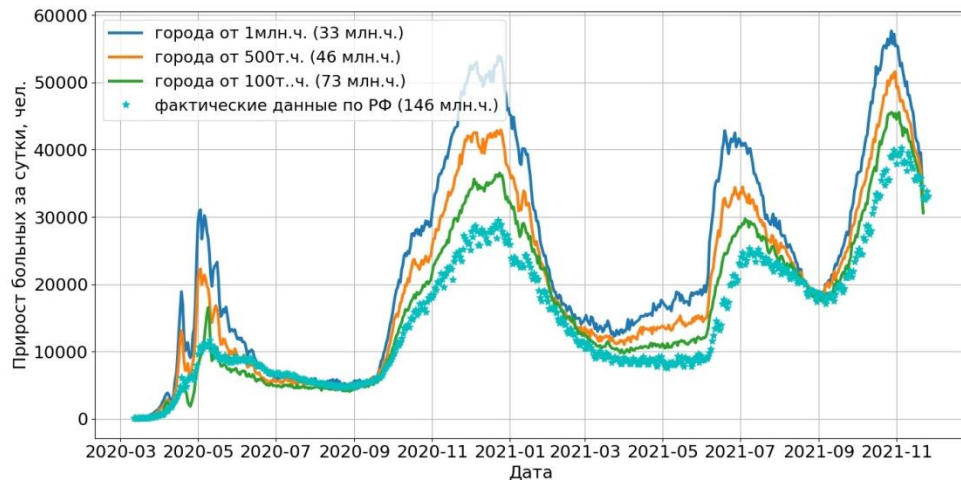


23 крупных авиаузла (минимум 19 рейсов в день)

		Авиа, млн. чел.	Ж/д, млн. чел.
Москва	Санкт-Петербург	4,3	5,8
Москва	Екатеринбург	1,6	2,2
Москва	Новосибирск	1,4	1,8
Москва	Владивосток	0,3	0,4
Москва	Якутск	0,2	-



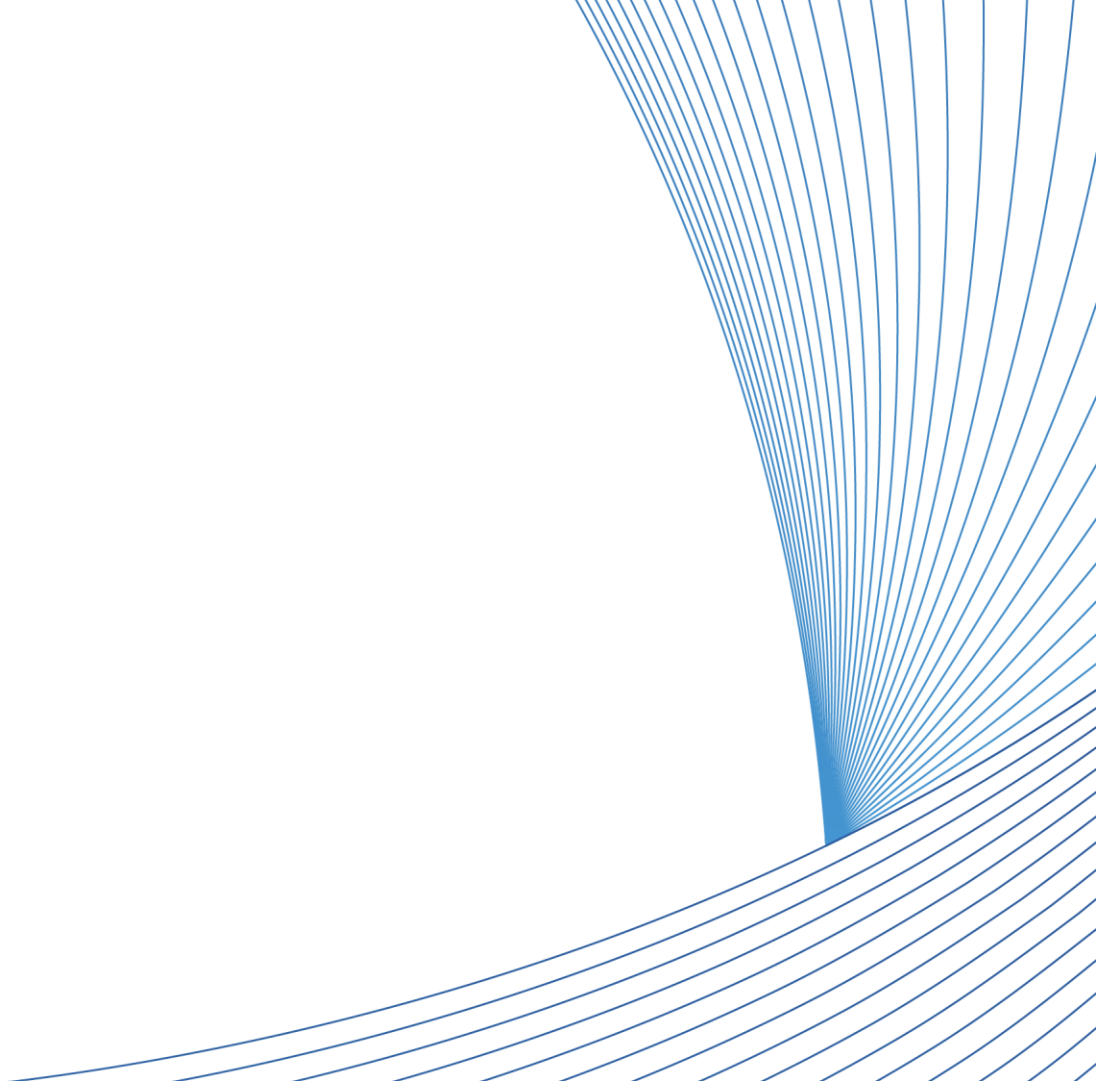
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



