

Структурно-сетевые методы моделирования стратегий борьбы с распространением эпидемии

Мухамадиев В.И.

Введение

Такие меры как самоизоляция, карантин, отслеживание первичных контактов, тестирование способствуют борьбе с эпидемиями. Однако не понятно насколько эффективна та или иная мера. Ответить на этот вопрос возможно при помощи моделирования распространения эпидемии с учетом данных стратегий. Для этого необходима реальная социальная сеть в которой известно расстояние между вершинами и данная сеть не должна быть статичной, она должна изменяться во времени. В данном исследовании была рассмотрена база данных социальных контактов Хейзлмира [1]. Хейзлмир - небольшой город на юге Англии с населением 11235 человек по данным переписи населения Великобритании 2011 года [2]. Данный город был выбран для сбора данных по социальным контактам по причине его размера и расположения. Хейзлмир является транзитным городом между Лондоном и Портсмутом. Данное местоположение делает его вероятным местом возникновения вспышки. Размер города гарантирует, что в нем есть типичные объекты инфраструктуры: железнодорожная станция, магазины, школы.

Карта Великобритании с местоположением Хейзлмира

```
In[1]:= GeoListPlot[{United Kingdom COUNTRY, London CITY, Haslemere CITY}, GeoLabels->Automatic, ImageSize->Large]
```



Участники исследования загружали приложение на свои смартфоны и с помощью него отправляли свои GPS-координаты. Данные записывались в течение трех дней подряд. Далее были отброшены все местоположения за пределами города. Полученные данные были сгруппированы по пятиминутным интервалам, а расстояния округлены с точностью до метра. Данные представлены в виде двух файлов. В первом файле каждая строка представляет собой встречу (в пределах 50 м) между двумя пользователями. Первый столбец - шаг по времени в виде целого числа. В столбцах 2 и 3 указаны идентификационные номера пользователей. В столбце 4 указано расстояние между пользователями на данном временном шаге, округленное до ближайшего метра. Во втором файле стоит соответствие шага по времени из первого столбца между индексами времени в реальное

время по британскому стандартному времени (BST). Всего у нас 576 временных отсечек и 469 пользователей (вершин).

Обработка данных

Загружаем данные из репозитория.

```
In[2]:= KDS1=Import["https://raw.githubusercontent.com/skissler/haslemere/master/Kissler_DataS1.csv"];
(*KDS1=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"Kissler_DataS1.csv"}],"CSV"];*)
KDS2=Import["https://raw.githubusercontent.com/skissler/haslemere/master/Kissler_DataS2.csv"];
(*KDS2=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"Kissler_DataS2.csv"}],"CSV"];*)
```

Приводим KisslerDataS1 к виду

$\{\{1,\dots,\dots\},\{1,\dots,\dots\},\dots,\{2,\dots,\dots\},\{2,\dots,\dots\},\dots,\dots,\{576,\dots,\dots\},\{576,\dots,\dots\},\dots\}$ получая таким образом последовательность из списков где каждый список представляет собой состояние сети в определенный момент времени.

```
In[4]:= datasep=Table[Cases[KDS1,{i_,_,_,_}],{i,1,Length[KDS2]}];
```

Предполагая, что вероятность заражения падает экспоненциально с расстоянием [3], мы в дальнейшем введем коэффициент равный обратной экспоненте от расстояния. Из этого предположения мы получаем что при расстоянии 5 метров, вероятность заражения будет менее 1%. По этой причине в дальнейшем для снижения временных затрат при моделировании есть смысл рассмотреть сеть, в которой убраны все контакты с расстоянием более 5 метров. Отфильтруем наши данные убрав ребра, в которых расстояние превышает 5 метров. Здесь и далее переменные оканчивающиеся на "5m" означают, что они относятся к сети в который остались только ребра с расстоянием не более 5 метров.

```
In[5]:= datasep5m=Table[Cases[datasep[[i]],{_,_,_,_x_Integer}/;x≤5],{i,1,Length[datasep]}];
```

Теперь нам необходимо создать для каждого временного состояния список ребер.

```
In[6]:= edgelist=Table[Table[datasep[[j,i,2]]→datasep[[j,i,3]],{i,1,Length[datasep[[j]]]}],
{j,1,Length[datasep]}];
edgelist5m=Table[Table[datasep5m[[j,i,2]]→datasep5m[[j,i,3]],{i,1,Length[datasep5m[[j]]]}],
{j,1,Length[datasep5m]}];
```

Так как в нашей сети у ребер есть расстояния, то нам необходимо так же создать списки с расстояниями.

```
In[8]:= edgelength=Table[Table[N[datasep[[j,i,4]]],{i,1,Length[datasep[[j]]]}],
{j,1,Length[datasep]}];
edgelength5m=Table[Table[N[datasep5m[[j,i,4]]],{i,1,Length[datasep5m[[j]]]}],
{j,1,Length[datasep5m]}];
```

Предположим, что вероятность заразиться от человека с которым был прямой контакт в течение 1 часа $\geq 95\%$. В 1 часе содержится 12 пятиминутных интервалов. Посчитаем данную вероятность.

```
In[10]:= p=Solve[1-(1-v)^12==0.95&&0<v<1,v][[1,1,2]]
```

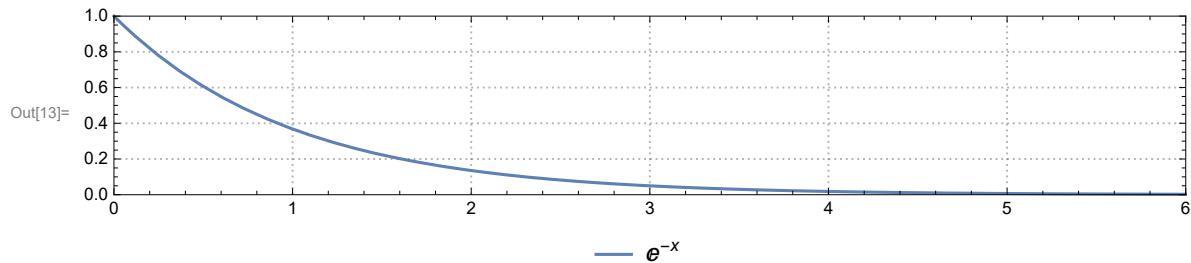
```
Out[10]= 0.220922
```

Введем коэффициент (вес ребра) равный обратной экспоненте от расстояния помноженный на p , по которому будет считаться вероятность заражения.

```
In[11]:= w=p e^-edgelength;
w5m=p e^-edgelength5m;
```

График обратной экспоненты

```
In[13]:= Plot[e^-x,{x,0,6},PlotRange→{{0,6},{0,1}},AspectRatio→1/6,PlotTheme→"Detailed",ImageSize→Large]
```



Таким образом для каждой временной отсечки у нас есть список ребер и их веса. Теперь мы можем создать состояние графа для каждой временной отсечки. Убедимся что в нашей сети 469 вершин.

```
In[14]:= vertexcount=Length[DeleteDuplicates[Flatten[KDS1[[All,2;;3]]]]]
```

```
Out[14]= 469
```

Создадим сетку с вершинами для дальнейшей визуализации.

```
In[15]:= grid=Partition[Flatten[Table[{i,j},{i,1,Ceiling[Sqrt[vertexcount]]},{j,1,Ceiling[Sqrt[vertexcount]]}],2][1;;vertexcount]];
```

Создаем сеть изменяемую во времени.

```
In[16]:= network=Table[EdgeAdd[AdjacencyGraph[Table[0,{i,1,vertexcount},{j,1,vertexcount}]],edgelist[[i]],
VertexCoordinates→Table[i→grid[[i]],[i,1,vertexcount]],
EdgeStyle→Table[edgelist[[i,j]]→Thickness[0.01 w[[i,j]]/p],{j,1,Length[edgelist[[i]]]}],
ImageSize→Large],[i,1,Length[edgelist]]];
network5m=Table[EdgeAdd[AdjacencyGraph[Table[0,{i,1,vertexcount},{j,1,vertexcount}]],edgelist5m[[i]],
VertexCoordinates→Table[i→grid[[i]],[i,1,vertexcount]],
EdgeStyle→Table[edgelist5m[[i,j]]→Thickness[0.01 w5m[[i,j]]/p],{j,1,Length[edgelist5m[[i]]]}],
ImageSize→Large],[i,1,Length[edgelist5m]]];
```

Исследование сети

Визуализируем полученную сеть расположив вершины в виде квадратной решетки. Чем больше толщина ребра, тем меньше расстояние между вершинами.

```
In[18]:= nv=Table[Grid[{{KDS2[[i,2]]},{network[[i]]}}],{i,1,Length[KDS2]}];
nv5m=Table[Grid[{{KDS2[[i,2]]},{network5m[[i]]}}],{i,1,Length[KDS2]}];
```

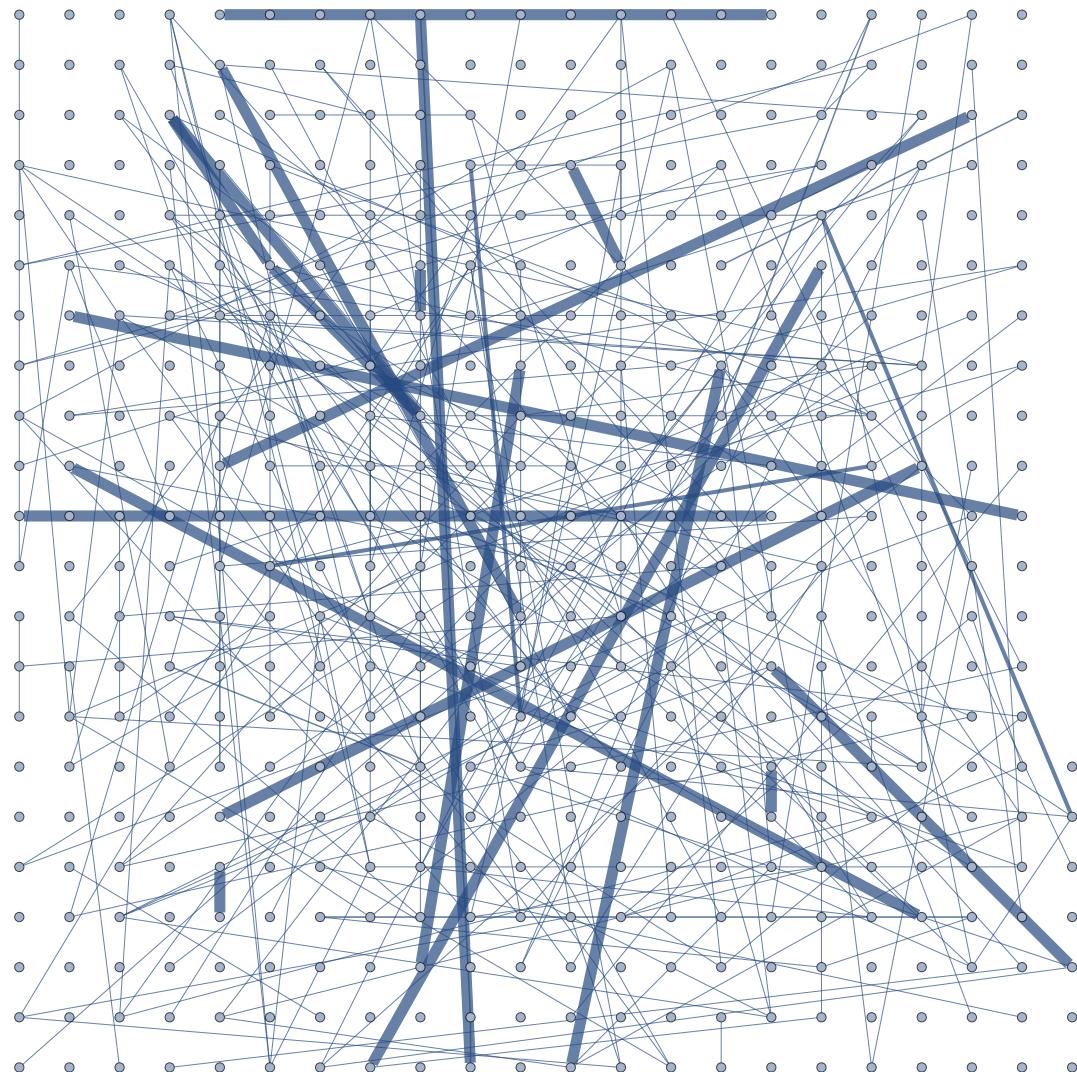
Пример визуализации для графа со всеми расстояниями

In[20]:=

nv[[1]]

Thu 12 Oct 2017 07:00:00

Out[20]=

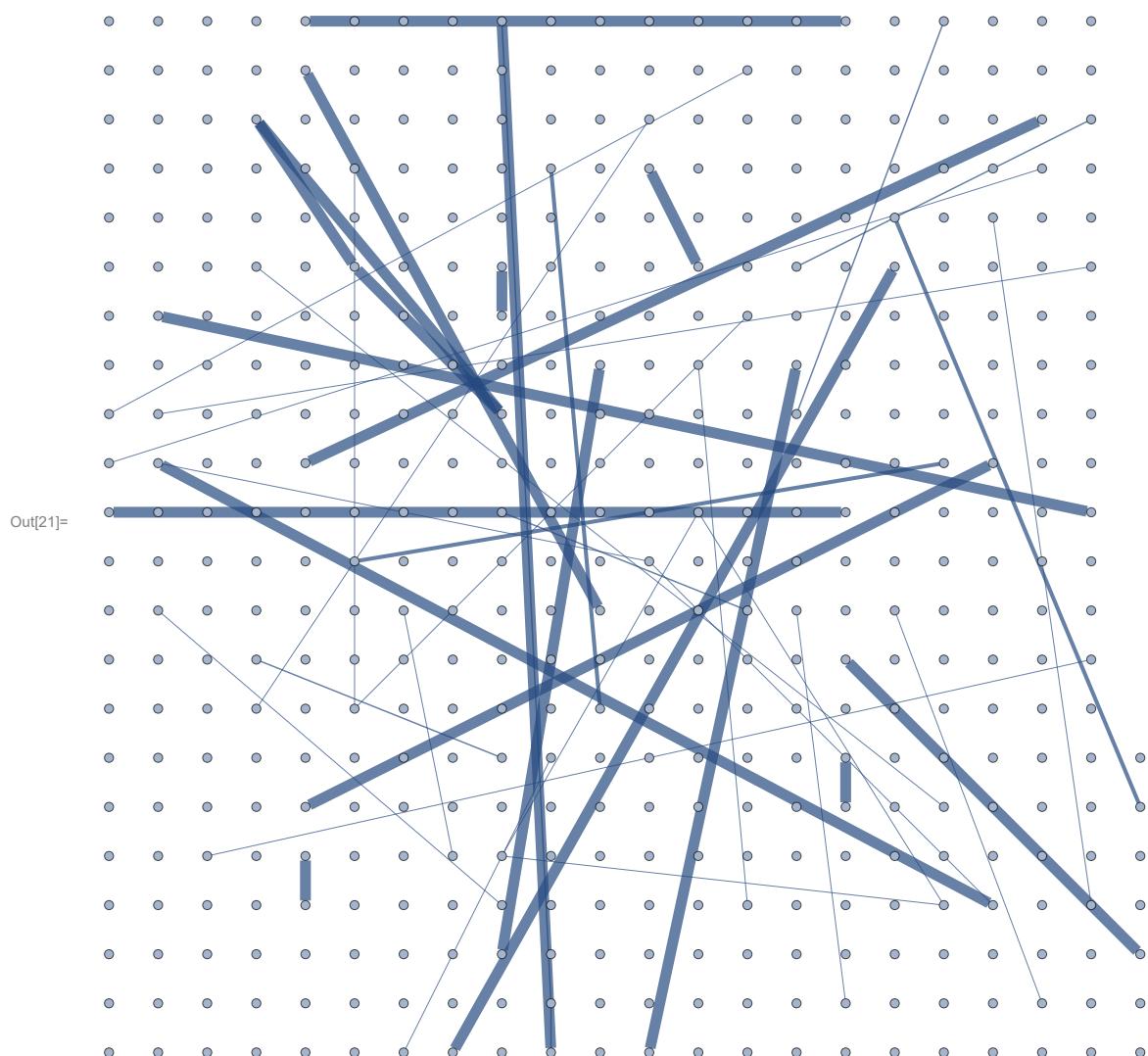


Визуализация этой же временной отсечки, но отброшены ребра с расстоянием более 5 метров

In[21]:=

nv5m[[1]]

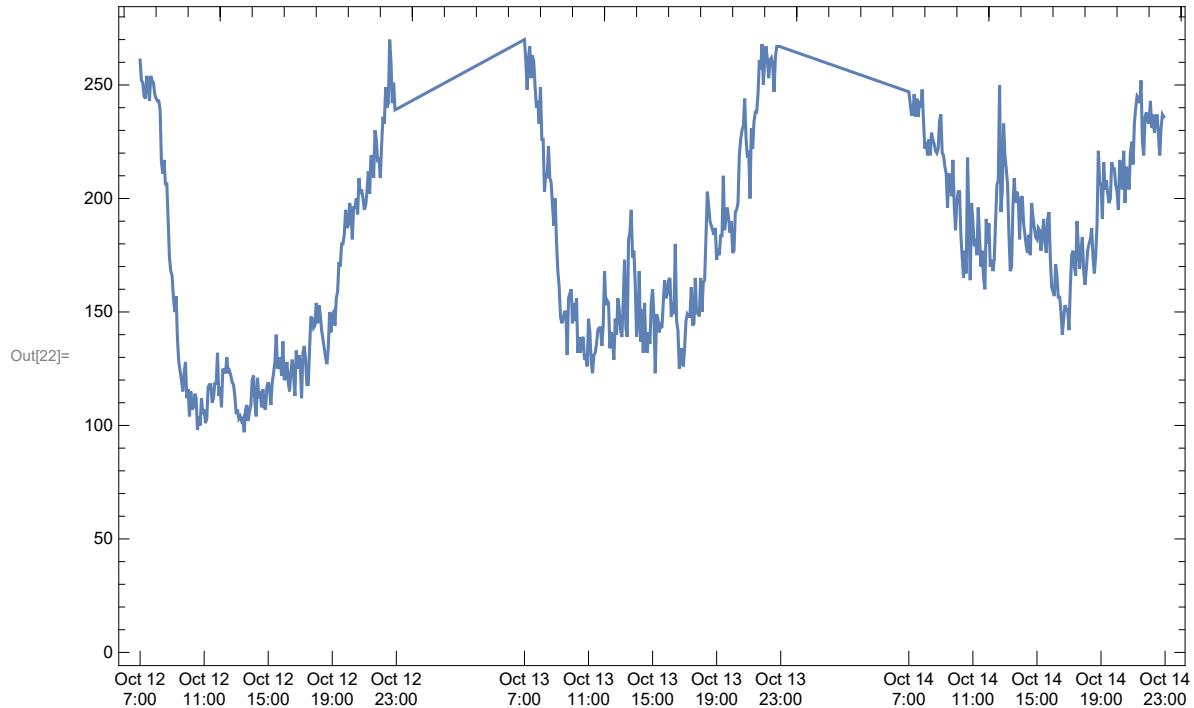
Thu 12 Oct 2017 07:00:00



Рассмотрим изменение различных характеристик сети во времени.

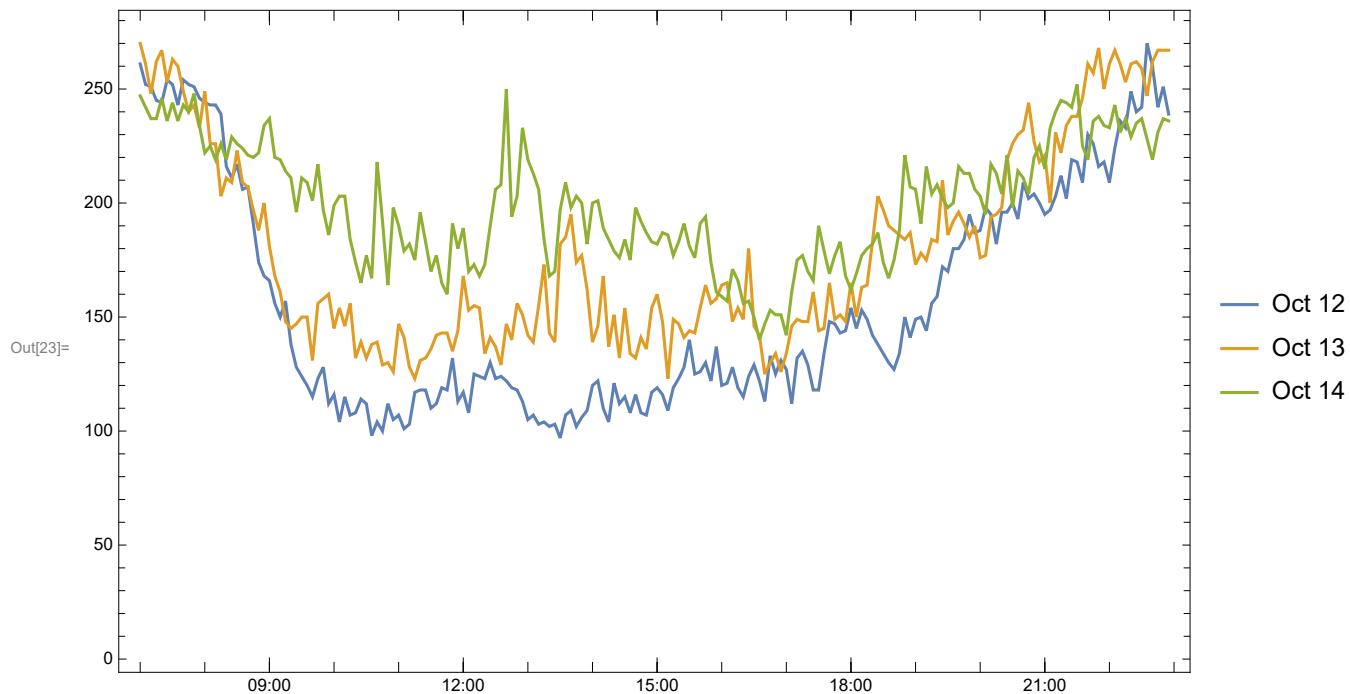
Динамика изменения числа ребер сети во времени

```
In[22]:= DateListPlot[TimeSeries[Table[EdgeCount[network[[i]]], {i, 1, Length[network]}]], {KDS2[[All, 2]]}], FrameTicks -> {{Automatic, Automatic}, {{"Thu 12 Oct 2017 07:00:00", "Thu 12 Oct 2017 11:00:00", "Thu 12 Oct 2017 15:00:00", "Thu 12 Oct 2017 19:00:00", "Thu 12 Oct 2017 23:00:00"}, {"Fri 13 Oct 2017 07:00:00", "Fri 13 Oct 2017 11:00:00", "Fri 13 Oct 2017 15:00:00", "Fri 13 Oct 2017 19:00:00", "Fri 13 Oct 2017 23:00:00"}, {"Sat 14 Oct 2017 07:00:00", "Sat 14 Oct 2017 11:00:00", "Sat 14 Oct 2017 15:00:00", "Sat 14 Oct 2017 19:00:00", "Sat 14 Oct 2017 23:00:00"}}, DateTicksFormat -> {"MonthNameShort", " ", "Day", "\n", "Hour24Short", ":00"}, ImageSize -> Large]
```



Наложение по дням

```
In[23]:= DateListPlot[{TimeSeries[Table[EdgeCount[network[[i]]], {i, 1, 192}], {Flatten[Table[StringCases[KDS2[[i, 2]], RegularExpression["....."]], {i, 1, 192}]]}], TimeSeries[Table[EdgeCount[network[[i]]], {i, 193, 384}], {Flatten[Table[StringCases[KDS2[[i, 2]], RegularExpression["....."]], {i, 1, 192}]]}], TimeSeries[Table[EdgeCount[network[[i]]], {i, 385, 576}], {Flatten[Table[StringCases[KDS2[[i, 2]], RegularExpression["....."]], {i, 1, 192}]]}]}, PlotLegends -> {"Oct 12", "Oct 13", "Oct 14"}, ImageSize -> Large]
```



В течении каждого дня мы можем наблюдать тенденцию снижения числа связей (ребер) к середине дня и рост числа связей к его окончанию. Среднее количество ребер в сети:

```
In[24]:= N[Mean[Table[EdgeCount[network[[i]]], {i, 1, Length[network]}]]]
```

```
Out[24]= 178.526
```

Так как плотность и средняя степень вершины напрямую зависят от количества ребер то их графики будут иметь такой же вид. Так что приведем только их средние значения. Плотность:

```
In[25]:= N[Mean[Table[GraphDensity[network[[i]]], {i, 1, Length[network]}]]]
```

```
Out[25]= 0.00162672
```

Средняя степень вершины:

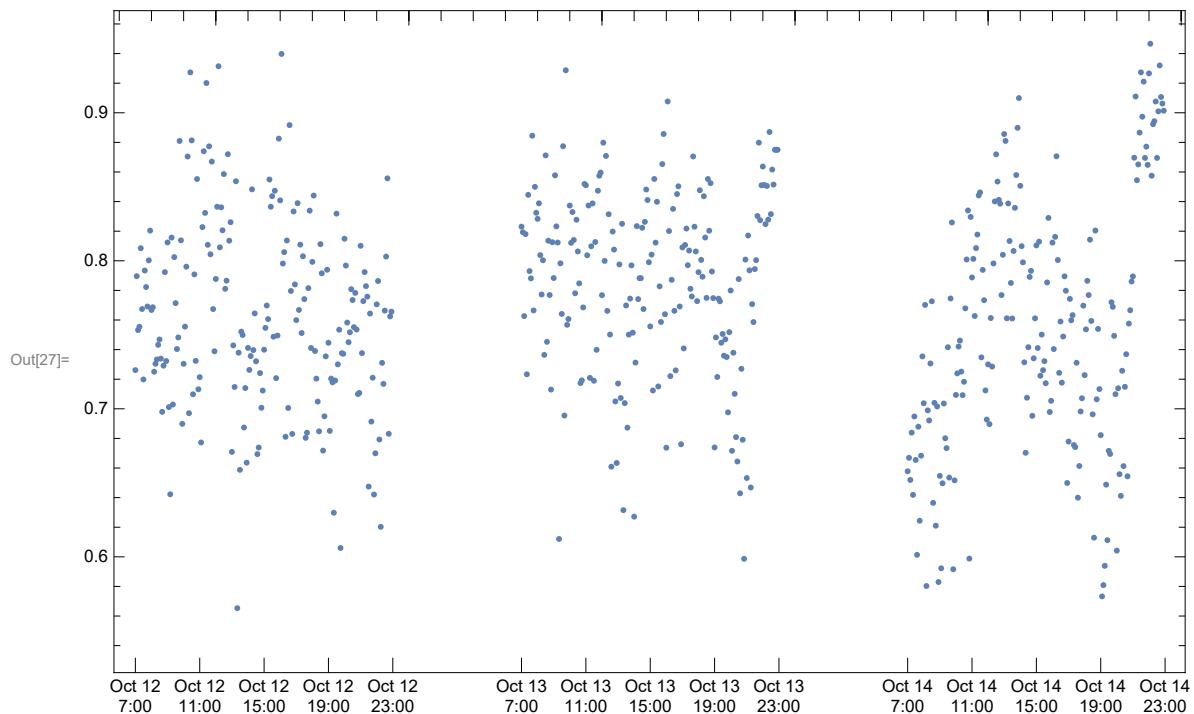
```
In[26]:= N[Mean[Table[Mean[VertexDegree[network[[i]]]], {i, 1, Length[network]}]]]
```

```
Out[26]= 0.761305
```

Ассортативность сети не зависит напрямую от числа ребер. Рассмотрим динамику её изменения во времени.