**Расчетные результаты приближаются к фактическим данным по мере уточнения описания структуры страны**

1. В рамках проекта Минобрнауки разрабатываются модель и комплекс программ для прогнозирования различных сценариев развития эпидемий вирусных инфекций.
2. Более корректное описание развития эпидемий в РФ требует учета:
  - влияния ограничительных мер на комплексное состояние здоровья населения
  - прогнозирования реалистичной изменчивости настроений общества в ходе эпидемии на основе методов искусственного интеллекта
  - более точного описания общества за счет развития баз данных в области вирусологии, социологии, медицины, авиационного, железнодорожного и автотранспортного сообщения и применения к ним методов Big Data
3. Указом Президента РФ от 12.10.20 образована Межведомственная комиссия Совета Безопасности РФ по вопросам создания национальной системы защиты от новых инфекций. Прогнозирование темпов развития эпидемий и эффективности принимаемых мер противодействия должны являться составной частью национальной системы. Разрабатываемые модель и расчетный комплекс могут стать прообразом системы прогнозирования развития эпидемий в РФ.

**Спасибо  
за внимание**



# Агентная модель

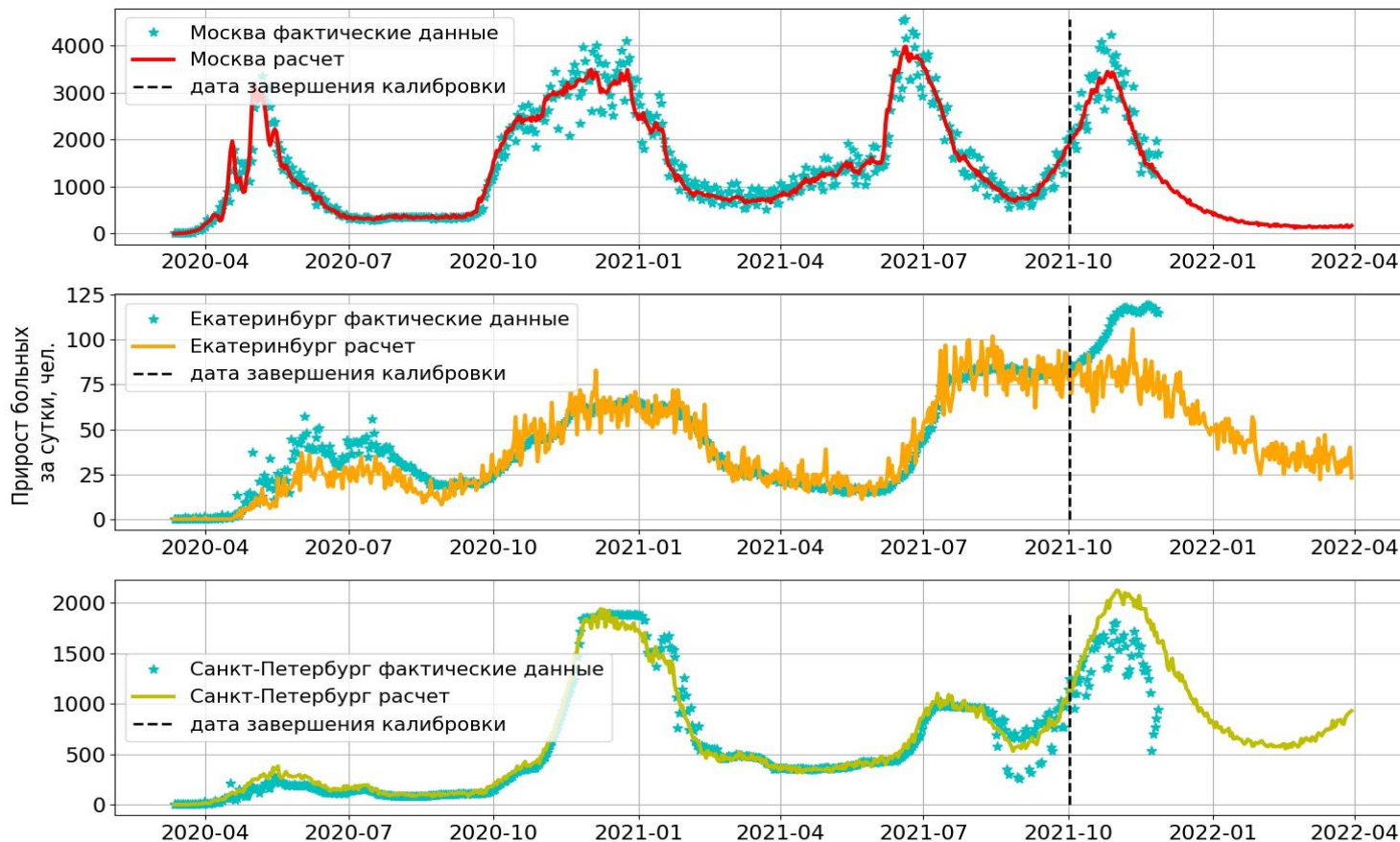
## Аналогии с уравнением переноса нейтронов

Агентная модель вирусной инфекции	Перенос нейтронов	SEIR
<p>➤ Виртуальная популяция</p> <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>	Многогрупповое приближение	<b>Решение уравнений кинетик и</b>
<p>➤ Виртуальная городская среда - зоны контакта</p> <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> <p>➤ Модель перемещения</p>	Гетерогенная среда	-
<p>➤ Медицинская модель заболевания</p> <p>➤ Модель поведения</p>	Кинетика ядерных реакций	+ -

# Расчет модели РФ



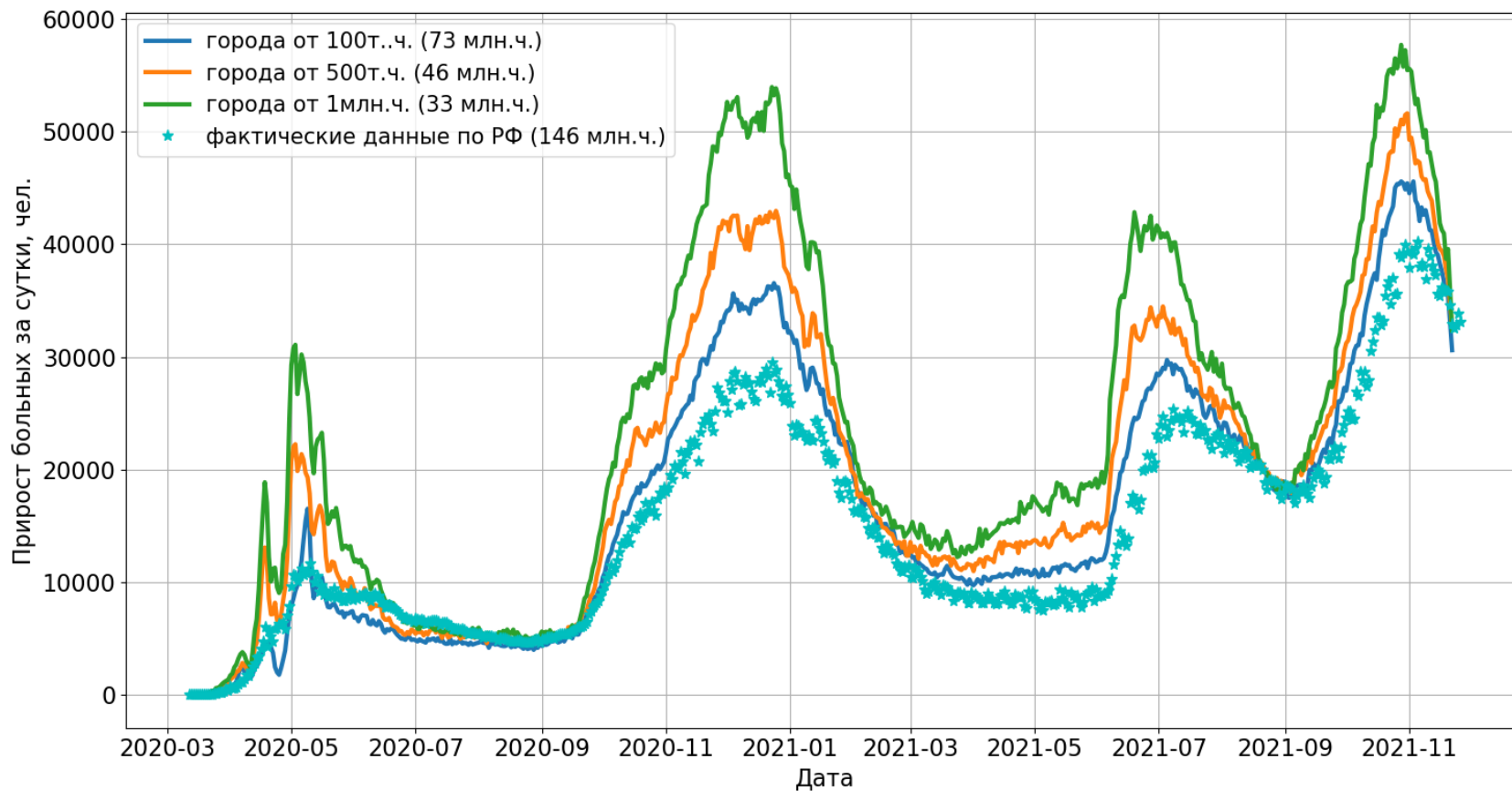
РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ



# Расчет модели РФ



РФЯЦ-ВНИИТФ  
РОСАТОМ





# Модель транспортных потоков

1. Крупные транспортные узлы (ж.д., авиа)
2. Маятниковая миграция (агломерации)