Динамика изменения ассортативности сети во времени

```
In[27]:= DateListPlot[TimeSeries[Table[GraphAssortativity[network[[i]]], {i, 1, Length[network]}]], {KDS2[[All, 2]]}, FrameTicks -> {{Automatic, Automatic}, {{"Thu 12 Oct 2017 07:00:00", "Thu 12 Oct 2017 11:00:00", "Thu 12 Oct 2017 15:00:00", "Thu 12 Oct 2017 19:00:00", "Thu 12 Oct 2017 23:00:00"}, {"Fri 13 Oct 2017 07:00:00", "Fri 13 Oct 2017 11:00:00", "Fri 13 Oct 2017 15:00:00", "Fri 13 Oct 2017 19:00:00", "Fri 13 Oct 2017 23:00:00"}, {"Sat 14 Oct 2017 07:00:00", "Sat 14 Oct 2017 11:00:00", "Sat 14 Oct 2017 15:00:00", "Sat 14 Oct 2017 19:00:00", "Sat 14 Oct 2017 23:00:00"}}, DateTicksFormat -> {"MonthNameShort", " ", "Day", "\n", "Hour24Short", ":00"}, Joined -> False, ImageSize -> Large]
```



Как мы видим зависимости ассортативности сети от времени суток не наблюдается, но при этом на протяжении всех трёх дней наблюдений ассортативность оставалась на высоком уровне что характерно для социальных сетей [4] так же как и низкая плотность [5]. Среднее значение ассортативности:

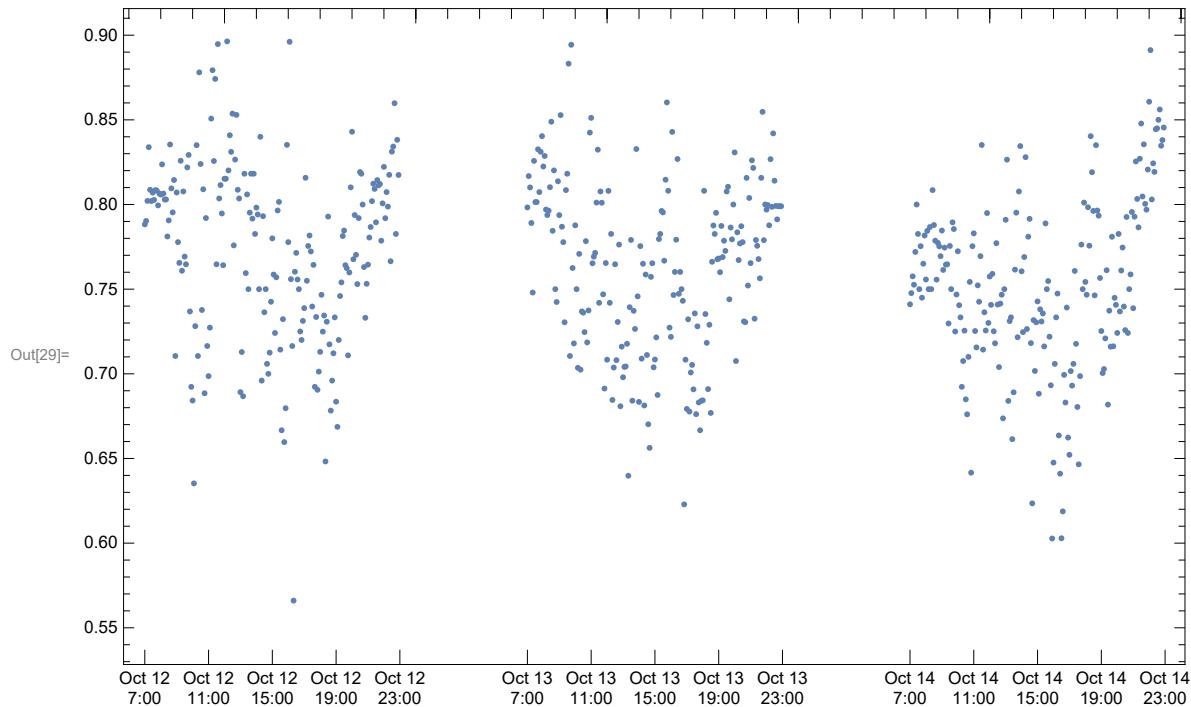
```
In[28]:= N[Mean[Table[GraphAssortativity[network[[i]]], {i, 1, Length[network]}]]]
```

Out[28]= 0.767812

Из характеристик сети так же интересно рассмотреть динамику изменения глобального коэффициента кластеризации.

Динамика изменения глобального коэффициента кластеризации сети во времени

```
In[29]:= DateListPlot[TimeSeries[Table[GlobalClusteringCoefficient[network[[i]]], {i, 1, Length[network]}]], {KDS2[[All, 2]]}, FrameTicks -> {{Automatic, Automatic}, {{"Thu 12 Oct 2017 07:00:00", "Thu 12 Oct 2017 11:00:00", "Thu 12 Oct 2017 15:00:00", "Thu 12 Oct 2017 19:00:00", "Thu 12 Oct 2017 23:00:00"}, {"Fri 13 Oct 2017 07:00:00", "Fri 13 Oct 2017 11:00:00", "Fri 13 Oct 2017 15:00:00", "Fri 13 Oct 2017 19:00:00", "Fri 13 Oct 2017 23:00:00"}, {"Sat 14 Oct 2017 07:00:00", "Sat 14 Oct 2017 11:00:00", "Sat 14 Oct 2017 15:00:00", "Sat 14 Oct 2017 19:00:00", "Sat 14 Oct 2017 23:00:00"}], DateTicksFormat -> {"MonthNameShort", " ", "Day", "\n", "Hour24Short", ":00"}, Joined -> False, ImageSize -> Large]
```



Как и в случае с асортативностью мы не наблюдаем зависимость от времени суток. Отметим высокое значение коэффициента на протяжении всего времени наблюдения. Среднее значение:

```
In[30]:= N[Mean[Table[GlobalClusteringCoefficient[network[[i]]], {i, 1, Length[network]}]]]
```

```
Out[30]= 0.763359
```

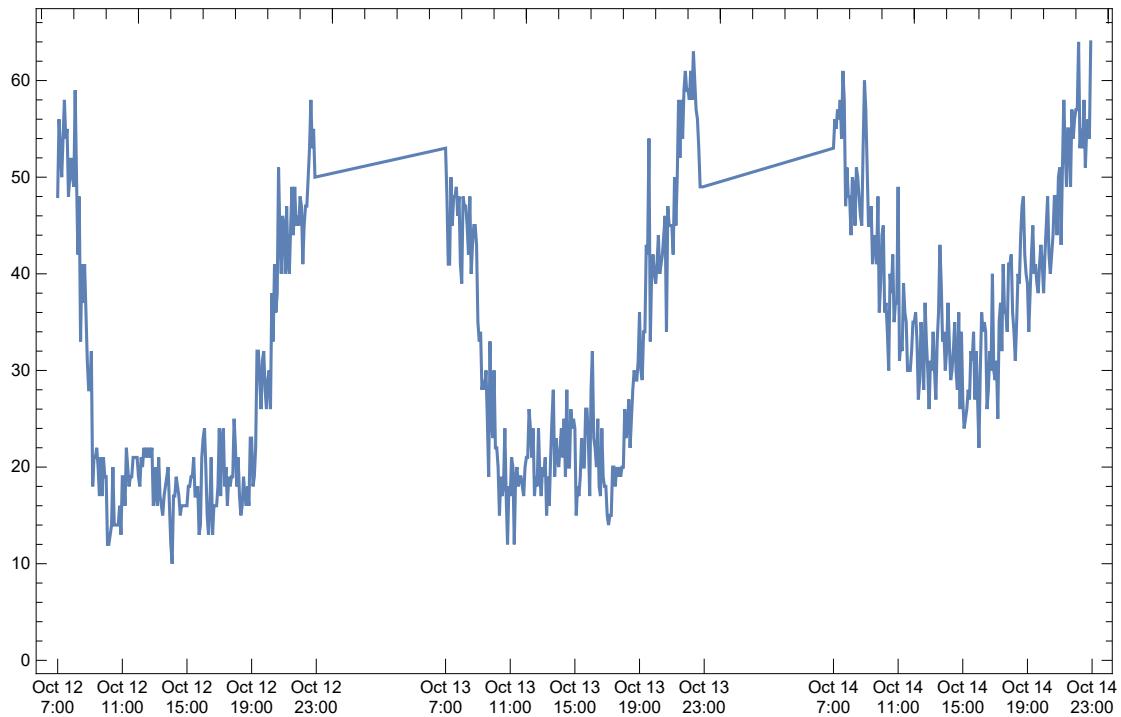
Рассмотрим теперь вышеперечисленные характеристики для сети где отброшены ребра с расстояниями более 5 метров.

Динамика изменения числа ребер сети во времени

In[31]:=

```
DateListPlot[TimeSeries[Table[EdgeCount[network5m[[i]]], {i, 1, Length[network5m]}]], {KDS2[[All, 2]]}], FrameTicks → {{Automatic, Automatic}, {{"Thu 12 Oct 2017 07:00:00", "Thu 12 Oct 2017 11:00:00", "Thu 12 Oct 2017 15:00:00", "Thu 12 Oct 2017 19:00:00", "Thu 12 Oct 2017 23:00:00"}, {"Fri 13 Oct 2017 07:00:00", "Fri 13 Oct 2017 11:00:00", "Fri 13 Oct 2017 15:00:00", "Fri 13 Oct 2017 19:00:00", "Fri 13 Oct 2017 23:00:00"}, {"Sat 14 Oct 2017 07:00:00", "Sat 14 Oct 2017 11:00:00", "Sat 14 Oct 2017 15:00:00", "Sat 14 Oct 2017 19:00:00", "Sat 14 Oct 2017 23:00:00"}}, DateTicksFormat → {"MonthNameShort", " ", "Day", "\n", "Hour24Short", ":00"}, ImageSize → Large]
```

Out[31]=

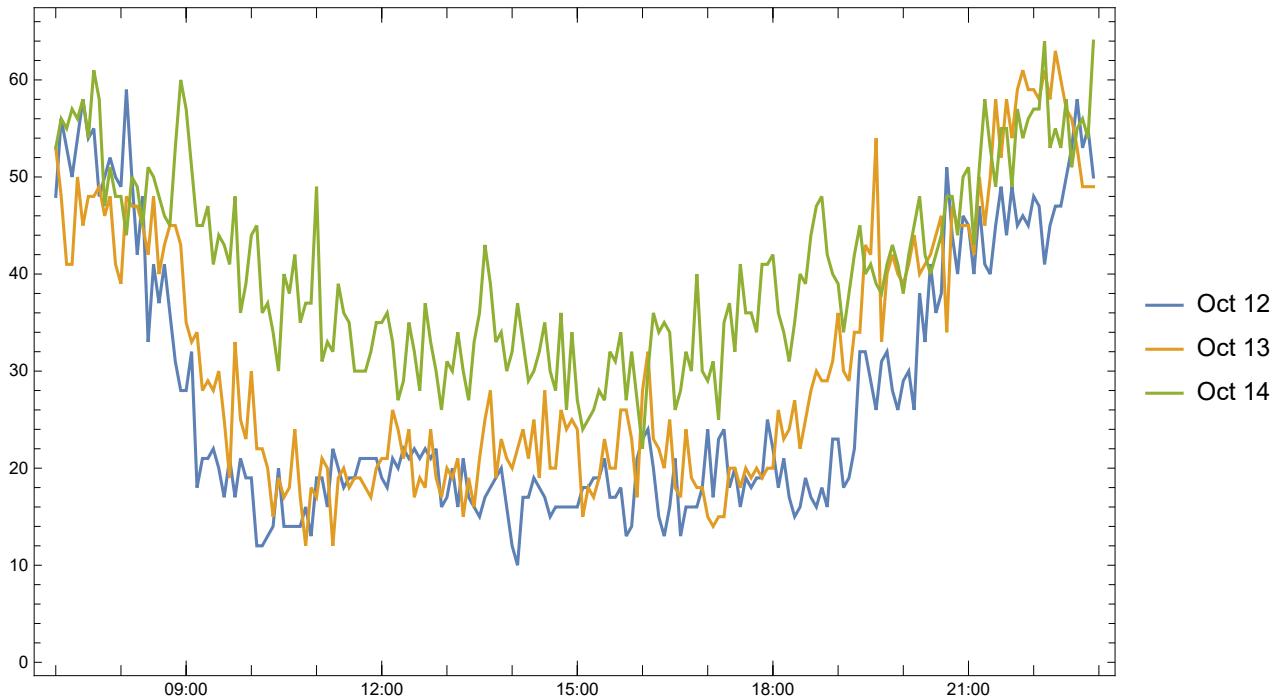


Наложение по дням

In[32]:=

```
DateListPlot[{TimeSeries[Table[EdgeCount[network5m[[i]]], {i, 1, 192}],
{Flatten[Table[StringCases[KDS2[[i, 2]], RegularExpression["....."]], {i, 1, 192}]]}],
TimeSeries[Table[EdgeCount[network5m[[i]]], {i, 193, 384}],
{Flatten[Table[StringCases[KDS2[[i, 2]], RegularExpression["....."]], {i, 193, 384}]]}],
TimeSeries[Table[EdgeCount[network5m[[i]]], {i, 385, 576}],
{Flatten[Table[StringCases[KDS2[[i, 2]], RegularExpression["....."]], {i, 385, 576}]]}],
PlotLegends -> {"Oct 12", "Oct 13", "Oct 14"}, ImageSize -> Large]}
```

Out[32]=



Зависимость числа ребер от времени суток стала более выраженной (Разница между минимумом и максимумом более чем в три раза). Среднее количество ребер в сети:

In[33]:=

```
N[Mean[Table[EdgeCount[network5m[[i]]], {i, 1, Length[network5m]}]]]
```

Out[33]= 32.8663

Средняя плотность:

In[34]:=

```
N[Mean[Table[GraphDensity[network5m[[i]]], {i, 1, Length[network5m]}]]]
```

Out[34]= 0.000299476

Средняя степень вершины:

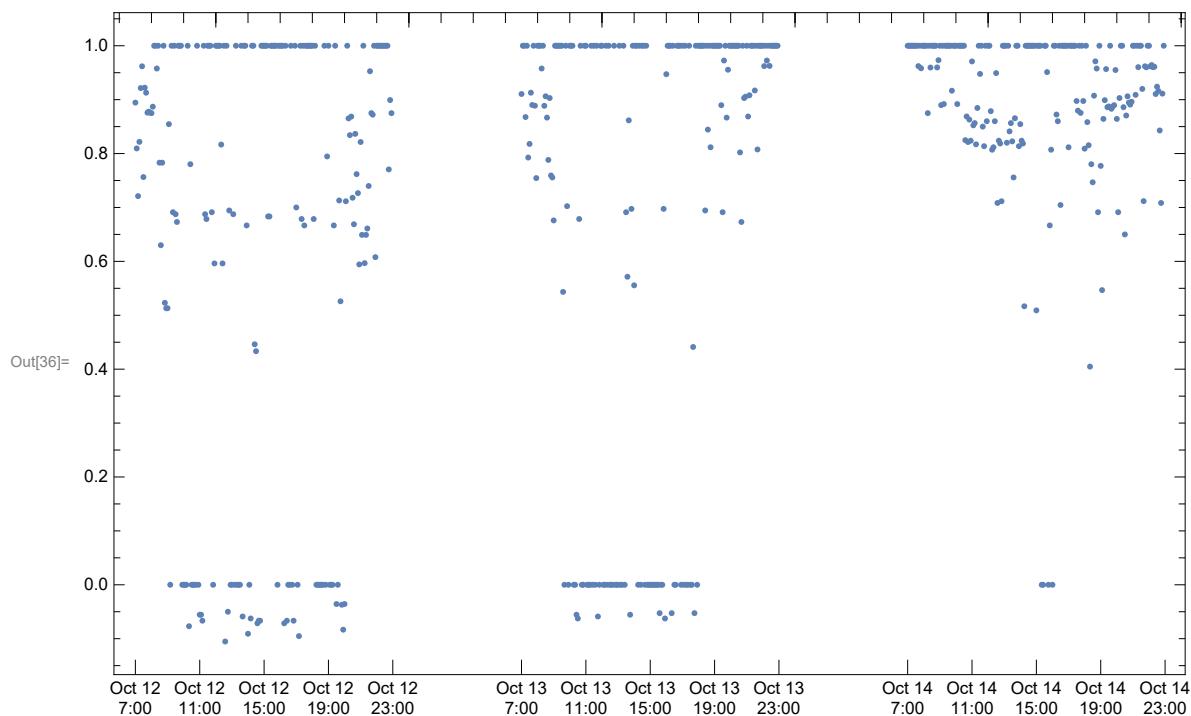
In[35]:=

```
N[Mean[Table[Mean[VertexDegree[network5m[[i]]]], {i, 1, Length[network5m]}]]]
```

Out[35]= 0.140155

Динамика изменения ассортативности сети во времени

```
In[36]:= DateListPlot[TimeSeries[Table[GraphAssortativity[network5m[[i]]], {i, 1, Length[network5m]}], {KDS2[[All, 2]]}], FrameTicks -> {{Automatic, Automatic}, {"Thu 12 Oct 2017 07:00:00", "Thu 12 Oct 2017 11:00:00", "Thu 12 Oct 2017 15:00:00", "Thu 12 Oct 2017 19:00:00", "Thu 12 Oct 2017 23:00:00", "Fri 13 Oct 2017 07:00:00", "Fri 13 Oct 2017 11:00:00", "Fri 13 Oct 2017 15:00:00", "Fri 13 Oct 2017 19:00:00", "Fri 13 Oct 2017 23:00:00", "Sat 14 Oct 2017 07:00:00", "Sat 14 Oct 2017 11:00:00", "Sat 14 Oct 2017 15:00:00", "Sat 14 Oct 2017 19:00:00", "Sat 14 Oct 2017 23:00:00"}, Automatic}}, DateTicksFormat -> {"MonthNameShort", " ", "Day", "\n", "Hour24Short", ":00"}, Joined -> False, ImageSize -> Large]
```



Из за малого количества ребер при большом количестве вершин значение ассортативности теперь чаще либо максимальное (единица), либо нейтральное (ноль), однако среднее значение при этом практически не изменилось:

```
In[37]:= N[Mean[Table[GraphAssortativity[network5m[[i]]], {i, 1, Length[network5m]}]]]
```

```
Out[37]= 0.726977
```

Динамика изменения глобального коэффициента кластеризации сети во времени



Как и ассортативность из за крайне низкой плотности значения коэффициента либо максимальные либо минимальные. Среднее значение практически не изменилось:

In[39]:= $N[\text{Mean}[\text{Table}[\text{GlobalClusteringCoefficient}[\text{network5m}[[i]]], \{i, 1, \text{Length}[\text{network5m}]\}]]]$

Out[39]= 0.745444

Увеличение времени обновления состояния в сети

В исследуемой сети время временной интервал обновления состояния составляет 5 минут. Моделирование распространения эпидемии происходит на протяжении как минимум нескольких дней. По этой причине для уменьшения временных затрат при моделировании необходимо увеличить интервал обновления состояния сети. Так же в дальнейшем мы будем сравнивать результаты моделирования на статичной сети и сети изменяемой во времени. Для этого напишем функцию которая будет объединять состояния сети увеличивая тем самым временной интервал обновления. Вес ребра при объединении N временных промежутков будет считаться по свойствам вероятности, т.е. если мы хотим получить вероятность заражения за общий промежуток времени, то мы перемножаем вероятности того что вершина не заразится на каждом интервале и вычитаем из

единицы полученное произведение: $w_{\text{union}} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - w_i)$. На вход функции подается список ребер, список весов ребер, первая времененная отсечка, последняя временная отсечка, количество временных шагов, которое мы объединяем в один шаг. На выходе мы получаем список ребер и список весов ребер.

```
In[40]:= NetUnion[el_, we_, tstart_, tend_, tstep_] :=
Module[{data = Table[Normal[GroupBy[{Flatten[el[[i]];; i + tstep - 1]}, 
Flatten[we[[i]];; i + tstep - 1]]^T, First]], All, 2], {i, 1, tend - tstep + 1, tstep}], 
data = Table[{DeleteDuplicates[Flatten[data[[i, All, All, 1]]]], Table[1 - Times @@ (1 - data[[i, k, All, 2]]), 
{k, 1, Length[data[[i]]]}]}, {i, 1, tend - tstart + 1, tstep}], {data[[All, 1]], data[[All, 2]]}]}
```

Рассмотрим сеть с обновлением состояния раз в 1 час, 16 часов (день наблюдений) и единую сеть за три дня.

Обновление раз в час

```
In[41]:= up1h = NetUnion[edgelist, w, 1, Length[KDS2], 12];
up1h5m = NetUnion[edgelist5m, w5m, 1, Length[KDS2], 12];
td1h = Table[KDS2[[i, 2]], {i, 1, Length[KDS2], 12}];
```

Обновление раз в день

```
In[44]:= up1d = NetUnion[edgelist, w, 1, Length[KDS2], 192];
up1d5m = NetUnion[edgelist5m, w5m, 1, Length[KDS2], 192];
td1d = {"Thu 12 Oct 2017", "Fri 13 Oct 2017", "Sat 14 Oct 2017"};
```

Единая сеть

```
In[47]:= fn = NetUnion[edgelist, w, 1, Length[KDS2], Length[KDS2]];
fn5m = NetUnion[edgelist5m, w5m, 1, Length[KDS2], Length[KDS2]];
tdfn = {"12-14 Oct 2017"};
```

Исследование единой сети

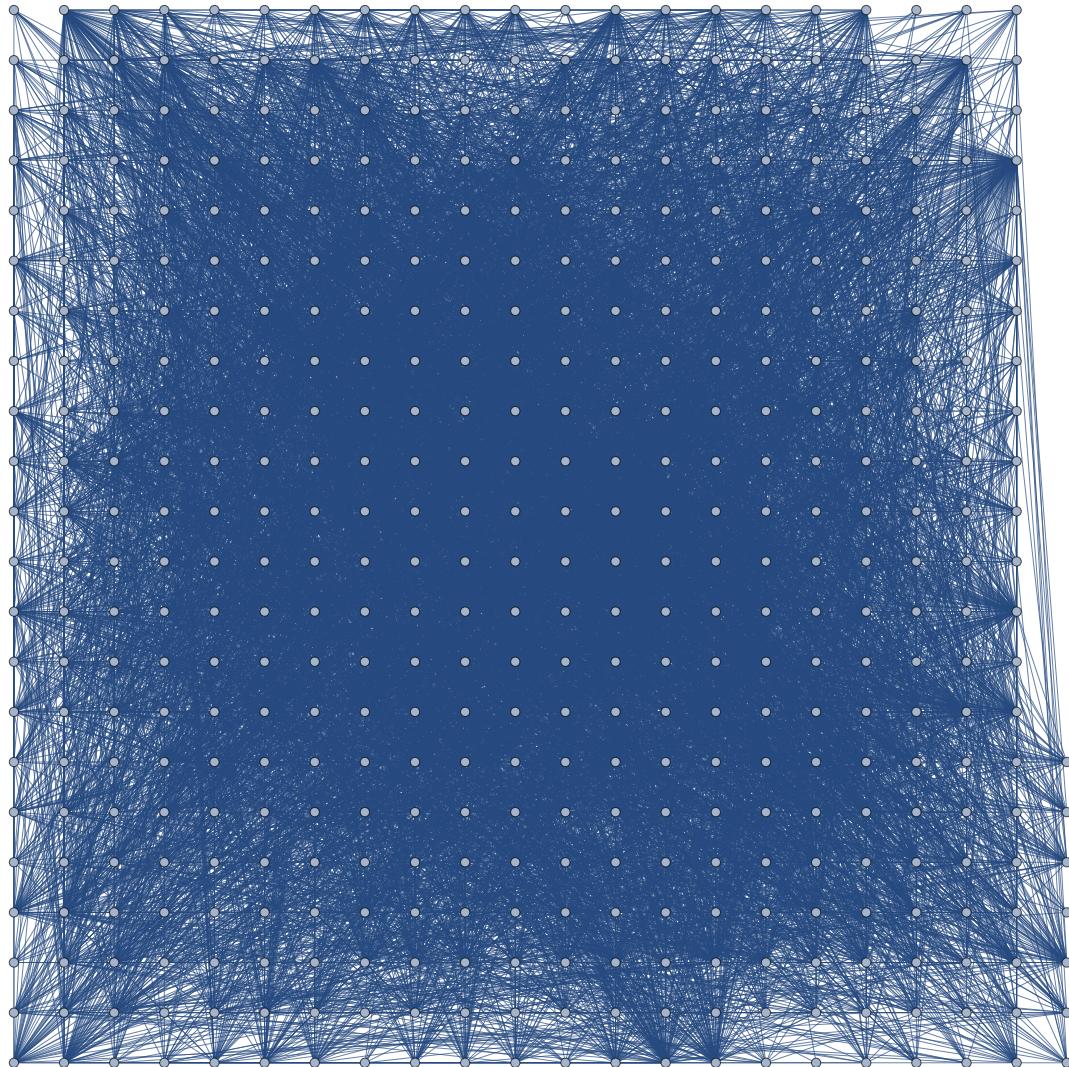
Визуализируем полученную сеть расположив вершины в виде квадратной решетки.

Визуализация единой сети

In[50]:=

```
fng=EdgeAdd[AdjacencyGraph[Table[0,{i,1,vertexcount},{j,1,vertexcount}]],fn[[1,1]],
VertexCoordinates→Table[i→grid[[i]],[i,1,vertexcount]],
EdgeWeight→Table[fn[[1,1,i]]→fn[[2,1,i]],[i,1,Length[fn[[1,1]]]]],ImageSize→Large]
```

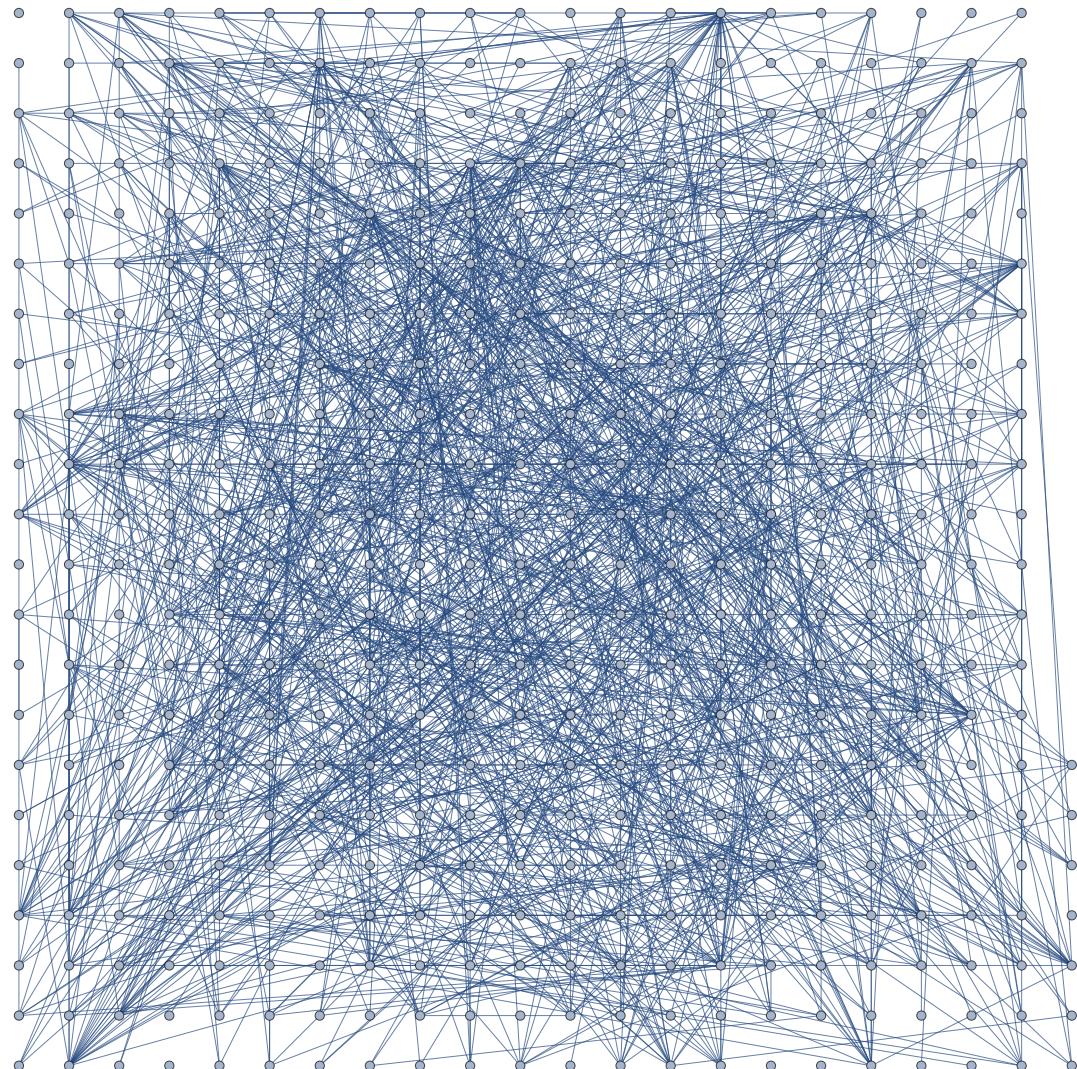
Out[50]=



Визуализация единой сети в которой отброшены все ребра с расстоянием более 5 метров

```
In[51]:= fng5m=EdgeAdd[AdjacencyGraph[Table[0,{i,1,vertexcount},{j,1,vertexcount}]],fn5m[[1,1]],  
VertexCoordinates→Table[i→grid[i],{i,1,vertexcount}],  
EdgeWeight→Table[fn5m[[1,1,i]]→fn5m[[2,1,i]],[i,1,Length[fn5m[[1,1]]]]],ImageSize→Large]
```

Out[51]=



Рассмотрим характеристики единой сети

Характеристики сети

```
In[52]:= Grid[{{{"Характеристика", "Значение"}, {"Число вершин", VertexCount[fng]}, {"Число ребер", EdgeCount[fng]}, {"Плотность", N[GraphDensity[fng]]}, {"Средняя степень вершины", N[Mean[VertexDegree[fng]]]}, {"Коэффициент асортативности", N[GraphAssortativity[fng]]}, {"Коэффициент глобальной кластеризации", N[GlobalClusteringCoefficient[fng]]}}, Background -> {None, {GrayLevel[0.7], {White}}}, Dividers -> {Black, {2 -> Black}}, Frame -> True, Spacings -> {2, {2, {0.7}, 2}}]
```

Out[52]=

Характеристика	Значение
Число вершин	469
Число ребер	8277
Плотность	0.0754196
Средняя степень вершины	35.2964
Коэффициент асортативности	0.129071
Коэффициент глобальной кластеризации	0.219703

Характеристики сети в которой отброшены все ребра с расстоянием более 5 метров

```
In[53]:= Grid[{{{"Характеристика", "Значение"}, {"Число вершин", VertexCount[fng5m]}, {"Число ребер", EdgeCount[fng5m]}, {"Плотность", N[GraphDensity[fng5m]]}, {"Средняя степень вершины", N[Mean[VertexDegree[fng5m]]]}, {"Коэффициент асортативности", N[GraphAssortativity[fng5m]]}, {"Коэффициент глобальной кластеризации", N[GlobalClusteringCoefficient[fng5m]]}}, Background -> {None, {GrayLevel[0.7], {White}}}, Dividers -> {Black, {2 -> Black}}, Frame -> True, Spacings -> {2, {2, {0.7}, 2}}]
```

Out[53]=

Характеристика	Значение
Число вершин	469
Число ребер	1350
Плотность	0.0123011
Средняя степень вершины	5.75693
Коэффициент асортативности	0.12871
Коэффициент глобальной кластеризации	0.179232

Моделирование распространения эпидемии. SIR модель

Британские ученые Андерсон Кермак и Уильям Маккендрек разработали широко применяемую сегодня модель SIR. Эта аббревиатура происходит от английских слов Susceptible — Infected — Recovered, буквально означающих «восприимчивые — инфицированные — выздоровевшие». Под «восприимчивыми» тут подразумеваются еще не инфицированные организмы. В рамках этой модели с помощью систем дифференциальных уравнений (при условии непрерывности времени и большой популяции) или разностных уравнений (при дискретном времени и ограниченной популяции) описывается динамика распространения заболевания. SIR-модель получила

заслуженную популярность в силу простоты построения и использования. Система уравнений SIR:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\beta I S}{N} \\ \frac{\partial I}{\partial t} = \frac{\beta I S}{N} - \gamma I \\ \frac{\partial R}{\partial t} = \gamma I \end{cases}$$

Условие $\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial R}{\partial t} = 0$ описывает неизменность численности популяции (и не учитывает случаи смерти от заболевания).

Где $S(t)$ - численность восприимчивых индивидов в момент времени t ;

$I(t)$ - численность инфицированных индивидов в момент времени t ;

$R(t)$ - численность переболевших индивидов в момент времени t ;

β - коэффициент интенсивности контактов индивидов с последующим инфицированием;

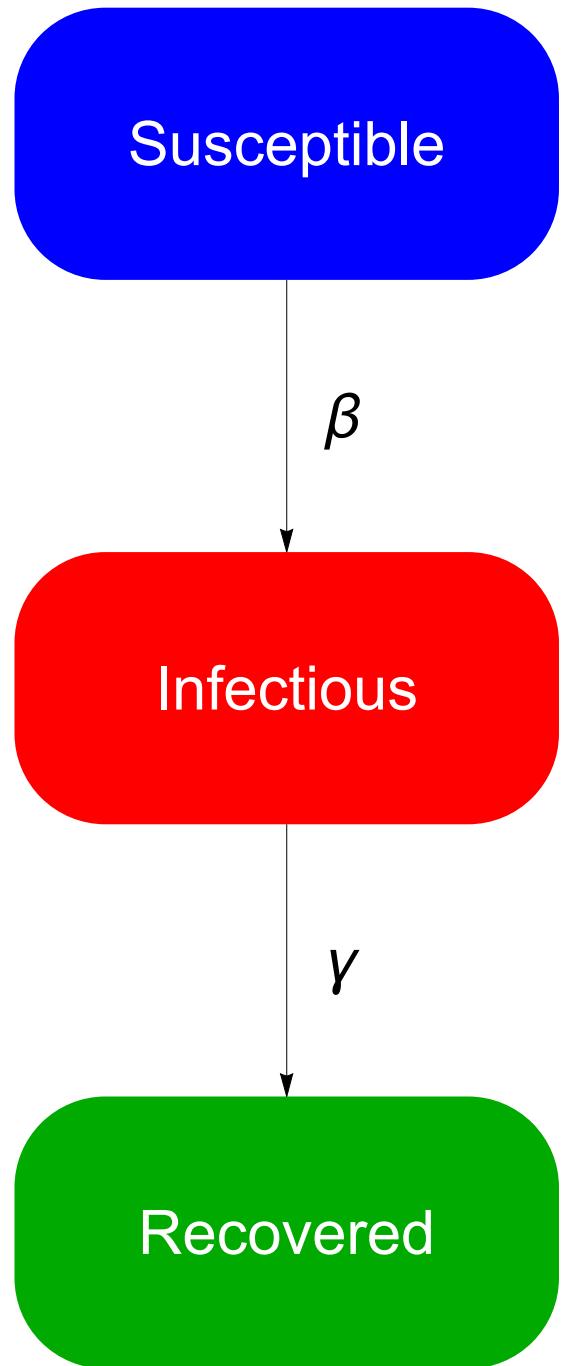
γ - коэффициент интенсивности выздоровления инфицированных индивидов.

Первое уравнение системы означает, что изменение числа здоровых (и при этом восприимчивых к заболеванию) индивидуумов уменьшается со временем пропорционально числу контактов с инфицированными. После контакта происходит заражение, восприимчивый переходит в состояние инфицированного. Второе уравнение показывает, что скорость увеличения числа заразившихся растет пропорционально числу контактов здоровых и инфицированных и уменьшается по мере выздоровления последних. Третье уравнение демонстрирует, что число выздоровевших в единицу времени пропорционально числу инфицированных. Иначе говоря, каждый заболевший через некоторое время должен поправиться. Таким образом, мы видим, что заболевание в модели SIR развивается по схеме «восприимчивые становятся инфицированными, потом выздоравливают». Последнее условие описывает неизменность численности популяции.

График перехода состояний в SIR модели

In[56]:=

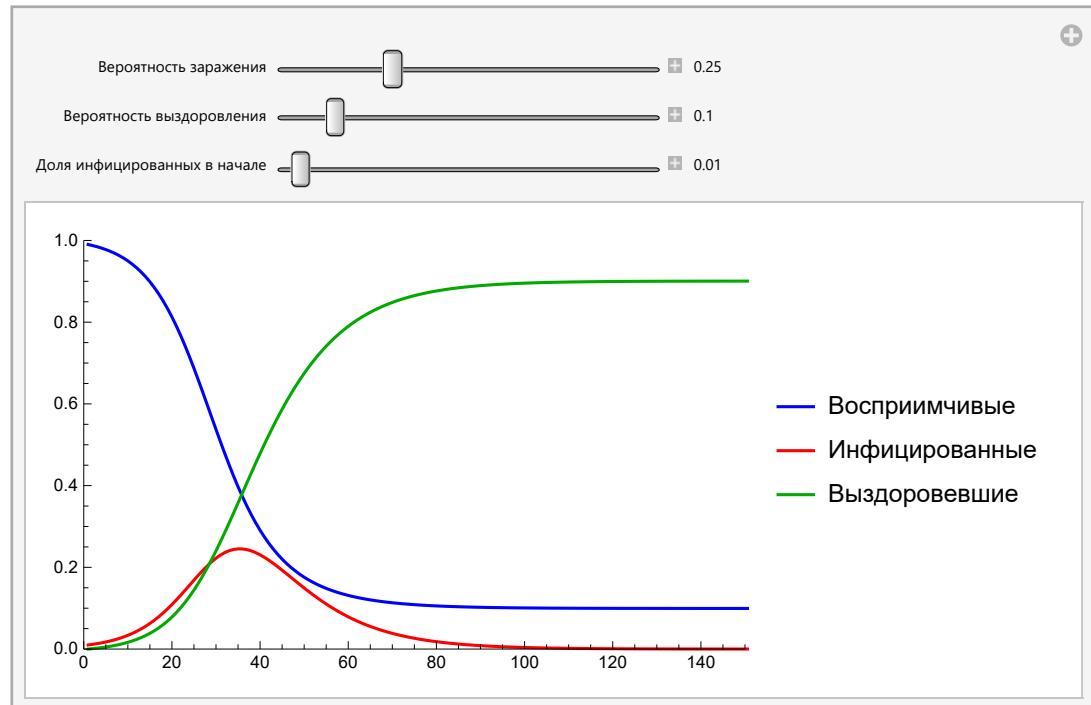
```
Graphics[{{Blue, Rectangle[{2, -1}, {4, -2}], RoundingRadius -> 1/3},
          White, Text[Style["Susceptible", 32], {3, -3/2}], Red, Rectangle[{2, -3}, {4, -4}], RoundingRadius -> 1/3],
          White, Text[Style["Infectious", 32], {3, -7/2}], Darker[Green], Rectangle[{2, -5}, {4, -6}], RoundingRadius -> 1/3],
          White, Text[Style["Recovered", 32], {3, -11/2}], Black, Arrow[{{3, -2}, {3, -3}}], Arrow[{{3, -4}, {3, -5}}],
          Text[Style["β", 32], {16/5, -5/2}], Text[Style["γ", 32], {16/5, -9/2}], ImageSize -> Large]]
```



Интерактивный график SIR модели

```
In[100]:= Manipulate[ListLinePlot[Transpose[NestList[{#[[1]](1-b#[[2]]),(1-c)#[[2]]+b#[[2]]#[[1]],#[[3]]+c#[[2]]}&,{1-i0,i0,0},150]],PlotLegends→{"Восприимчивые","Инфицированные","Выздоровевшие"},PlotStyle→{Blue,Red,Darker[Green]},PlotRange→{{0,150},{0,1}}],{{b,0.25,"Вероятность заражения"},0,0.9,Appearance→"Labeled"},{{c,0.1,"Вероятность выздоровления"},0,0.9,Appearance→"Labeled"},{{i0,0.01,"Доля инфицированных в начале"},0,1,Appearance→"Labeled"}]
```

Out[100]=



SIR модель на графике. Исследование зависимости характеристик вершин от их потенциала к заражению.

Применимо к графикам SIR модель работает следующим образом. В конкретный момент времени каждая вершина в графике может быть в одном из трех состояний: восприимчивый (susceptible), зараженный (infected) и выздоровевший (recovered). Перед началом моделирования случайно (или при необходимости конкретно) выбираются одна или несколько вершин и их статус меняется на инфицированных. У остальных вершин восприимчивый статус. Затем на каждом шаге создается список инфицированных на текущий момент времени вершин, и каждая из этих вершин пытается заразить своих восприимчивых соседей (есть ребро между вершинами) с заданной заранее вероятностью. В нашем случае у каждого ребра своя вероятность. После этого для каждой инфицированной вершины с заданной вероятностью статус может поменяться на выздоровевшую. Моделирование продолжается либо до момента, когда все вершины стали выздоровевшие либо до заданной временной отсечки. На первом этапе рассмотрим разницу при моделировании на сети со всеми ребрами и на сети где были отброшены ребра с расстоянием более 5 метров.

Вспомогательная функция которая для каждой вершины графа выдает список соседних вершин и веса ребер между ними.

```
In[58]:= NearestNeighborList[el_,ew_,vc_]:=Module[{data=Sort[Partition[Flatten[{{el[[All,1]],el[[All,2]],ew}^T,{el[[All,2]],el[[All,1]],ew}^T}],3]]},data=Table[{Cases[data,{i_,_,_}][[All,2]],Cases[data,{i_,_,_}][[All,3]],{i,1,vc}}];data]
```

SIR модель. На вход подается список ребер и их весов для каждого момента времени, количество вершин, инфицированных в начале, вероятность заражения (при 1 вероятность будет равна весу ребра) и выздоровления. На выходе список с состоянием вершин для каждого момента времени

```
In[62]:= SIR[ele_,ewe_,vc_,i0_,β_,μ_]:=Module[{predata=Table[NearestNeighborList[ele[[i]],ewe[[i]],vc],{i,1,Length[ele]}],data=Table[{i,"Susceptible",{}},{j,1,Length[ele]},{i,1,vc}],iv={},rv={},Do[Do[data[[i,j,3]]=predata[[i,j,1]];data[[i,j,4]]=predata[[i,j,2]],[j,1,vc]],[i,1,Length[ele]]];iv=RandomSample[Range[vc],i0];Do[data[[i,iv[[i]],2]]="Infected",{i,1,i0}];Do[rv=Cases[data[[i]],[_, "Recovered",_,_]];If[rv!={},Do[data[[i+1,rv[[j,1]],2]]="Recovered",{j,1,Length[rv]}]];iv=Cases[data[[i]],[_, "Infected",_,_]];If[iv!={},Do[data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Infected",{j,1,Length[iv]}]];Do[If[iv[[j,3]]!={},Do[If[RandomChoice[{β iv[[j,4,k]],1-β iv[[j,4,k]]}→{True,False}]→True,data[[i+1,iv[[j,3,k]],2]]="Infected"],{k,1,Length[iv[[j,3]]]}],[j,1,Length[iv]]];Do[If[RandomChoice[{μ,1-μ}→{True,False}]→True,data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Recovered"],{j,1,Length[iv]}]],{i,1,Length[ele]-1}];data]
```

Вспомогательная функция для дублирования массива.

```
In[63]:= DA[ar_,n_]:=Table[ar[[Mod[i,Length[ar]]+1]],{i,0,n-1}]
```

Вспомогательная функция для моделирования.

```
In[68]:= SIRmod[ele_,ewe_,vc_,i0_,β_,μ_,n_]:=Mean[Table[Module[{out=SIR[ele,ewe,vc,i0,β,μ]},Table[{Length[Cases[out[[i]],[_, "Susceptible",_,_]]],Length[Cases[out[[i]],[_, "Infected",_,_]]],Length[Cases[out[[i]],[_, "Recovered",_,_]]}],{i,1,Length[out]}]],{l,1,n}]]
```

Вспомогательная функция для построения графиков.

```
In[101]:= SIRplot[data_,dt1_,dt2_]:=ListLinePlot[Table[{j,data[[j,i]]},{i,1,3},{j,1,Length[data]}],PlotRange→{{0,Length[data]},{0,Total[data[[1]]]}},Ticks→{Table[{dt1 i,i},{i,0,Round[Length[data]/dt1],dt2}],Automatic},PlotLegends→Placed[{"Восприимчивые","Инфицированные","Выздоровевшие"},Bottom],PlotStyle→{Blue,Red,Darker[Green]},ImageSize→Large]
```

Предположим что вероятность выздоровления за один день составляет 0.1. Тогда вероятность за один час (при условии, что за день наблюдений собираются данные за 16 часов) составляет:

```
In[85]:= γ1h=Solve[1-(1-pγ)^16==0.1&&0<pγ<1,pγ][[1,1,2]]
```

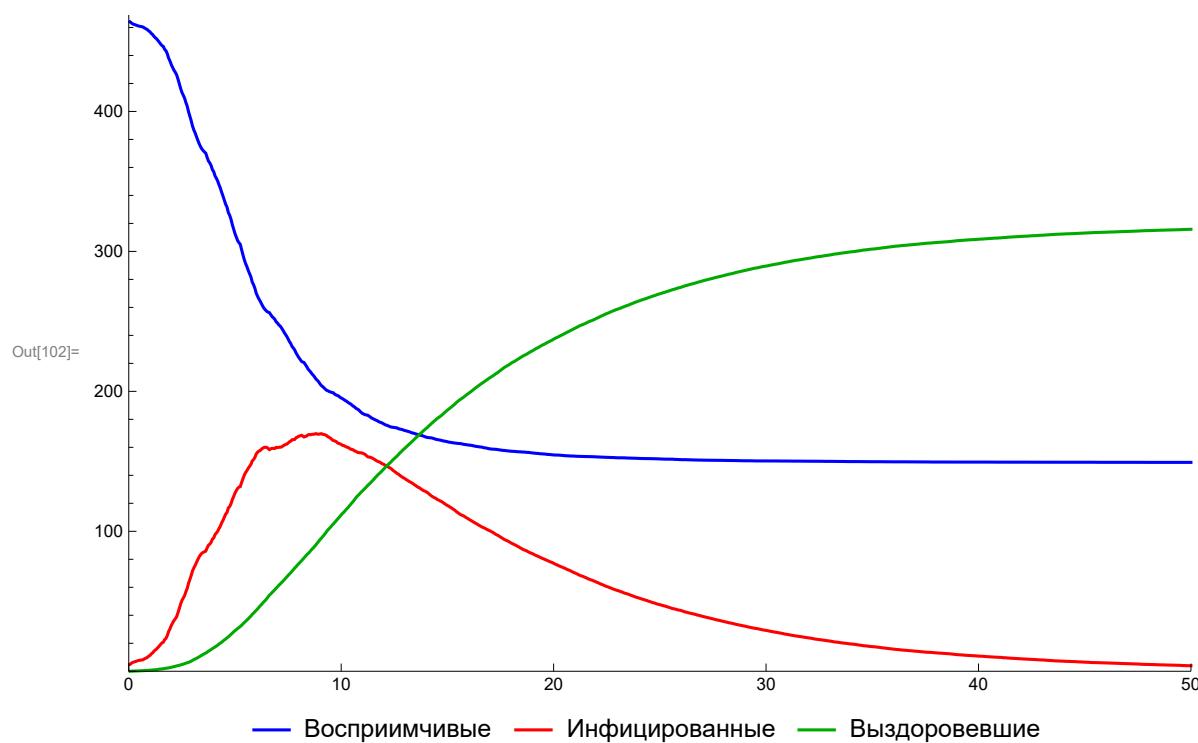
```
Out[85]= 0.0065634
```

Моделирование на сети со всеми ребрами. Обновление состояния сети раз в час. Усреднение по 100 запускам.

```
In[86]:= sir1hn=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"sir1hn.m"}]];(*sir1hn=SIRmod[DA[up1h[[1]],50 16],DA[up1h[[2]],50 16],vertexcount,5,1,γ1h,100];*)
```