3. Связи внутри региона (автотранспорт, малая авиация, ж.д.)



23 крупных авиаузла (более 19 рейсов в день)

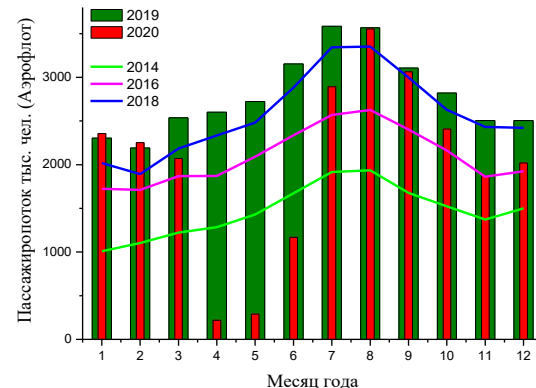
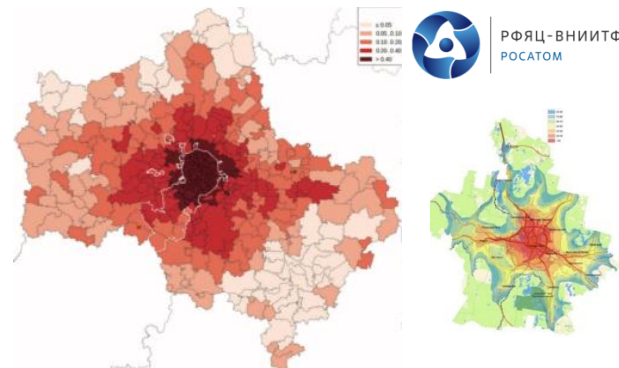
		Авиа, млн. чел.	Ж/д, млн. чел.
Москва	Санкт-Петербург	4,3	5,8
Москва	Екатеринбург	1,6	2,2
Москва	Челябинск	0,9	1,2
Москва	Новосибирск	1,4	1,8