График

In[102]:= SIRplot[sir1hn, 16, 10]

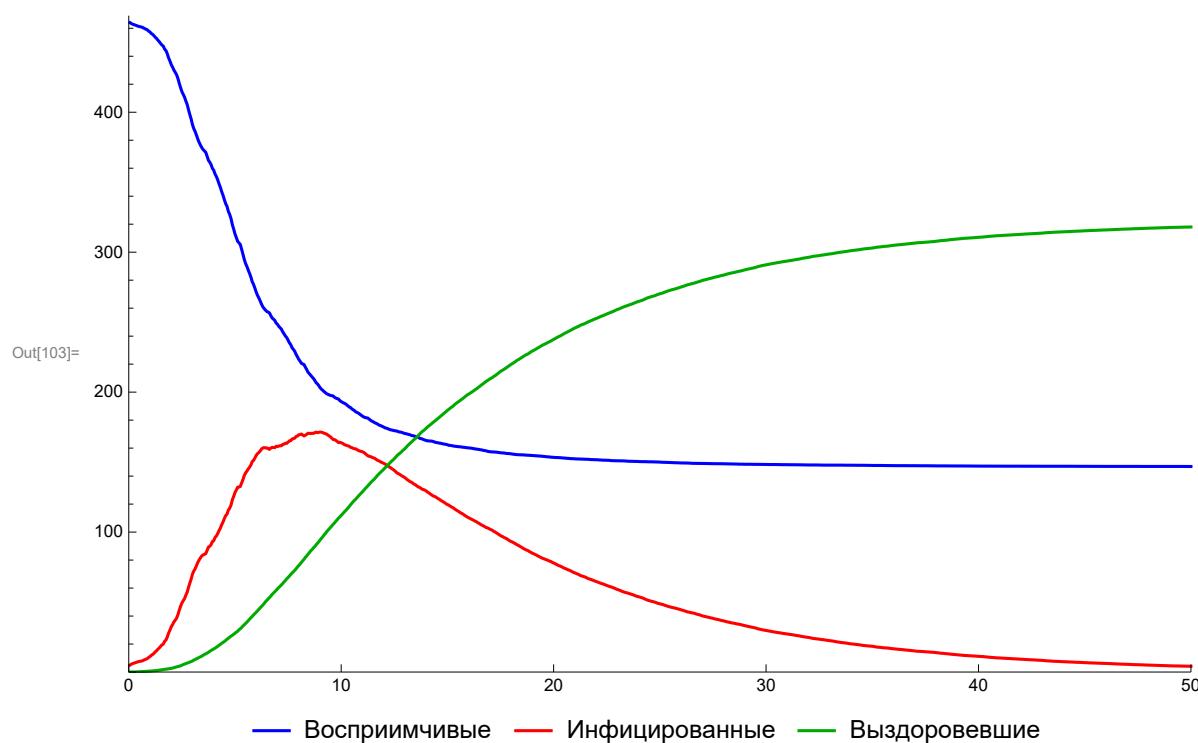


Моделирование на сети где отброшены ребра с расстоянием более 5 метров.

```
sir1hn5m=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "sir1hn5m.m"}]];
(*sir1hn=SIRmod[DA[up1h5m[[1]],50 16],DA[up1h5m[[2]],50 16],vertexcount,5,1,y1h,100];*)
```

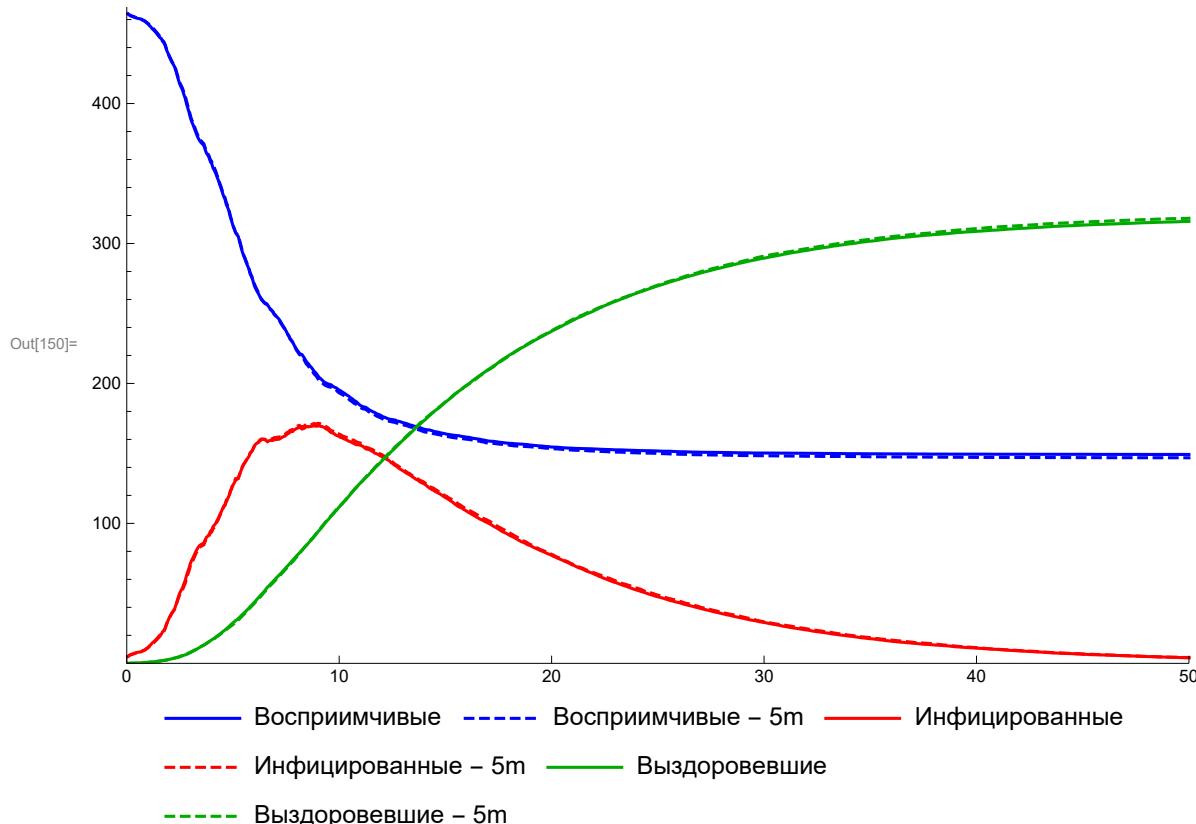
График

In[103]:= SIRplot[sir1hn5m, 16, 10]



Наложение графиков

```
In[150]:= ListLinePlot[{Table[{i,sir1hn[[i,1]]},{i,1,Length[sir1hn]}],  
Table[{i,sir1hn5m[[i,1]]},{i,1,Length[sir1hn5m]}],Table[{i,sir1hn[[i,2]]},{i,1,Length[sir1hn]}],  
Table[{i,sir1hn5m[[i,2]]},{i,1,Length[sir1hn5m]}],Table[{i,sir1hn[[i,3]]},{i,1,Length[sir1hn]}],  
Table[{i,sir1hn5m[[i,3]]},{i,1,Length[sir1hn5m]}]},PlotRange→{{0,800},{0,vertexcount}},  
Ticks→{Table[{16i,i},{i,0,50,10}],Automatic},PlotLegends→Placed[{"Восприимчивые",  
"Восприимчивые - 5m", "Инфицированные", "Инфицированные - 5m",  
"Выздоровевшие", "Выздоровевшие - 5m"},Bottom],  
PlotStyle→{Blue,{Blue,Dashed},Red,{Red,Dashed},Darker[Green],{Darker[Green],Dashed}},  
ImageSize→Large]
```



Расхождение между двумя графиками минимальное. По этой причине для уменьшения затрат времени на дальнейшее моделирование мы будем пользоваться сетью в которой отброшены ребра с расстоянием более 5 метров. Рассмотрим зависимость характеристик вершин от их потенциала к заражению. Для этого упростим нашу модель до SI (мы будем рассматривать первые 10 дней заражения, поэтому можно пренебречь R составляющей) и добавим возможность задать конкретную вершину с которой пойдет распространение эпидемии. Так же изменим выход функции. Нас интересует только итоговая сумма зараженных.

```
In[106]:= SI[ele_,ewe_,vc_,i0_]:=  
Module[{predata=Table[NearestNeighborList[ele[[i]],ewe[[i]],vc],{i,1,Length[ele]}],  
data=Table[{i,"Susceptible",{}},{}],{j,1,Length[ele]},{i,1,vc}],iv={},out={},  
Do[Do[data[[i,j,3]]=predata[[i,j,1]];data[[i,j,4]]=predata[[i,j,2]],[j,1,vc]},{i,1,Length[ele]}];  
data[[1,i0,2]="Infected";Do[iv=Cases[data[[i]],{_,"Infected",_,_}];  
If[iv!={},Do[data[[i+1,iv[[j,1]],2]="Infected",{j,1,Length[iv]}];  
Do[If[iv[[j,3]]!={},Do[If[RandomChoice[{ iv[[j,4,k]],1- iv[[j,4,k]] }→{True,False}]==True,  
If[data[[i,iv[[j,3,k]],2]=="Susceptible",data[[i+1,iv[[j,3,k]],2]="Infected"]],  
{k,1,Length[iv[[j,3,k]]}]},{j,1,Length[iv]}]],{i,1,Length[ele]-1}];  
out=Length[Cases[data[[1]],{_,"Infected",_,_}]];out]
```

Для каждой вершины в сети мы моделируем по 10 раз распространение эпидемии стартующее с

этой вершины. Усредняем полученные данные и ранжируем итоговый список. Таким образом мы получили список вершин давших наибольший уровень заражения в целом по сети.

```
In[107]:= rank=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "rank.m"}]];
(*rank=ReverseSortBy[Table[{m,N[Mean[Table[SI[DA[up1h5m[[1]],10 16],
DA[up1h5m[[2]],10 16],vertexcount,m],{1,1,10}]]}],{m,1,vertexcount}],Last];*)


```

Средние характеристики вершин.

```
In[108]:= vc=Mean[Table[Module[{in=EdgeAdd[AdjacencyGraph[Table[0,{i,1,vertexcount},{j,1,vertexcount}]],up1h5m[[1,1]]},SortBy[{VertexList[in],DegreeCentrality[in],ClosenessCentrality[in],
BetweennessCentrality[in],EigenvectorCentrality[in],LocalClusteringCoefficient[in]}^T,First}],
{1,1,Length[up1h5m[[1]]}]]];


```

Топ 10 вершин по потенциальному заражению

```
In[149]:= Grid[Partition[Flatten[{"Номер вершины","Среднее количество зараженных в сети через 10 дней",
"Средняя центральность по степени","Средняя центральность по близости",
Table[{rank[[i]],N[vc[[rank[[i,1]]][[2;;3]]]},{{i,1,10}}],"Номер вершины",
"Средняя центральность по посредничеству","Средняя степень влиятельности",
"Средний локальный коэффициент кластеризации",
Table[{rank[[i,1]],N[vc[[rank[[i,1]]][[4;;6]]]},{{i,1,10}}]],4],
Background→{None,{1→GrayLevel[0.7],12→GrayLevel[0.7]}},Dividers→{Black,
{2→Black,12→Black,13→Black}},Frame→True,Spacings→{2,2}]
```

Номер вершины	Среднее количество зараженных в сети через 10 дней	Средняя центральность по степени	Средняя центральность по близости
342	321.6	0.979167	0.622964
215	320.3	1.35417	0.432326
73	318.1	1.0625	0.639389
330	317.6	2.54167	0.483086
12	317.4	0.75	0.606859
14	317.	0.9375	0.403745
375	316.5	1.25	0.32204
311	315.7	1.6875	0.5932
301	315.6	1.20833	0.44424
228	315.6	1.0625	0.263657

Out[149]=

Номер вершины	Средняя центральность по посредничеству	Средняя степень влиятельности	Средний локальный коэффициент кластеризации
342	1.03125	0.00620936	0.04375
215	6.58333	0.00619406	0.125
73	0.631944	0.00631722	0.121032
330	14.2222	0.0116966	0.269246
12	0.5625	0.00455398	0.0208333
14	4.8125	0.00627165	0.0916667
375	8.27431	0.0055104	0.0861111
311	6.9375	0.00902232	0.131944
301	0.0121528	0.0055912	0.4375
228	0.770833	0.00442005	0.409722

Составим теперь списки вершин отсортированных по различным характеристикам. Средняя центральность по степени:

```
In[151]:= tdc=ReverseSortBy[{vc[[All,1]],vc[[All,2]]}^T,Last][[1;;20]];
```

Средняя центральность по близости:

```
In[152]:= tcc=ReverseSortBy[{vc[[All,1]],vc[[All,3]]}^T,Last][[1;;20]];
```

Средняя центральность по посредничеству:

```
In[153]:= tbc=ReverseSortBy[{vc[[All,1]],vc[[All,4]]}^T,Last][[1;;20]];
```

Средняя центральность влиятельности:

```
In[154]:= tec=ReverseSortBy[{vc[[All,1]],vc[[All,5]]}^T,Last][[1;;20]];
```

Средний локальный коэффициент кластеризации:

```
In[155]:= tlcc=ReverseSortBy[{vc[[All,1]],vc[[All,6]]}^T,Last][[1;;20]];
```

Составим таблицу в которой будет показано сколько вершин из топ 20 по какой-либо характеристике также находятся в топ 20 по уровню заражения.

Зависимость потенциала вершины к заражению от ее характеристик

```
In[156]:= Grid[{{"Характеристика",
"Количество вершин из топ 20 по характеристике которые входят в топ 20 по уровню заражения"}, {"Средняя центральность по степени",Length[rank[[1;;20,1]]\[Intersection]tcc[[All,1]]]}, {"Средняя центральность по близости",Length[rank[[1;;20,1]]\[Intersection]tcc[[All,1]]]}, {"Средняя центральность по посредничеству",Length[rank[[1;;20,1]]\[Intersection]tbc[[All,1]]]}, {"Средняя центральность влиятельности",Length[rank[[1;;20,1]]\[Intersection]tec[[All,1]]]}, {"Средний локальный коэффициент кластеризации",Length[rank[[1;;20,1]]\[Intersection]tlcc[[All,1]]]}}, Background→{None,{GrayLevel[0.7],{White}}},Dividers→{Black,{2→Black}}, Frame→True,Spacings→{2,{2,{0.7},2}}]
```

Характеристика	Количество вершин из топ 20 по характеристике которые входят в топ 20 по уровню заражения
Средняя центральность по степени	6
Средняя центральность по близости	0
Средняя центральность по посредничеству	9
Средняя центральность влиятельности	5
Средний локальный коэффициент кластеризации	5

SEIRD модель

По SIER модели развиваются по-настоящему опасные эпидемии, поскольку длительный инкубационный период может препятствовать своевременному обнаружению заболевания. В этом случае есть риск, что заболевание охватит значительное число индивидуумов в популяции.

Инфекция развивается по схеме «восприимчивые» — «контактные» — «инфицированные» — «выздоровевшие» и описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} = \mu N - \mu S - \beta \frac{I}{N} S \\ \frac{\partial E}{\partial t} = \beta \frac{I}{N} S - (\mu + \alpha) E \\ \frac{\partial I}{\partial t} = \alpha E - (\gamma + \mu) I \\ \frac{\partial R}{\partial t} = \gamma I - \mu R \end{cases}$$

Где μ - уровень смертности;

α - величина, обратная среднему инкубационному периоду заболевания;

$E(t)$ - численность индивидов — носителей заболевания в момент времени t .

Как и в модели SIR, первое уравнение системы означает, что изменение числа здоровых (и при этом восприимчивых к заболеванию) индивидуумов уменьшается со временем пропорционально числу контактов с инфицированными. После заражения здоровый индивид переходит в состояние контактного по данному заболеванию, или носителя инфекции.

Второе уравнение вносит задержку по времени при переходе из состояния контактного в состояние инфицированного (больного). Это происходит через время, равное инкубационному периоду болезни.

Третье уравнение описывает переход из состояния «контактный» в состояние «инфицированный».

Четвертое уравнение демонстрирует, что число выздоровевших в единицу времени пропорционально числу инфицированных. При этом в каждом состоянии индивидуум может погибнуть, что учитывает коэффициент μ в каждом уравнении.

Иначе говоря, в каждый момент времени каждый индивидуум с определенной вероятностью может заразиться, через некоторое время — заболеть, а затем поправиться либо погибнуть.

Численность популяции $N = S + E + I + R$ при том не является постоянной с течением времени, однако возможно модифицировать модель, добавив в неё пятое состояние - умершие (Dead). В такой ситуации $N = S + E + I + R + D = \text{Const.}$

Система уравнений в SEIRD модели принимает такой вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\beta}{N} S I \\ \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\beta}{N} S I - \epsilon E \\ \frac{\partial I}{\partial t} = \epsilon E - \gamma I - \alpha I \\ \frac{\partial R}{\partial t} = \gamma I \\ \frac{\partial D}{\partial t} = \alpha I \end{cases}$$

Где β - коэффициент перехода из состояния S в E (вероятность заражения);

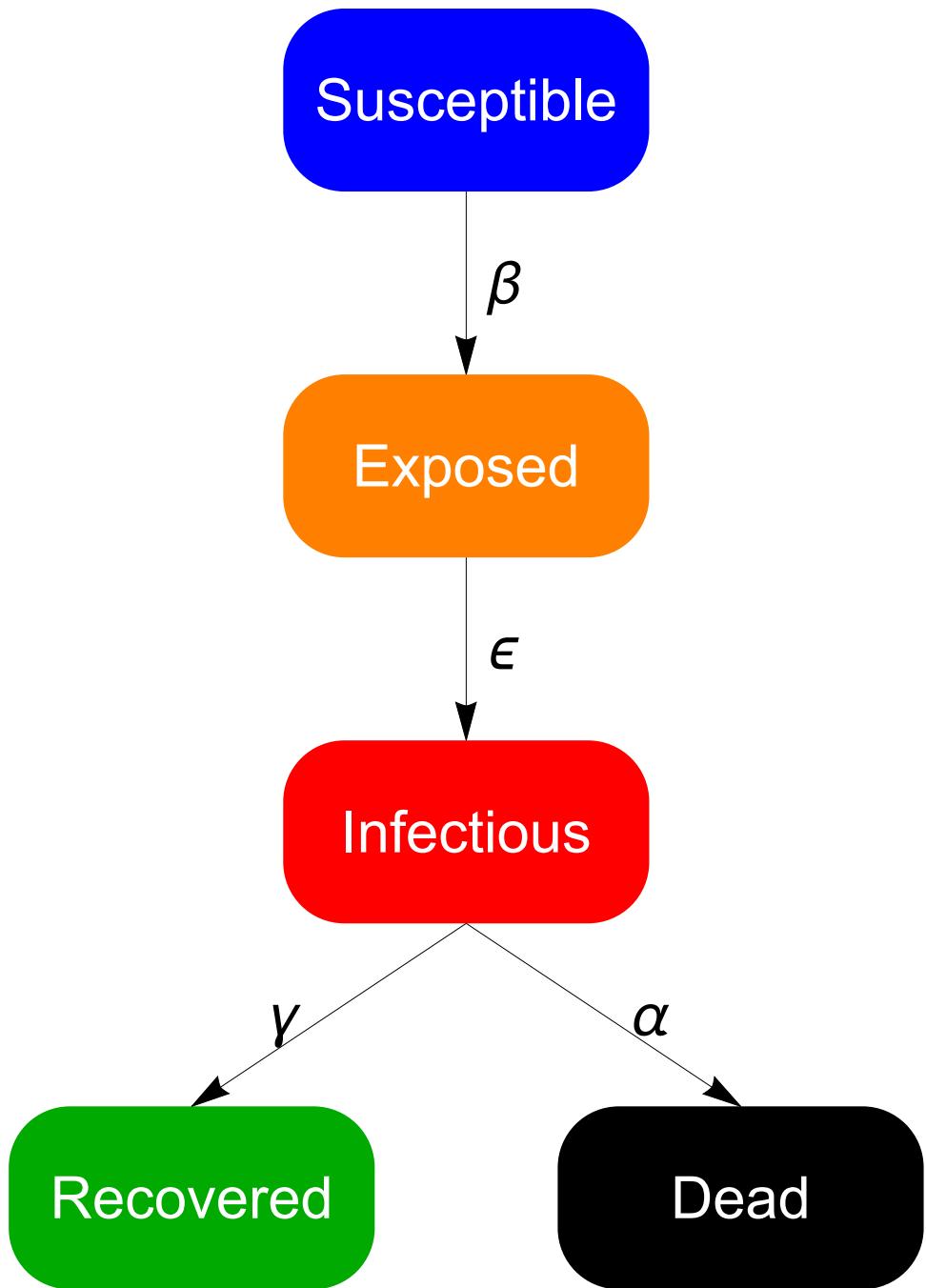
ϵ - коэффициент перехода из состояния E в I (величина, обратная среднему инкубационному периоду заболевания);

γ - коэффициент перехода из состояния I в R (носитель становится заразным);

α - коэффициент перехода из состояния I в D (уровень смертности).

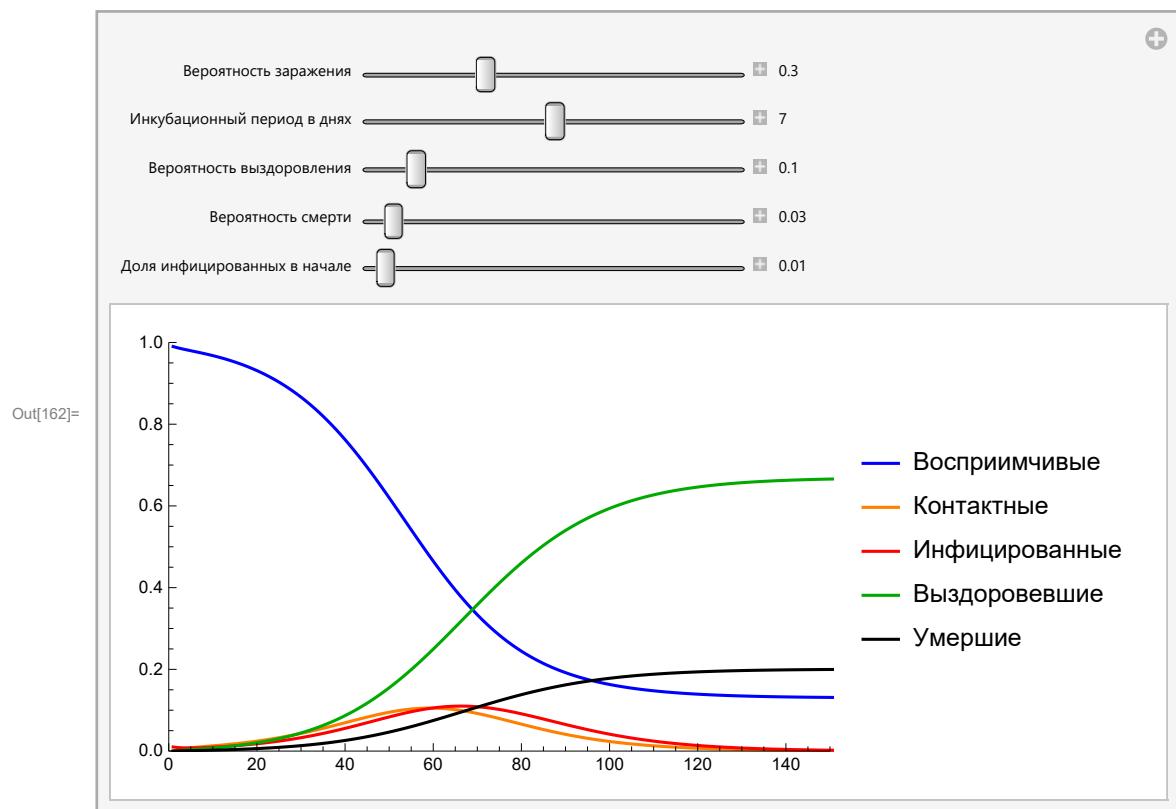
График перехода состояний в SEIRD модели

```
In[159]:= Graphics[{{Blue, Rectangle[{2, -1}, {4, -2}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]},
White, Text[Style["Susceptible", 32], {3, - $\frac{3}{2}$ }], Orange, Rectangle[{2, -3}, {4, -4}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ],
White, Text[Style["Exposed", 32], {3, - $\frac{7}{2}$ }], Red, Rectangle[{2, -5}, {4, -6}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ],
White, Text[Style["Infectious", 32], {3, - $\frac{11}{2}$ }], Darker[Green],
Rectangle[{ $\frac{1}{2}$ , -7}, { $\frac{5}{2}$ , -8}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ], White, Text[Style["Recovered", 32], { $\frac{3}{2}$ , - $\frac{15}{2}$ }],
Black, Rectangle[{ $\frac{7}{2}$ , -7}, { $\frac{11}{2}$ , -8}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ], White, Text[Style["Dead", 32], { $\frac{9}{2}$ , - $\frac{15}{2}$ }],
Black, Arrow[{{3, -2}, {3, -3}}], Arrow[{{3, -4}, {3, -5}}], Arrow[{{3, -6}, { $\frac{3}{2}$ , -7}}],
Arrow[{{3, -6}, { $\frac{9}{2}$ , -7}}], Text[Style[" $\beta$ ", 32], { $\frac{16}{5}$ , - $\frac{5}{2}$ }], Text[Style[" $\epsilon$ ", 32], { $\frac{16}{5}$ , - $\frac{9}{2}$ }],
Text[Style[" $\gamma$ ", 32], {2, - $\frac{13}{2}$ }], Text[Style[" $\alpha$ ", 32], {4, - $\frac{13}{2}$ }]}, ImageSize -> Large]
```



Интерактивный график SEIRD модели

```
In[162]:= Manipulate[ListLinePlot[Transpose[NestList[{#[[1]] (1 - \[Beta] #[[3]]), #[[2]] \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) + \[Beta] #[[1]] #[[3]], #[[3]] (1 - \[Gamma] - \[Alpha]) + \frac{1}{\epsilon} #[[2]], #[[4]] + \[Gamma] #[[3]], #[[5]] + \[Alpha] #[[3]]} &, {1 - i0, 0, i0, 0, 0}, 150]], PlotLegends -> {"Восприимчивые", "Контактные", "Инфицированные", "Выздоровевшие", "Умершие"}, PlotStyle -> {Blue, Orange, Red, Darker[Green], Black}, PlotRange -> {{0, 150}, {0, 1}}], {{\beta, 0.3, "Вероятность заражения"}, 0, 1, Appearance -> "Labeled"}, {{\epsilon, 7, "Инкубационный период в днях"}, 0, 14, Appearance -> "Labeled"}, {{\gamma, 0.1, "Вероятность выздоровления"}, 0, 1, Appearance -> "Labeled"}, {{\alpha, 0.03, "Вероятность смерти"}, 0, 0.9, Appearance -> "Labeled"}, {{i0, 0.01, "Доля инфицированных в начале"}, 0, 1, Appearance -> "Labeled"}]
```



SEIRD модель на графике

<ЗДЕСЬ БУДЕТ ТЕКСТ>

```
In[163]:= SEIRD[ele_,ewe_,vc_,i0_,β_,ε_,γ_,α_]:=  
Module[{predata=Table[NearestNeighborList[ele[[i]],ewe[[i]],vc],{i,1,Length[ele]}],  
data=Table[{i,"Susceptible",{},{}},{j,1,Length[ele]},{i,1,vc}],ev={},iv={},rv={},dv={}},  
Do[Do[data[[i,j,3]]=predata[[i,j,1]];data[[i,j,4]]=predata[[i,j,2]],[j,1,vc]],[i,1,Length[ele]]];  
iv=RandomSample[Range[vc],i0];Do[data[[1,iv[[i]],2]]="Infected",{i,1,i0}];  
Do[rv=Cases[data[[i]],{_,"Recovered"},{_,_}];  
If[rv!={},Do[data[[i+1,rv[[j,1]],2]]="Recovered",{j,1,Length[rv]}]];]  
dv=Cases[data[[i]],{_,"Dead"},{_,_}];If[dv!={},Do[data[[i+1,dv[[j,1]],2]]="Dead",{j,1,Length[dv]}]];  
ev=Cases[data[[i]],{_,"Exposed"},{_,_}];iv=Cases[data[[i]],{_,"Infected"},{_,_}];  
If[ev!={},Do[If[RandomChoice[{e,1-e}→{True,False}]==True,data[[i+1,ev[[j,1]],2]]="Infected",  
data[[i+1,ev[[j,1]],2]]="Exposed"],{j,1,Length[ev]}]];If[iv!={},Do[If[iv[[j,3]]!=  
Do[If[RandomChoice[{{β iv[[j,4,k]],1-β iv[[j,4,k]]}→{True,False}}]==True,  
If[data[[i,iv[[j,3,k]],2]]=="Susceptible",data[[i+1,iv[[j,3,k]],2]]="Exposed"]],{k,1,Length[iv[[j,3]]]}]];]  
If[RandomChoice[{{γ,1-γ}→{True,False}}]==True,If[RandomChoice[{{α,1-α}→{True,False}}]==True,  
data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Dead",data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Recovered"],  
data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Infected"],{j,1,Length[iv]}]],{i,1,Length[ele]-1}];data]
```

Вспомогательная функция для моделирования.

```
In[170]:= SEIRDmod[ele_,ewe_,vc_,i0_,β_,ε_,γ_,α_,n_]:=  
Mean[Table[Module[{out=SEIRD[ele,ewe,vc,i0_,β_,ε_,γ_,α_]},  
Table[{Length[Cases[out[[i]],{_,"Susceptible"},{_,_}]],  
Length[Cases[out[[i]],{_,"Exposed"},{_,_}]],Length[Cases[out[[i]],{_,"Infected"},{_,_}]],  
Length[Cases[out[[i]],{_,"Recovered"},{_,_}]],Length[Cases[out[[i]],{_,"Dead"},{_,_}]}],  
{i,1,Length[out]}]],{1,1,n}]]
```

Вспомогательная функция для построения графиков.

```
In[171]:= SEIRDplot[data_,dt1_,dt2_]:=ListLinePlot[Table[{j,data[[j,i]]},{i,1,5},{j,1,Length[data]}],  
PlotRange→{{0,Length[data]},{0,Total[data[[1]]]}},  
Ticks→{Table[{dt1 i,i},{i,0,Round[Length[data]/dt1],dt2}],Automatic},  
PlotLegends→Placed[{"Восприимчивые","Контактные","Инфицированные","Выздоровевшие","Умершие"},Bottom],  
PlotStyle→{Blue,Orange,Red,Darker[Green],Black},ImageSize→Large]
```

Вспомогательная функция для построения графиков .

```
In[247]:= SEIRDplotsum[o1_,o2_,o3_,o4_,o5_,dt1_,dt2_]:= 
ListLinePlot[Module[{n=Length[o1]}, {Table[{i,o1[[i,1]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,1]]},{i,1,n}],
Table[{i,o3[[i,1]]},{i,1,n}],Table[{i,o4[[i,1]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,1]]},{i,1,n}],
Table[{i,o1[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,2]]},{i,1,n}],
Table[{i,o4[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o1[[i,3]]},{i,1,n}],
Table[{i,o2[[i,3]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,3]]},{i,1,n}],Table[{i,o4[[i,3]]},{i,1,n}],
Table[{i,o5[[i,3]]},{i,1,n}],Table[{i,o1[[i,4]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,4]]},{i,1,n}],
Table[{i,o3[[i,4]]},{i,1,n}],Table[{i,o4[[i,4]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,4]]},{i,1,n}],
Table[{i,o1[[i,5]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,5]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,5]]},{i,1,n}],
Table[{i,o4[[i,5]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,5]]},{i,1,n}]}], 
PlotRange→{{0,Length[o1]},{0,Total[o1[[1]]]}},
Ticks→{Table[{dt1 i,i},{i,0,Round[Length[o1]
dt1 ]},dt2]],Automatic},
PlotStyle→{{Blue,Dotted},{Blue,Dotted,Thick},{Blue,Dashed},{Blue,Dashed,Thick},{Blue,Thick},
{Orange,Dotted},{Orange,Dotted,Thick},{Orange,Dashed},{Orange,Dashed,Thick},{Orange,Thick},
{Red,Dotted},{Red,Dotted,Thick},{Red,Dashed},{Red,Dashed,Thick},{Red,Thick},
{Darker[Green],Dotted},{Darker[Green],Dotted,Thick},{Darker[Green],Dashed},
{Darker[Green],Dashed,Thick},{Darker[Green],Thick},
{Black,Dotted},{Black,Dotted,Thick},{Black,Dashed},{Black,Dashed,Thick},{Black,Thick}},
PlotLegends→Placed[LineLegend[{"Восприимчивые, время ввода меры - с первого дня",
"Восприимчивые, время ввода меры - через неделю от начала",
"Восприимчивые, время ввода меры - через две недели от начала",
"Восприимчивые, время ввода меры - через три недели от начала",
"Восприимчивые, без ввода мер","Контактные, время ввода меры - с первого дня",
"Контактные, время ввода меры - через неделю от начала",
"Контактные, время ввода меры - через две недели от начала",
"Контактные, время ввода меры - через три недели от начала",
"Контактные, без ввода мер","Инфицированные, время ввода меры - с первого дня",
"Инфицированные, время ввода меры - через неделю от начала",
"Инфицированные, время ввода меры - через две недели от начала",
"Инфицированные, время ввода меры - через три недели от начала",
"Инфицированные, без ввода мер","Выздоровевшие, время ввода меры - с первого дня",
"Выздоровевшие, время ввода меры - через неделю от начала",
"Выздоровевшие, время ввода меры - через две недели от начала",
"Выздоровевшие, время ввода меры - через три недели от начала",
"Выздоровевшие, без ввода мер","Умершие, время ввода меры - с первого дня",
"Умершие, время ввода меры - через неделю от начала",
"Умершие, время ввода меры - через две недели от начала",
"Умершие, время ввода меры - через три недели от начала",
"Умершие, без ввода мер"}],Bottom],ImageSize→Large]
```

Возьмем среднее время инкубационного периода в 7 дней. Тогда за один час получаем:

$$\epsilon_{1h}=N\left[\frac{1}{7\times 16}\right]$$

Out[172]= 0.00892857

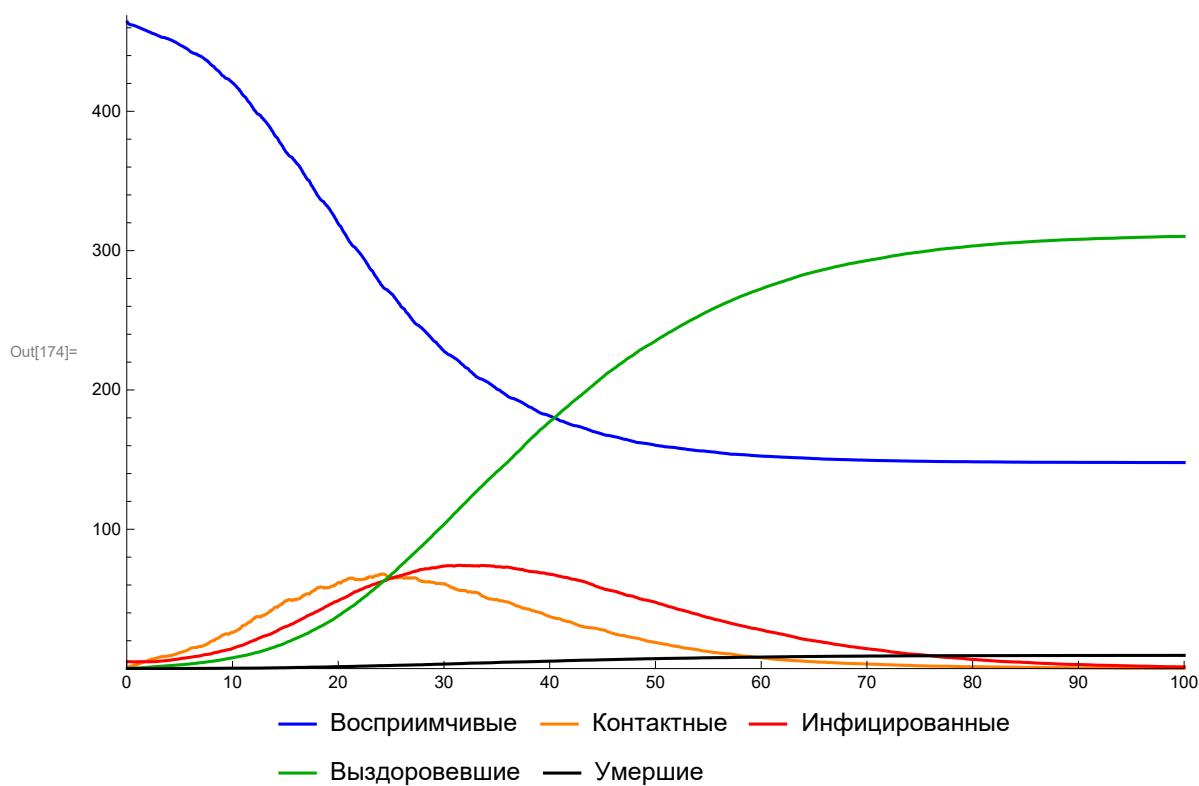
Вероятность заражения и выздоровления оставим такой же как и при SIR моделировании.

Вероятность смерти возьмем за 3%.

```
In[173]:= seird1hn5m=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5m.m"}]];
(*seird1hn5m=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)
```

График

In[174]:= SEIRDplot[seird1hn5m, 16, 10]



Исследование влияния ограничительных мер на распространение эпидемии. Социальная дистанция

Рассмотрим теперь различные меры по борьбе с эпидемией. Начнем с социальной дистанции. Чаше всего рассматривается социальная дистанция в 1 или 2 метра. Создадим копии нашей сети, где расстояния ребер изменены так, что среди них ребер с дистанцией менее чем социальная дистанция.

Социальная дистанция в 1 метр:

```
In[176]:= up1h5msd1m=NetUnion[edgelist5m,Module[{out=edgelength5m},Do[Do[If[out[[i,j]]<1.,out[[i,j]]=1.],{j,1,Length[out[[i]]]}],{i,1,Length[out]}];p e^-out],1,Length[KDS2],12];
```

Социальная дистанция в 2 метра:

```
In[177]:= up1h5msd2m=NetUnion[edgelist5m,Module[{out=edgelength5m},Do[Do[If[out[[i,j]]<2.,out[[i,j]]=2.],{j,1,Length[out[[i]]]}],{i,1,Length[out]}];p e^-out],1,Length[KDS2],12];
```

Произведем моделирование при условиях, что социальная дистанция была введена в первый день эпидемии, через неделю, через две недели, через три недели. Нам потребуется специальная функция, которая будет сначала брать веса в сети до ввода мер, а затем веса после ввода мер.

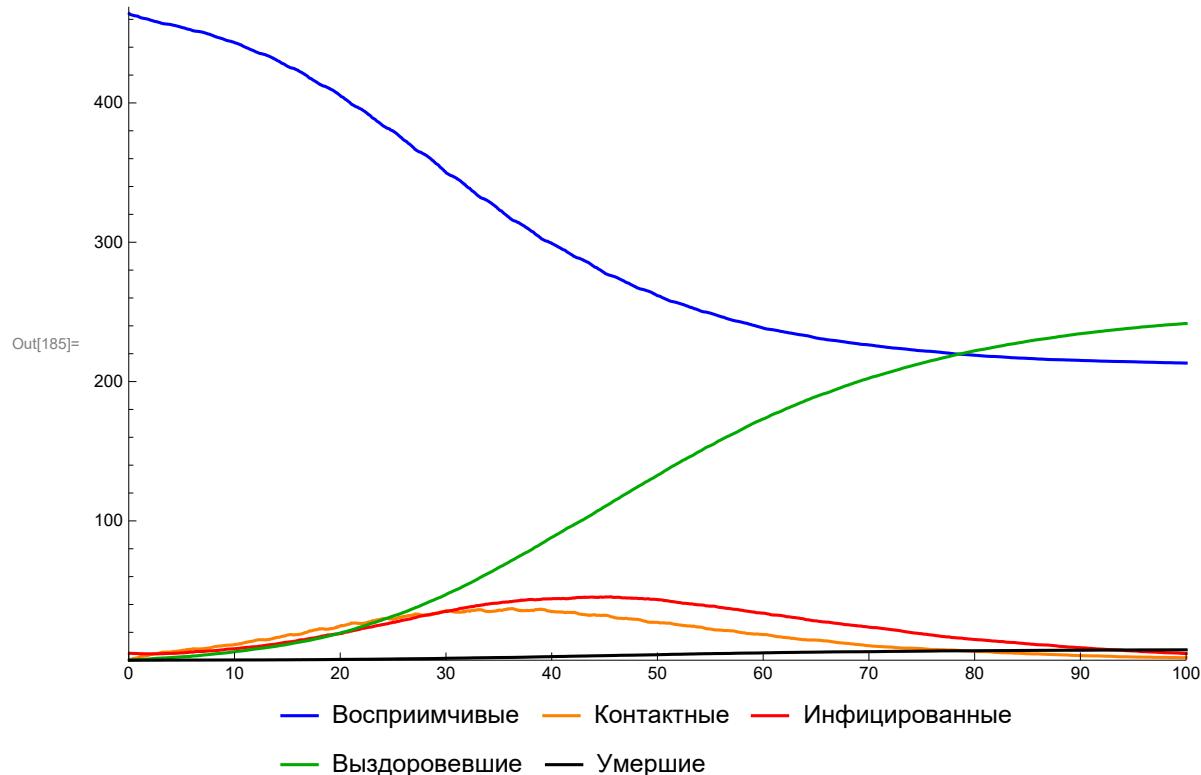
```
In[178]:= DA2[ar1_, ar2_, n1_, n2_] :=
Table[If[i < n1, ar1[[Mod[i, Length[ar1]] + 1]], ar2[[Mod[i, Length[ar2]] + 1]]], {i, 0, n1 + n2 - 1}]
```

Социальная дистанция - 1 метр, время ввода меры - с первого дня.

```
In[184]:= seird1hn5msd1m=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5msd1m.m"}]];
(*seird1hn5msd1m=SEIRDmod[DA[up1h5msd1m[[1]],16 100],
DA[up1h5msd1m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

```
In[185]:= SEIRDplot[seird1hn5msd1m, 16, 10]
```



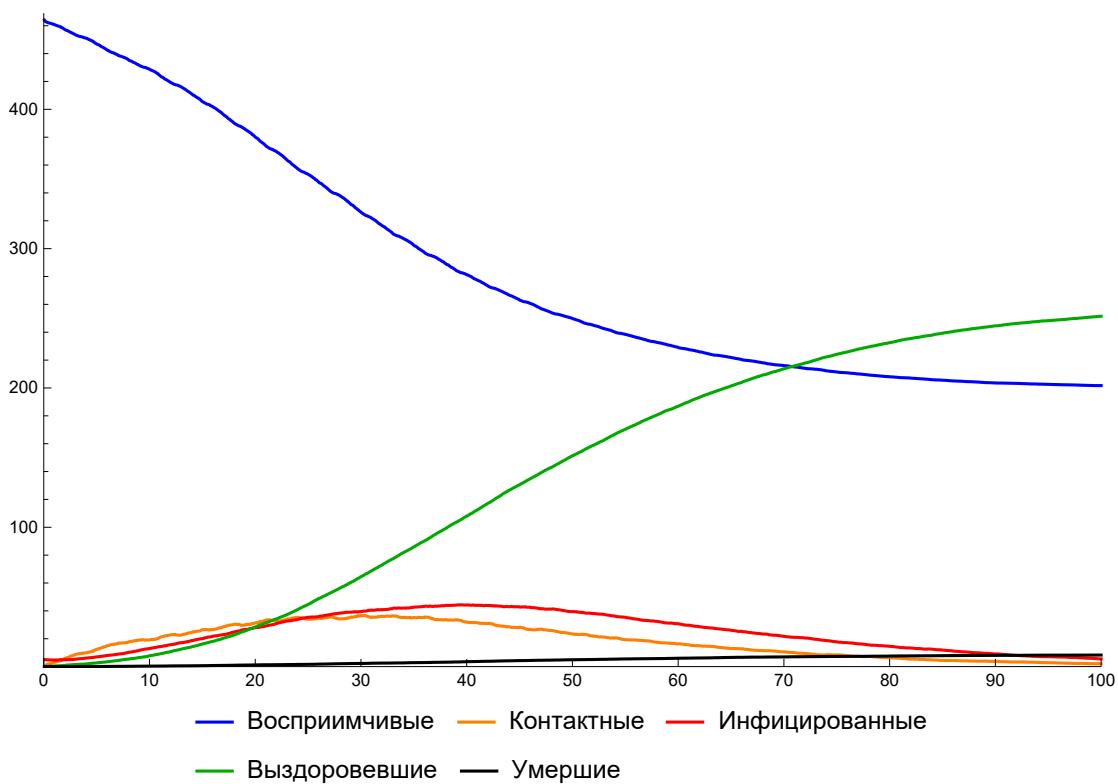
Социальная дистанция - 1 метр, время ввода меры - через неделю от начала.

```
In[186]:= seird1hn5msd1m7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5msd1m7d.m"}]];
(*seird1hn5msd1m7d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5msd1m[[1]],16 7,16 93],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5msd1m[[2]],16 7,16 93],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[187]:= SEIRDplot[seird1hn5msd1m7d, 16, 10]

Out[187]=

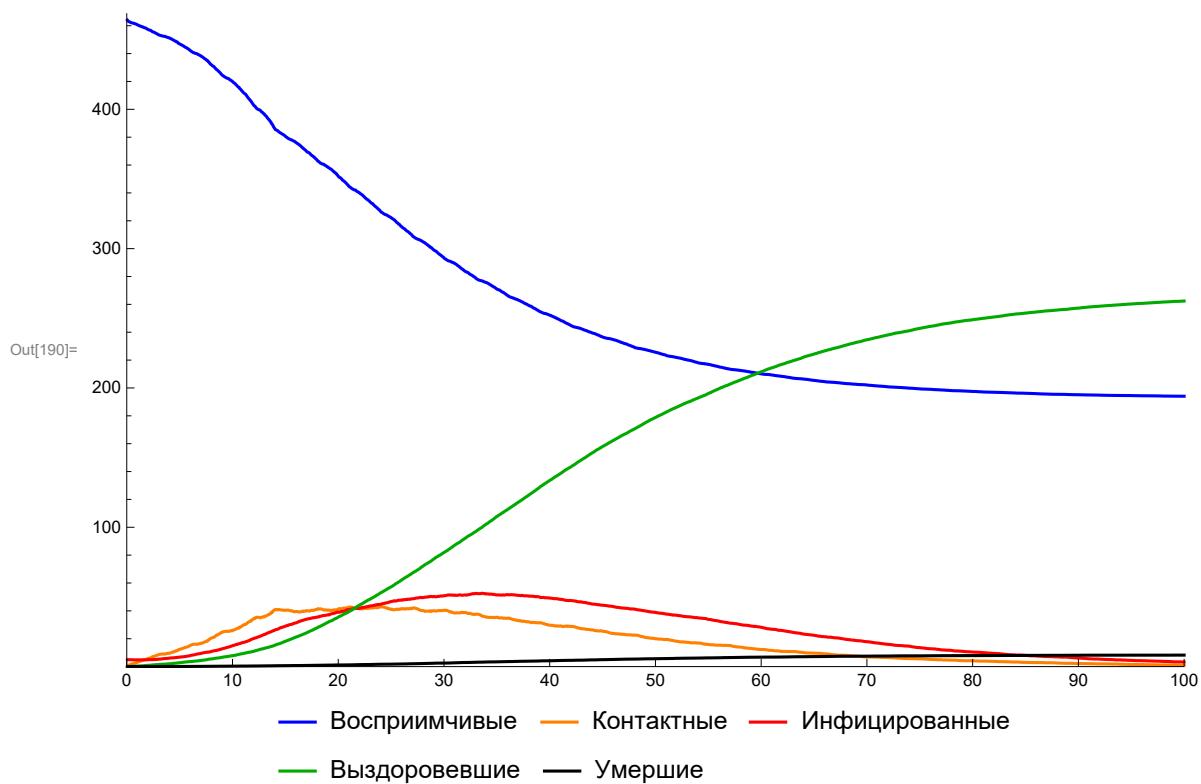


Социальная дистанция - 1 метр, время ввода меры - через две недели от начала.

In[189]:= seird1hn5msd1m14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5msd1m14d.m"}]]; (*seird1hn5msd1m14d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5msd1m[[1]],16 14,16 86], DA2[up1h5m[[2]],up1h5msd1m[[2]],16 14,16 86],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)

График

In[190]:= SEIRDplot[seird1hn5msd1m14d, 16, 10]



Социальная дистанция - 1 метр, время ввода меры - через три недели от начала.