Для России (кроме связи Санкт-Петербург и Москва) потоки ж/д и авиа в среднем составляют соотношение 4:3 (\*)

(\*) Статистика министерства транспорта

Город	Москва	Екатеринбург
Население	12.7 млн.	1.5 млн.
Агломерация	18.2 млн.	2.1 млн.
Ежедневная трудовая миграция	1.3 млн.**	120 тыс.***

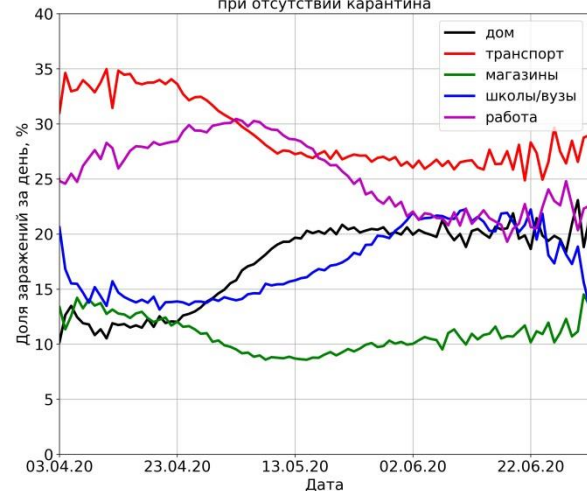
(\*\*) Исследование ВШЭ  
 (\*\*\*) Исследование ОАО  
 "РИГИР "Гипрогор" –  
<https://minstroy.midural.ru>  
 (01.12.2021)



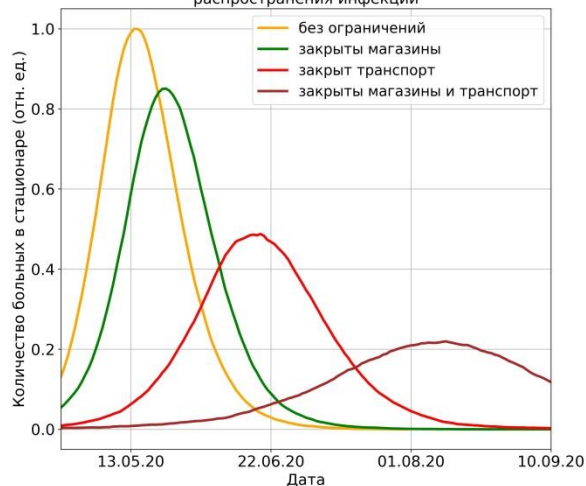


# Оценка влияния каналов распространения инфекции и эффекта от регулирующих мер

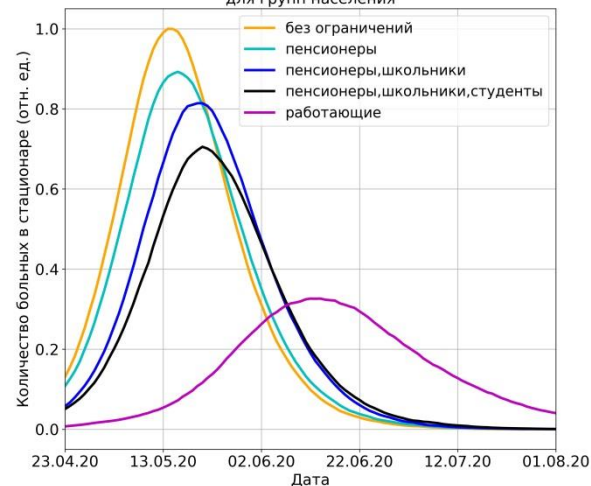
Распределение заражений при отсутствии карантина



Оценка влияния каналов распространения инфекции



Оценка влияния ограничений для групп населения



Ограничения	Магазины	Транспорт	Магазины, транспорт	Пенсионеры	Пенсионеры, школьники	Пенсионеры, школьники, студенты	Работающие
Снижение макс. нагрузки на мед. систему, %	15	50	77	10	18	30	67

**Степень доверия к результатам зависит от качества описания развития эпидемии!!!**