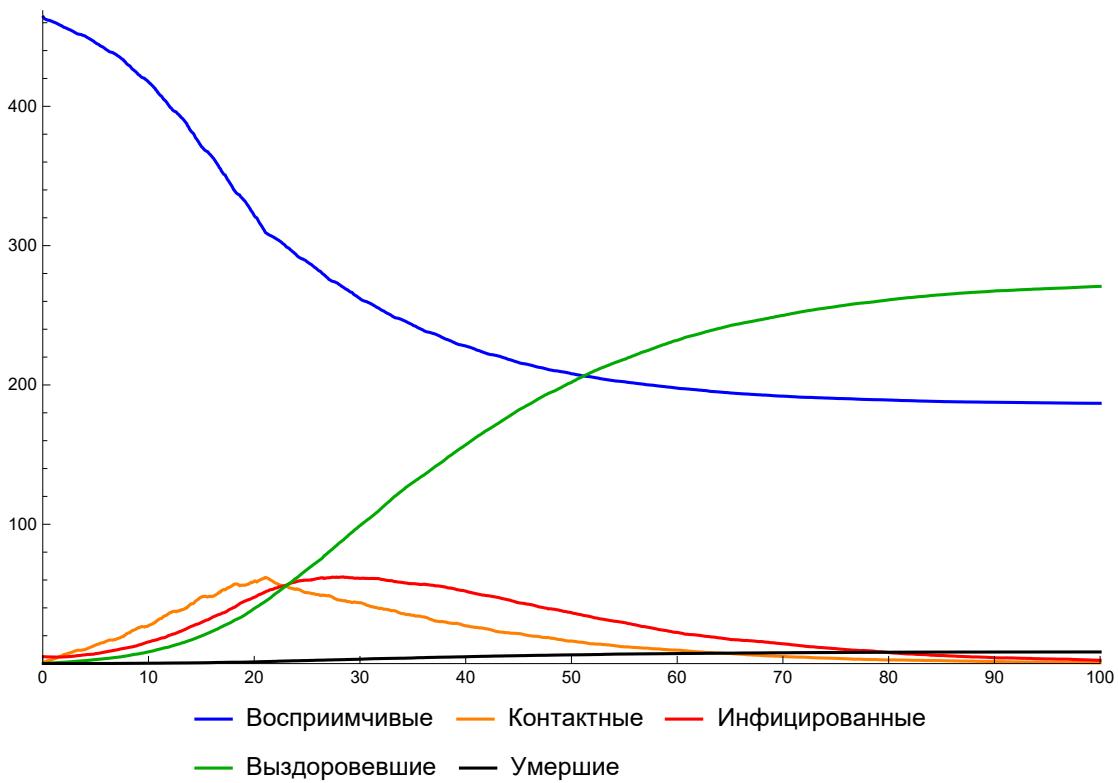
In[191]:= seird1hn5msd1m21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5msd1m21d.m"}]];(*seird1hn5msd1m21d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5msd1m[[1]],16 21,16 79], DA2[up1h5m[[2]],up1h5msd1m[[2]],16 21,16 79],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)

График

In[192]:=

SEIRDplot[seird1hn5msd1m21d, 16, 10]

Out[192]=

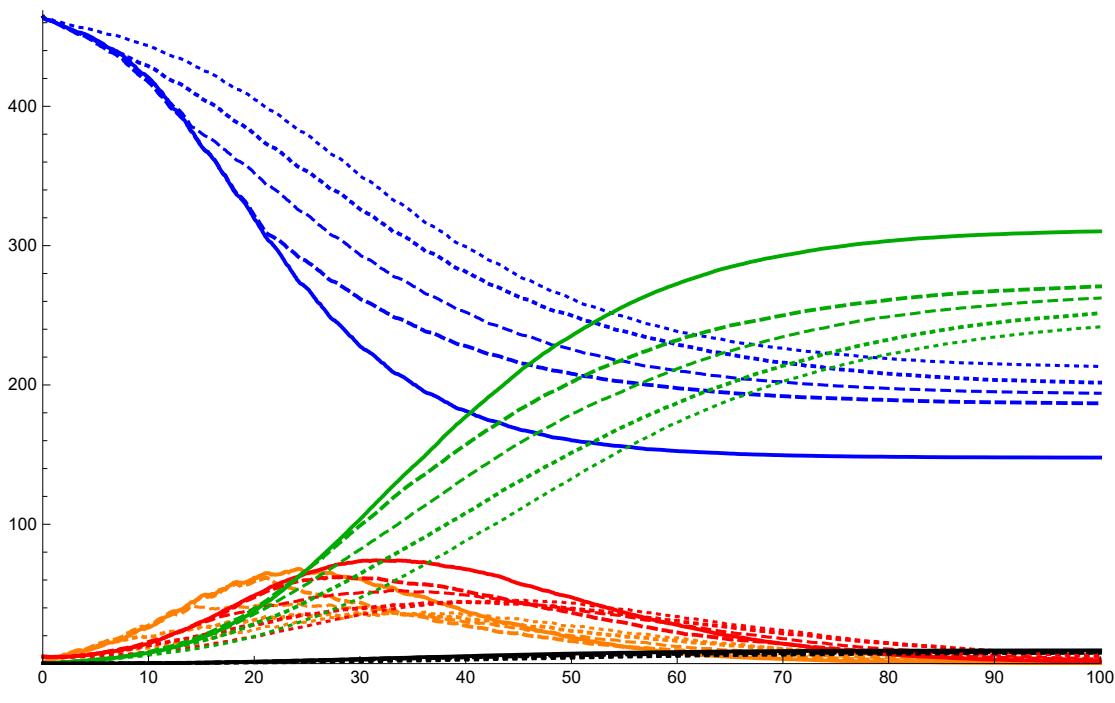


Наложение графиков

In[248]:=

```
SEIRDplotsum[seird1hn5msd1m, seird1hn5msd1m7d, seird1hn5msd1m14d, seird1hn5msd1m21d, seird1hn5m, 16, 10]
```

Out[248]=



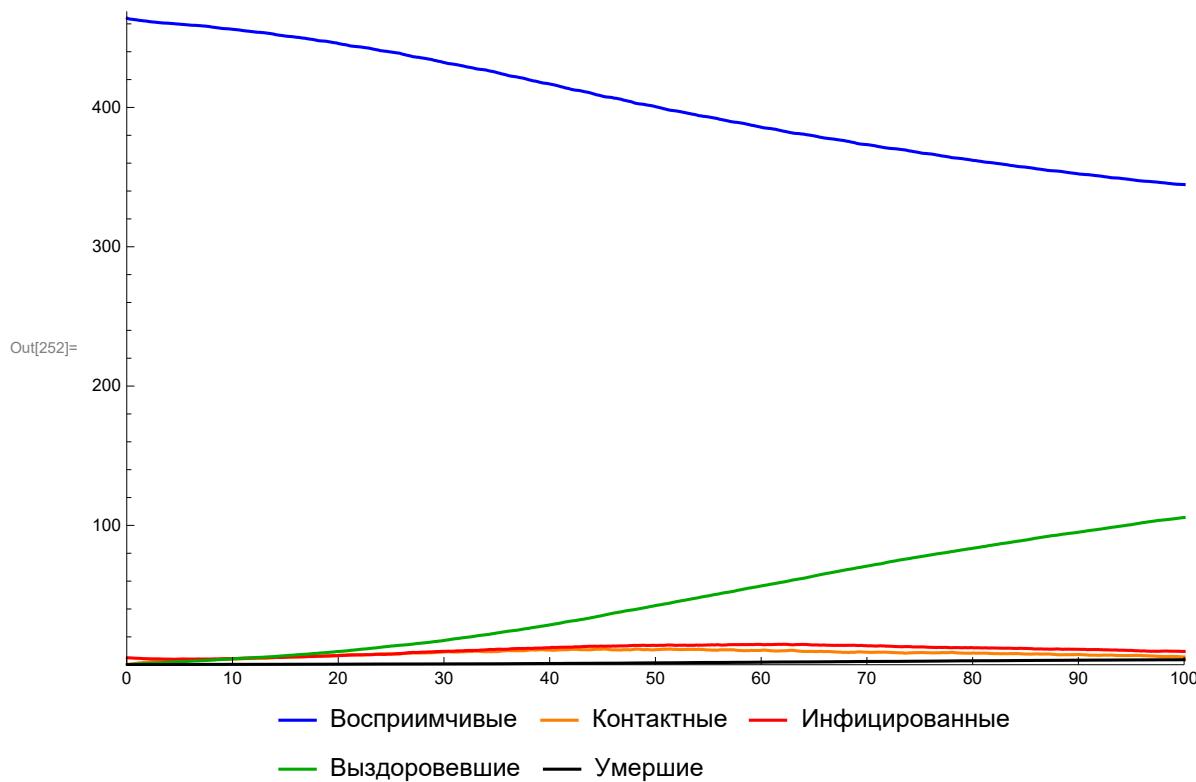
- Восприимчивые, время ввода меры – с первого дня
- Восприимчивые, время ввода меры – через неделю от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- . Контактные, время ввода меры – с первого дня
- . Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- . Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- . Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- . Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- . Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- . Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- . Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- . Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- . Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- . Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- . Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- . Умершие, время ввода меры – с первого дня
- . Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- . Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- . Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

Социальная дистанция - 2 метра, время ввода меры - с первого дня.

```
In[251]:= seird1hn5msd2m=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5msd2m.m"}]];
(*seird1hn5msd2m=SEIRDmod[DA[up1h5msd2m[[1]],16 100],
DA[up1h5msd2m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)
```

График

```
In[252]:= SEIRDplot[seird1hn5msd2m,16,10]
```



Социальная дистанция - 2 метра, время ввода меры - через неделю от начала.

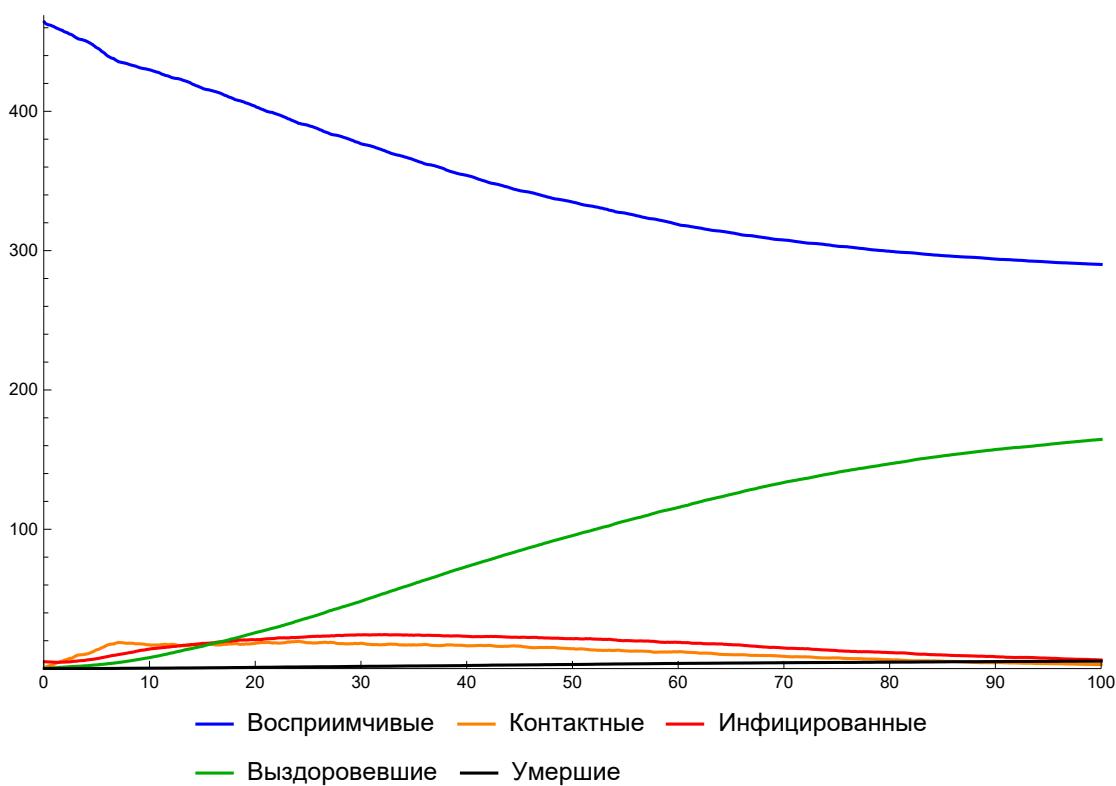
```
In[201]:= seird1hn5msd2m7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5msd2m7d.m"}]];
(*seird1hn5msd2m7d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5msd2m[[1]],16 7,16 93],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5msd2m[[2]],16 7,16 93],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)
```

График

In[202]:=

SEIRDplot[seird1hn5msd2m7d, 16, 10]

Out[202]=



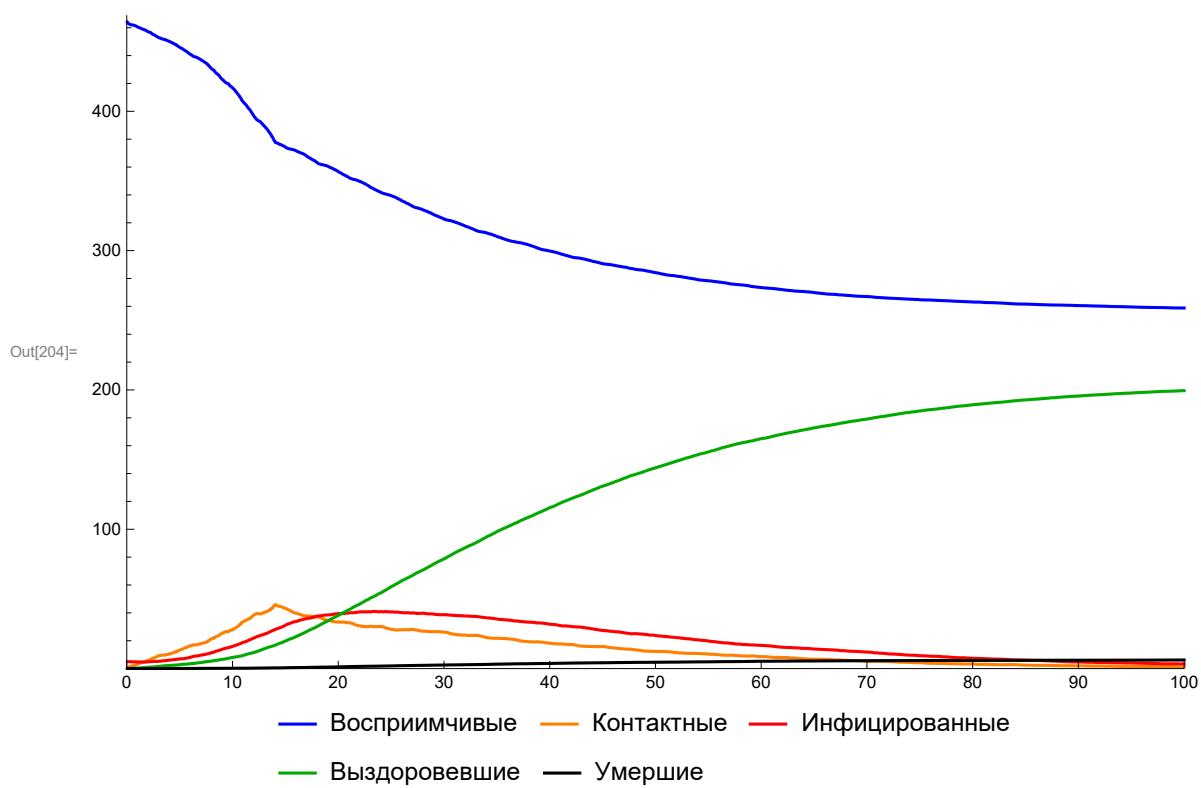
Социальная дистанция - 2 метра, время ввода меры - через две недели от начала.

In[203]:=

```
seird1hn5msd2m14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5msd2m14d.m"}]];
(*seird1hn5msd2m14d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5msd2m[[1]],16 14,16 86],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5msd2m[[2]],16 14,16 86],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[204]:= SEIRDplot[seird1hn5msd2m14d, 16, 10]



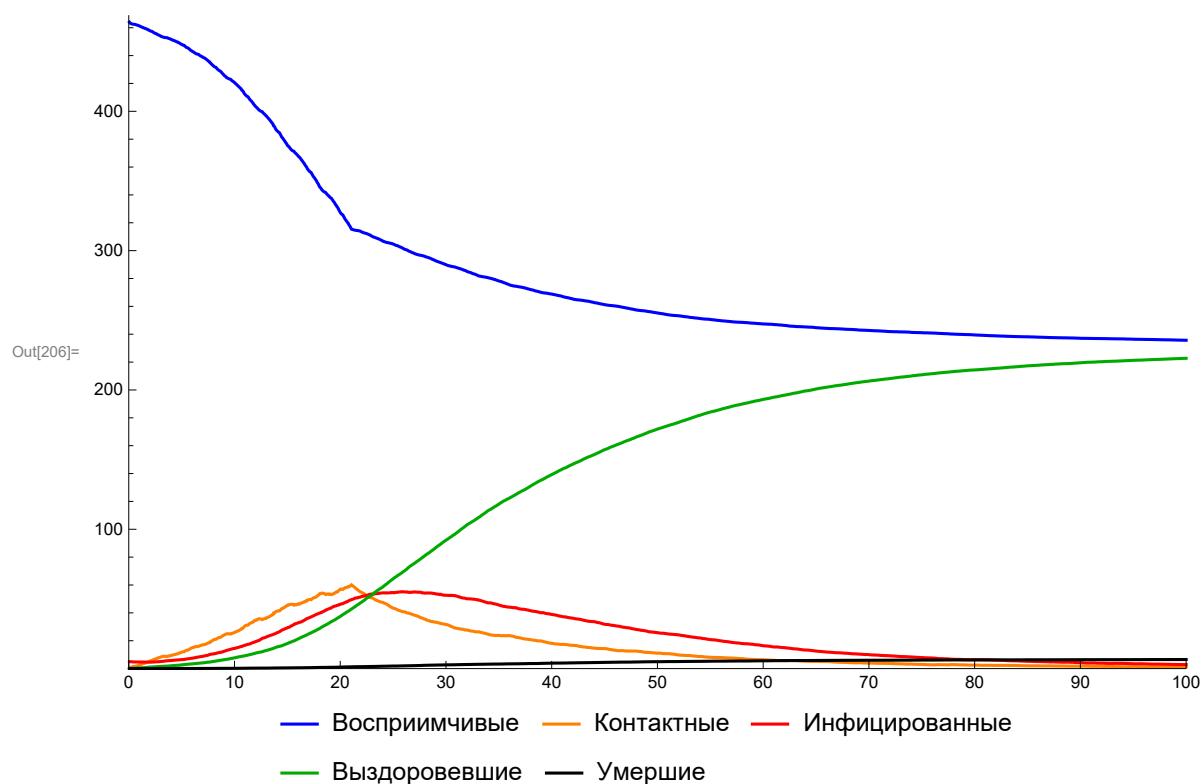
Социальная дистанция - 2 метра, время ввода меры - через три недели от начала.

In[205]:= seird1hn5msd2m21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5msd2m21d.m"}]];(*seird1hn5msd2m21d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5msd2m[[1]],16 21,16 79], DA2[up1h5m[[2]],up1h5msd2m[[2]],16 21,16 79],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)

График

In[206]:=

SEIRDplot[seird1hn5msd2m21d, 16, 10]

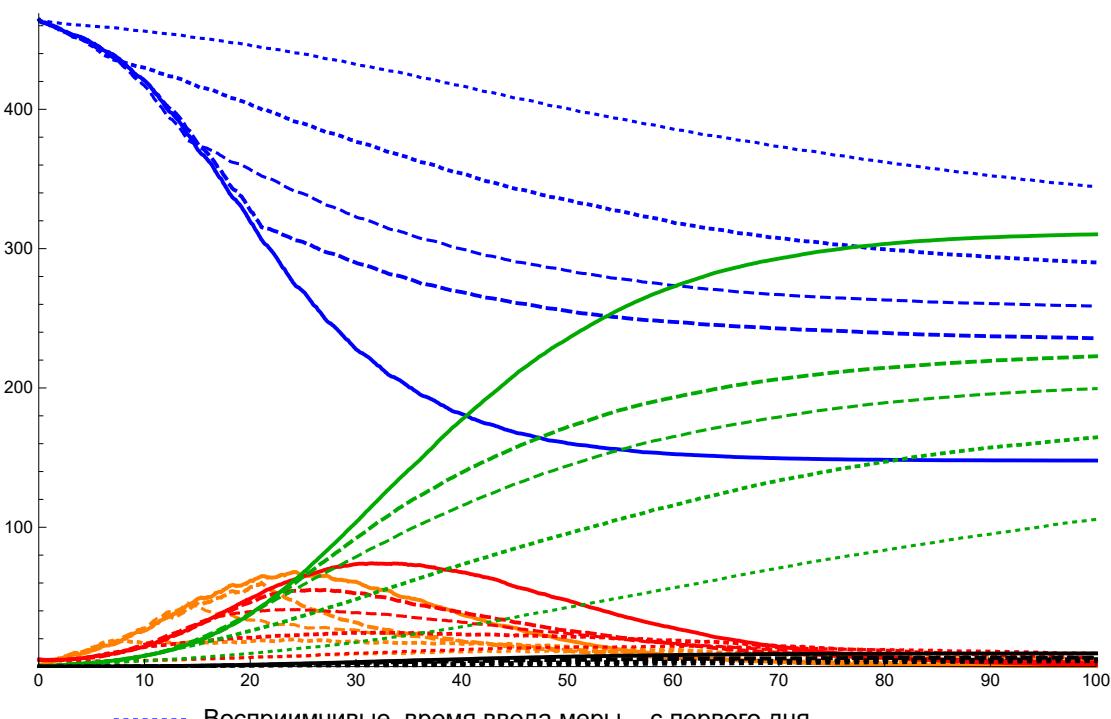


Наложение графиков

In[253]:=

```
SEIRDplotsum[seird1hn5msd2m, seird1hn5msd2m7d, seird1hn5msd2m14d, seird1hn5msd2m21d, seird1hn5m, 16, 10]
```

Out[253]=



- Восприимчивые, время ввода меры – с первого дня
- Восприимчивые, время ввода меры – через неделю от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

<ТЕКСТ ПРО ВЫВОДЫ>

Ношение масок

Рассмотрим теперь такую меру защиты как ношение масок. Эффективность этого типа защиты зависит от двух параметров: процент людей, которые носят маски и процент частиц вируса, которые она блокирует. Рассмотрим случаи, при которых ношение масок уменьшает вероятность заражения на 20, 40, 60, 80 процентов.

Ношение масок снижает вероятность заражения на 20%.

```
In[208]:= up1h5mwm20p=NetUnion[edgelist5m,0.8 w5m,1,Length[KDS2],12];
```

Ношение масок снижает вероятность заражения на 40%.

```
In[209]:= up1h5mwm40p=NetUnion[edgelist5m,0.6 w5m,1,Length[KDS2],12];
```

Ношение масок снижает вероятность заражения на 60%.

```
In[210]:= up1h5mwm60p=NetUnion[edgelist5m,0.4 w5m,1,Length[KDS2],12];
```

Ношение масок снижает вероятность заражения на 80%.

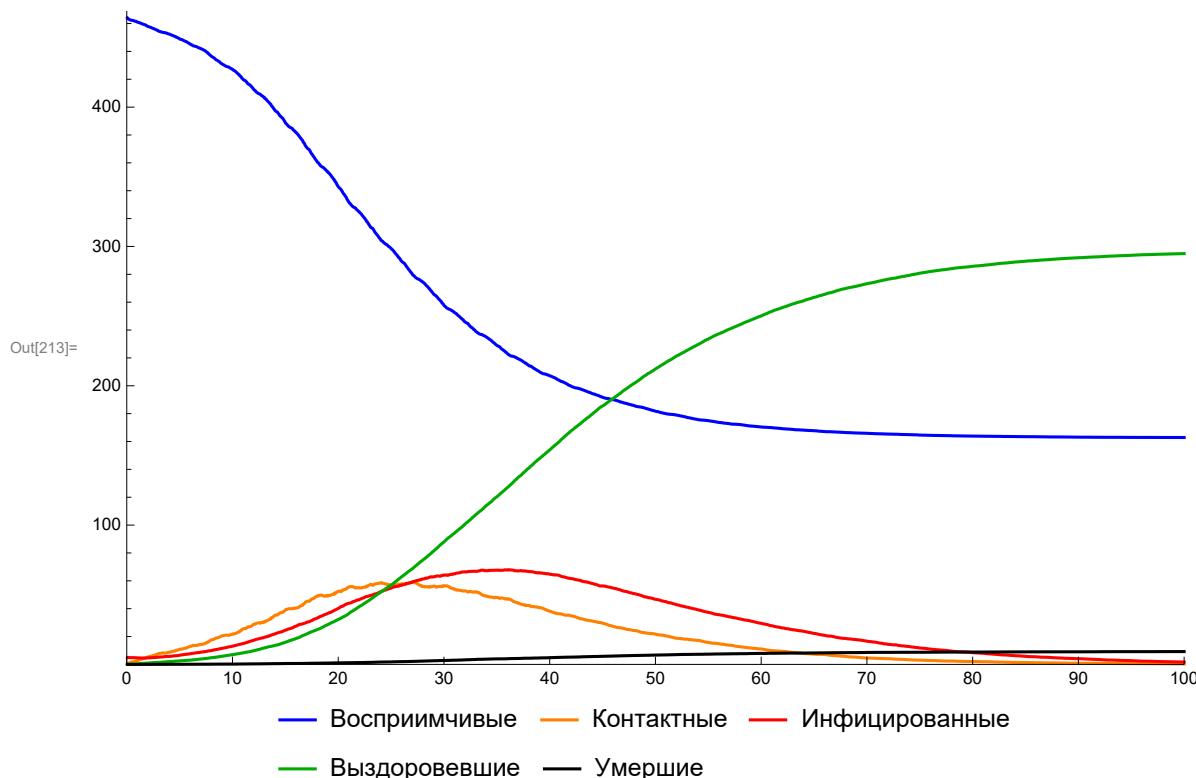
```
In[211]:= up1h5mwm80p=NetUnion[edgelist5m,0.2 w5m,1,Length[KDS2],12];
```

Ношение масок снижает вероятность заражения на 20%, время ввода меры - с первого дня.

```
seird1hn5mwm20p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm20p.m"}]];
(*seird1hn5mwm20p=SEIRDmod[DA[up1h5mwm20p[[1]],16 100],
DA[up1h5mwm20p[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Epsilon]1h,0.03,100];*)
```

График

```
In[213]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm20p,16,10]
```

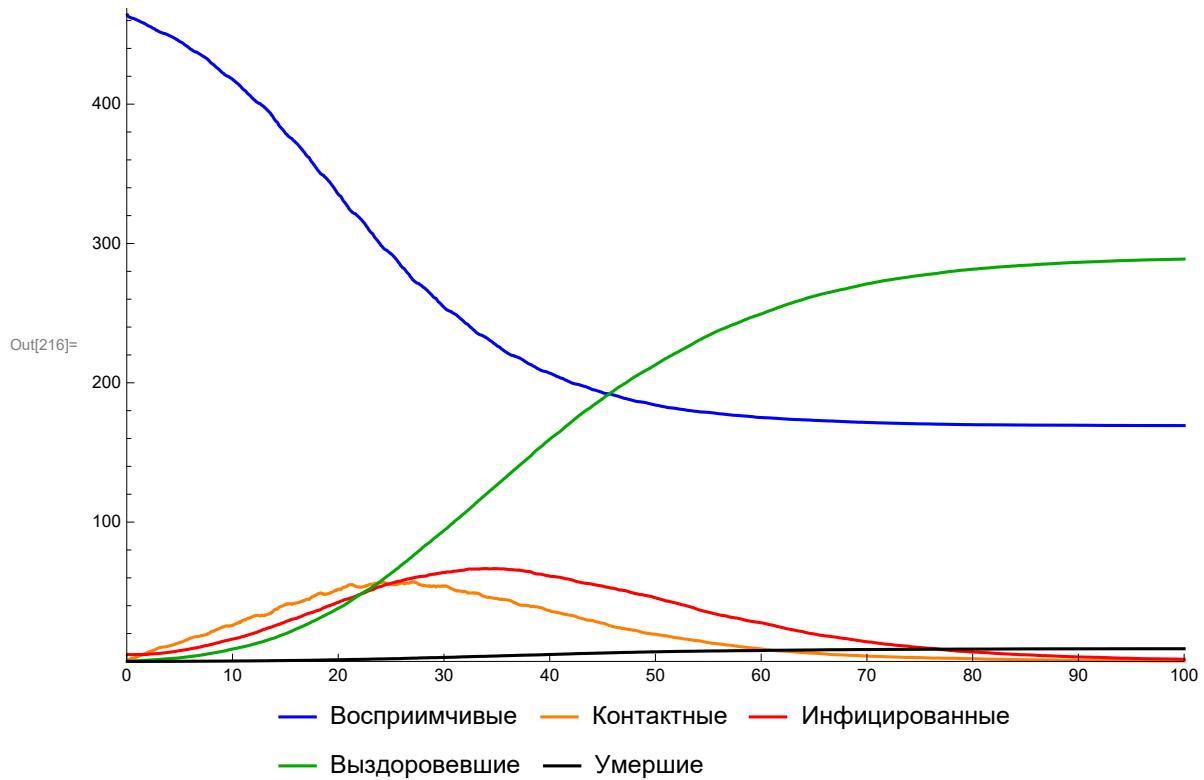


Ношение масок снижает вероятность заражения на 20%, время ввода меры - через неделю от начала.

```
In[215]:= seird1hn5mwm20p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm20p7d.m"}]];
(*seird1hn5mwm20p7d=SEIRDmod[DA2[[up1h5m[[1]],up1h5mwm20p[[1]],16 7,16 93],
DA2[[up1h5m[[2]],up1h5mwm20p[[2]],16 7,16 93],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100]];*)
```

График

```
In[216]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm20p7d,16,10]
```



Ношение масок снижает вероятность заражения на 20%, время ввода меры - через две недели от начала.

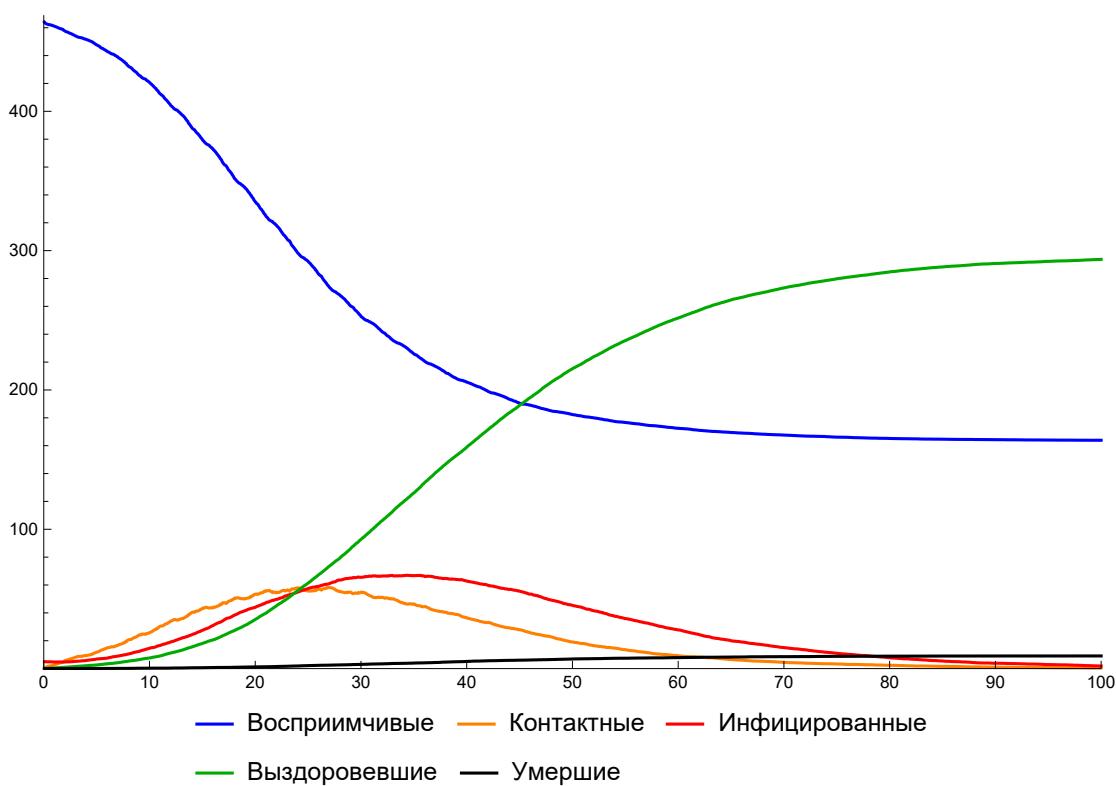
```
In[217]:= seird1hn5mwm20p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm20p14d.m"}];
(*seird1hn5mwm20p14d=SEIRDmod[DA2[[up1h5m[[1]],up1h5mwm20p[[1]],16 14,16 86],
DA2[[up1h5m[[2]],up1h5mwm20p[[2]],16 14,16 86],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100]];*)
```

График

In[218]:=

SEIRDplot[seird1hn5mwm20p14d, 16, 10]

Out[218]=



Ношение масок снижает вероятность заражения на 20%, время ввода меры - через три недели от начала.

In[219]:=

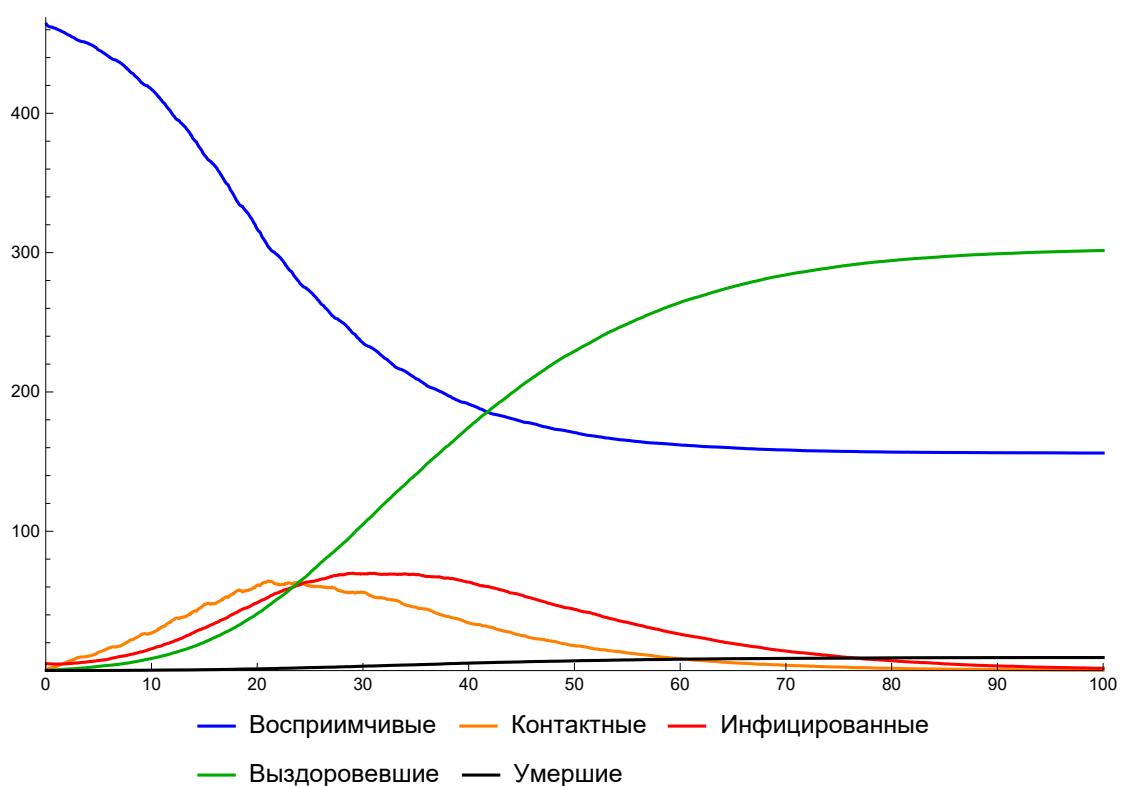
```
seird1hn5mwm20p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm20p21d.m"}]];
(*seird1hn5mwm20p21d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm20p[[1]],16 21,16 79],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm20p[[2]],16 21,16 79],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[220]:=

SEIRDplot[seird1hn5mwm20p21d, 16, 10]

Out[220]=

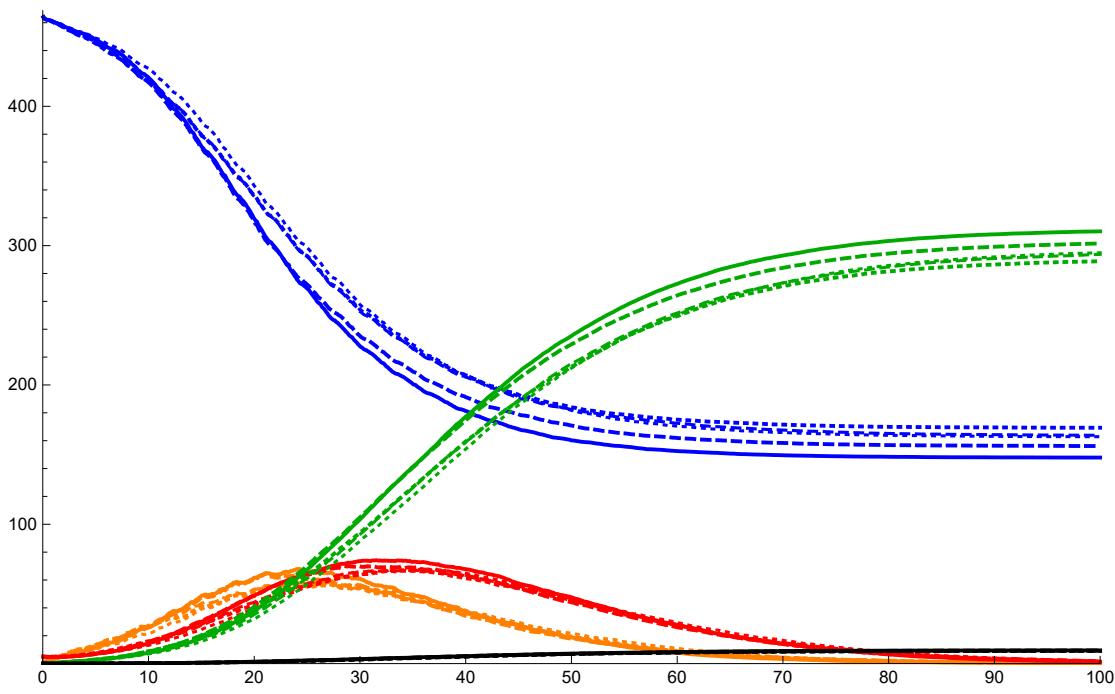


Наложение графиков

In[249]:=

```
SEIRDplotsum[seird1hn5mwm20p, seird1hn5mwm20p7d, seird1hn5mwm20p14d, seird1hn5mwm20p21d, seird1hn5m, 16, 10]
```

Out[249]=



- Восприимчивые, время ввода меры – с первого дня
- Восприимчивые, время ввода меры – через неделю от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

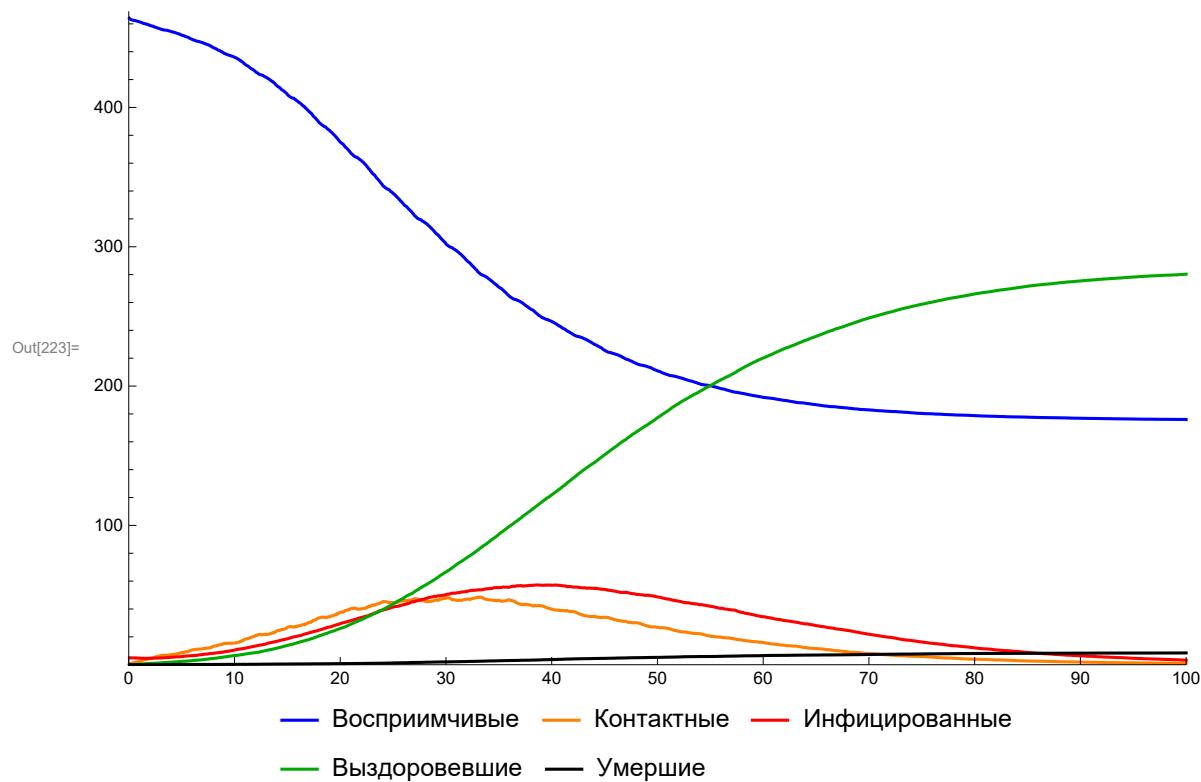
Ношение масок снижает вероятность заражения на 40%, время ввода меры - с первого дня.

```
In[250]:= seird1hn5mwm40p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5mwm40p.m"}]];
(*seird1hn5mwm40p=SEIRDmod[DA[up1h5mwm40p[[1]],16 100],
DA[up1h5mwm40p[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)


```

График

```
In[223]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm40p,16,10]
```

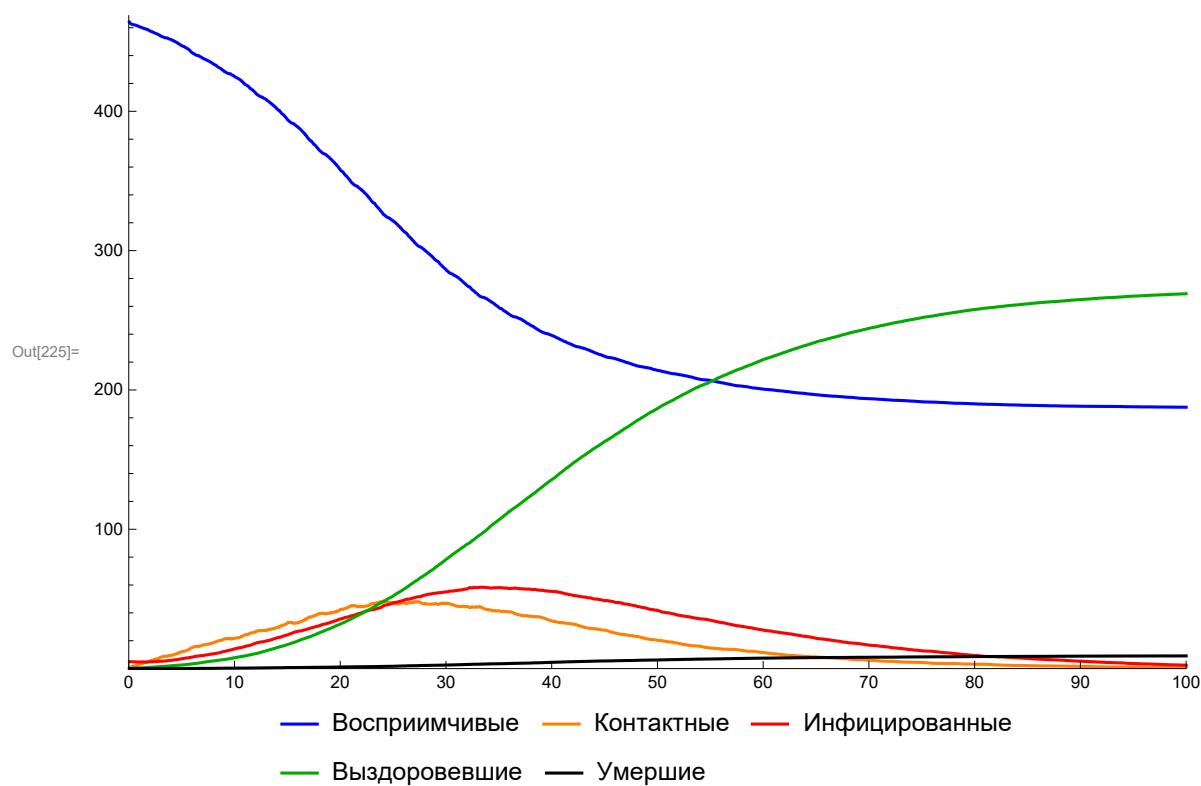


Ношение масок снижает вероятность заражения на 40%, время ввода меры - через неделю от начала.

```
In[224]:= seird1hn5mwm40p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5mwm40p7d.m"}];
(*seird1hn5mwm40p7d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm40p[[1]],16 7,16 93],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm40p[[2]],16 7,16 93],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[225]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm40p7d, 16, 10]

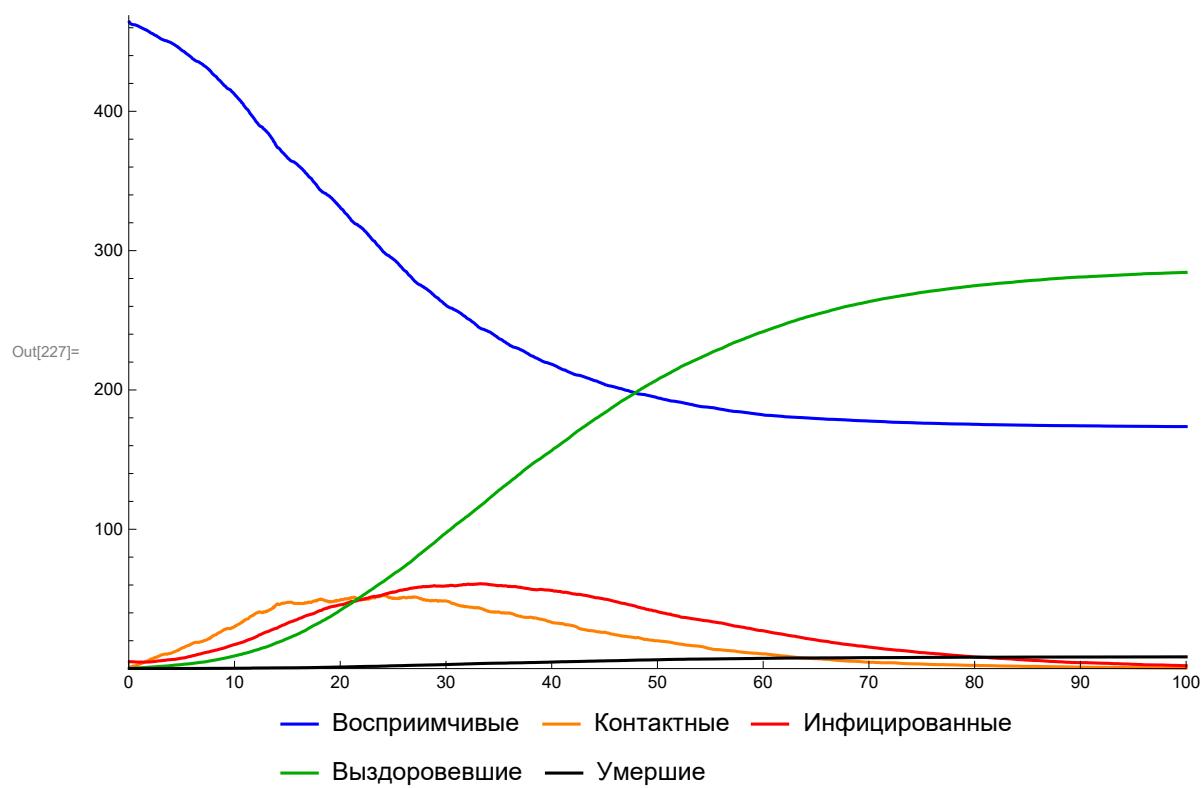


Ношение масок снижает вероятность заражения на 40%, время ввода меры - через две недели от начала.

In[226]:= seird1hn5mwm40p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm40p14d.m"}]];(*seird1hn5mwm40p14d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm40p[[1]],16 14,16 86], DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm40p[[2]],16 14,16 86],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)

График

In[227]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm40p14d, 16, 10]



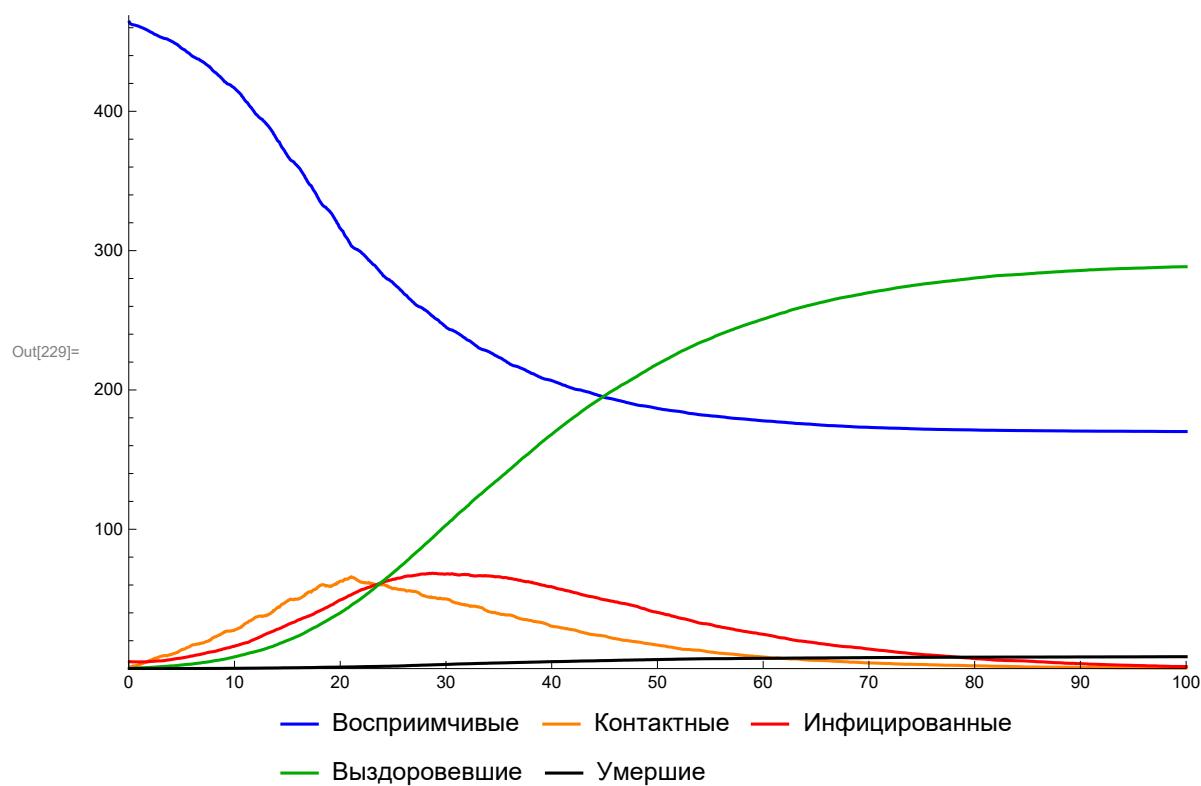
Ношение масок снижает вероятность заражения на 40%, время ввода меры - через три недели от начала.

In[228]:= seird1hn5mwm40p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm40p21d.m"}]];(*seird1hn5mwm40p21d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm40p[[1]],16 21,16 79], DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm40p[[2]],16 21,16 79],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)

График

In[229]:=

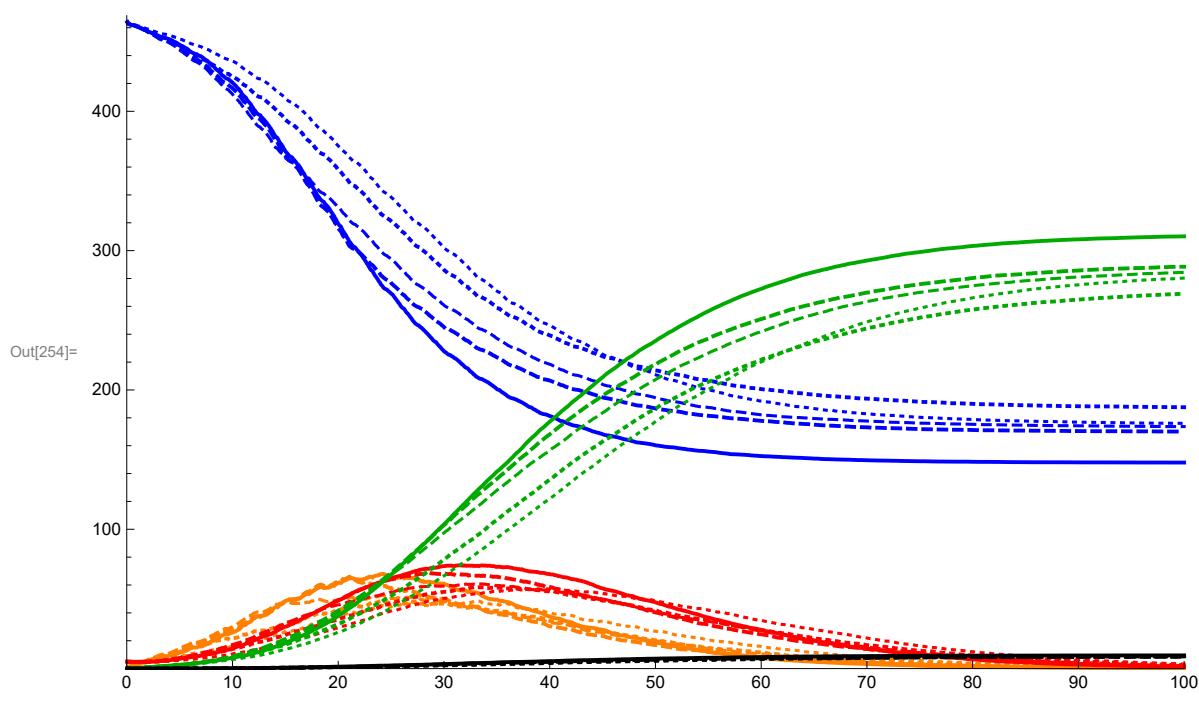
SEIRDplot[seird1hn5mwm40p21d, 16, 10]



Наложение графиков

In[254]:=

```
SEIRDplotsum[seird1hn5mwm40p, seird1hn5mwm40p7d, seird1hn5mwm40p14d, seird1hn5mwm40p21d, seird1hn5m, 16, 10]
```



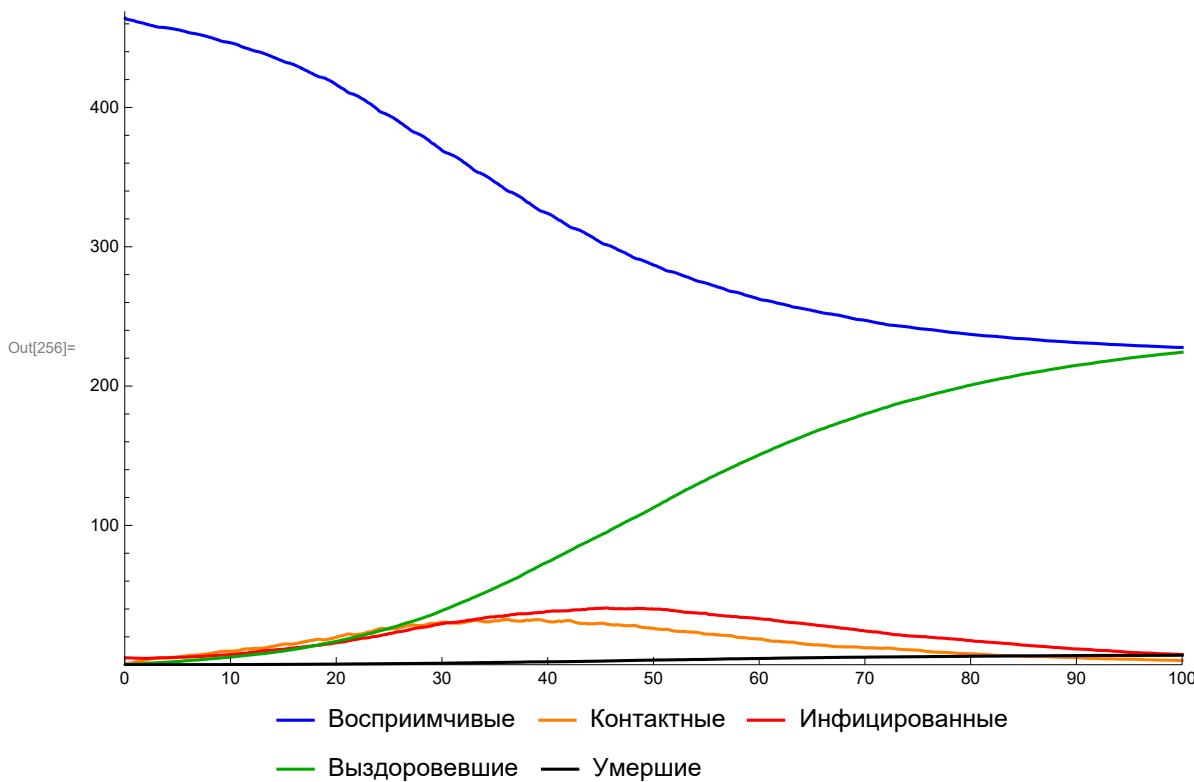
- Восприимчивые, время ввода меры – с первого дня
- Восприимчивые, время ввода меры – через неделю от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

Ношение масок снижает вероятность заражения на 60%, время ввода меры - с первого дня.

```
In[255]:= seird1hn5mwm60p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5mwm60p.m"}]];
(*seird1hn5mwm60p=SEIRDmod[DA[up1h5mwm60p[[1]],16 100],
DA[up1h5mwm60p[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

```
In[256]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm60p,16,10]
```

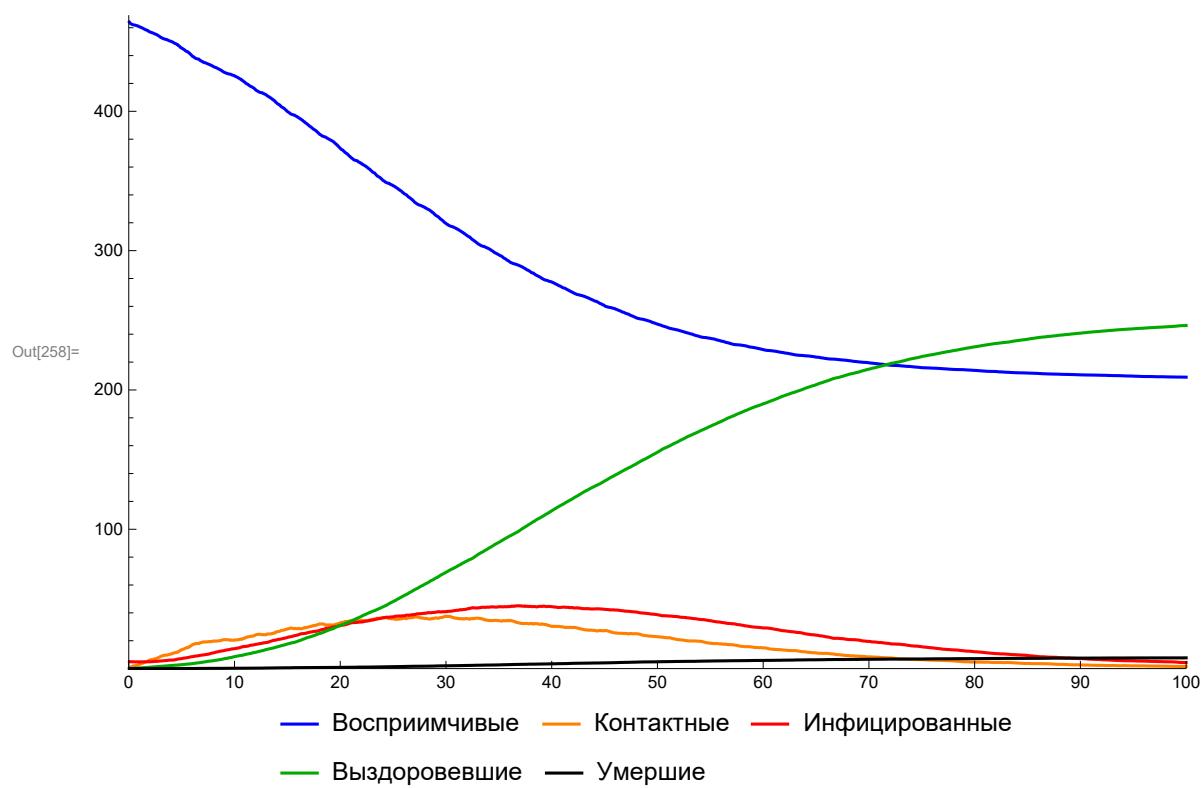


Ношение масок снижает вероятность заражения на 60%, время ввода меры - через неделю от начала.

```
In[257]:= seird1hn5mwm60p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5mwm60p7d.m"}];
(*seird1hn5mwm60p7d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm60p[[1]],16 7,16 93],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm60p[[2]],16 7,16 93],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[258]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm60p7d, 16, 10]



Ношение масок снижает вероятность заражения на 60%, время ввода меры - через две недели от начала.

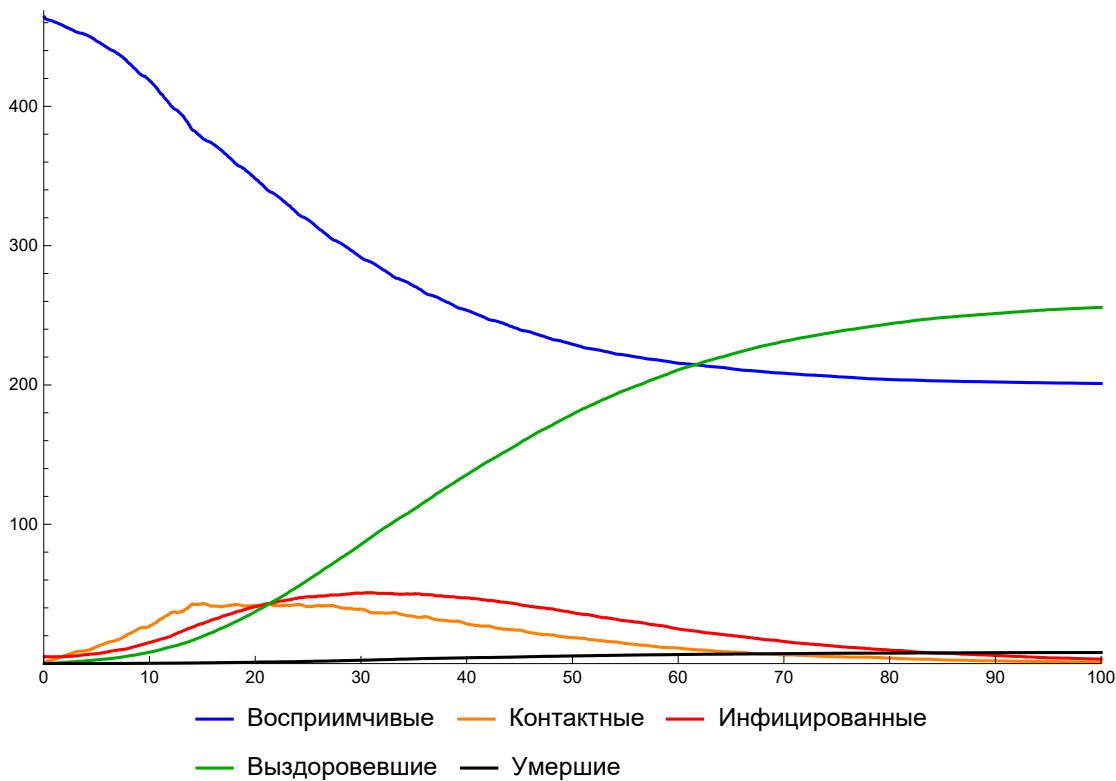
In[259]:= seird1hn5mwm60p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm60p14d.m"}]];(*seird1hn5mwm60p14d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm60p[[1]],16 14,16 86], DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm60p[[2]],16 14,16 86],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)

График

In[260]:=

SEIRDplot[seird1hn5mwm60p14d, 16, 10]

Out[260]=



Ношение масок снижает вероятность заражения на 60%, время ввода меры - через две три от начала.

In[261]:=

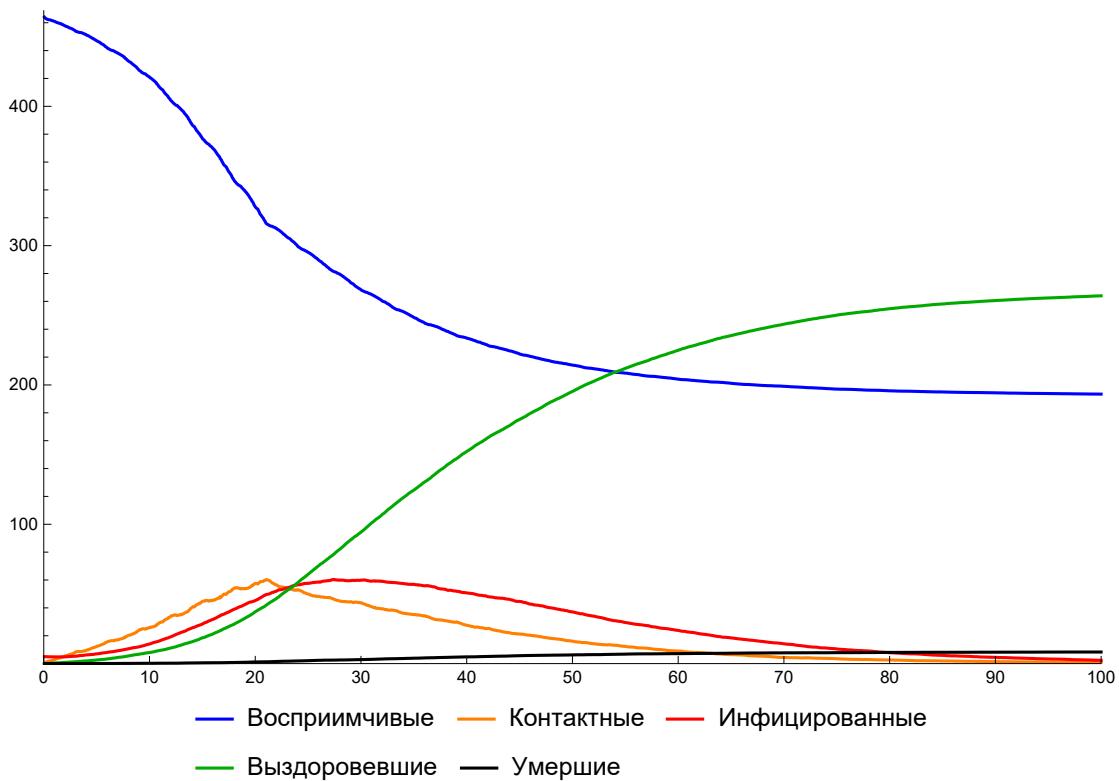
```
seird1hn5mwm60p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm60p21d.m"}]];
(*seird1hn5mwm60p21d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm60p[[1]],16 21,16 79],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm60p[[2]],16 21,16 79],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[262]:=

SEIRDplot[seird1hn5mwm60p21d, 16, 10]

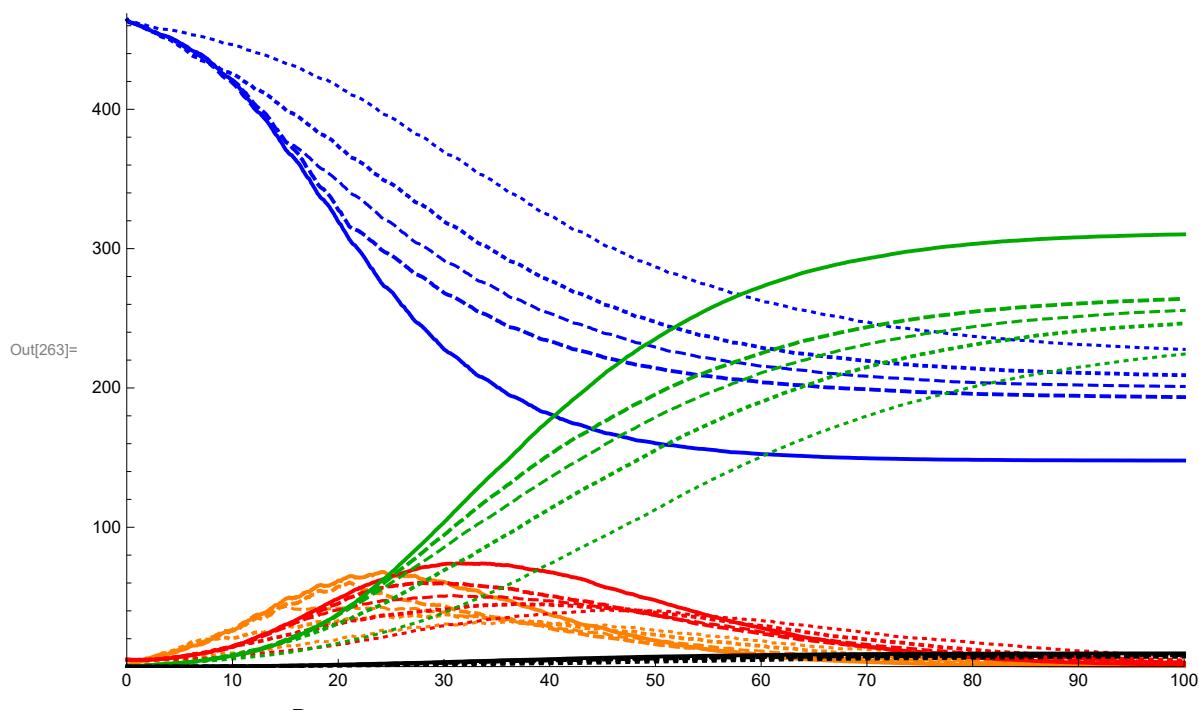
Out[262]=



Наложение графиков

In[263]:=

```
SEIRDplotsum[seird1hn5mwm60p, seird1hn5mwm60p7d, seird1hn5mwm60p14d, seird1hn5mwm60p21d, seird1hn5m, 16, 10]
```



- Восприимчивые, время ввода меры – с первого дня
- Восприимчивые, время ввода меры – через неделю от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

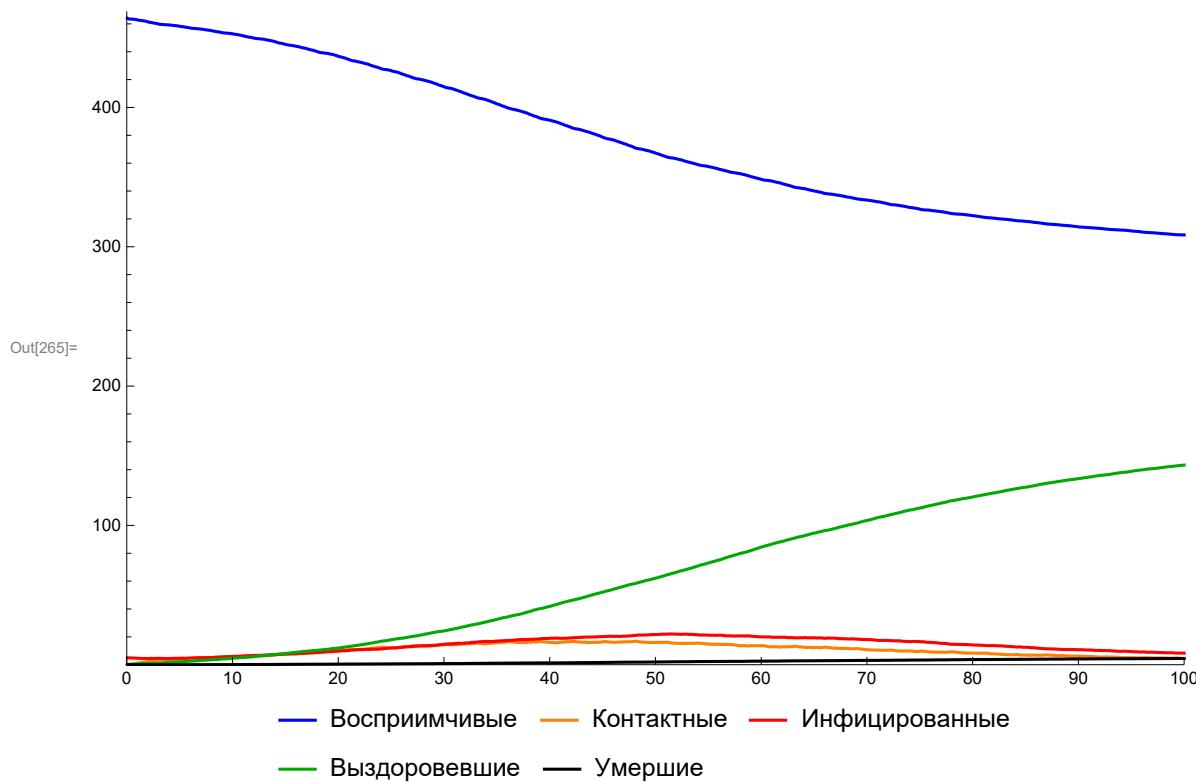
Ношение масок снижает вероятность заражения на 80%, время ввода меры - с первого дня.

```
In[264]:= seird1hn5mwm80p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5mwm80p.m"}]];
(*seird1hn5mwm80p=SEIRDmod[DA[up1h5mwm80p[[1]],16 100],
DA[up1h5mwm80p[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)


```

График

```
In[265]:= SEIRDplot[seird1hn5mwm80p,16,10]
```



Ношение масок снижает вероятность заражения на 80%, время ввода меры - через неделю от начала.

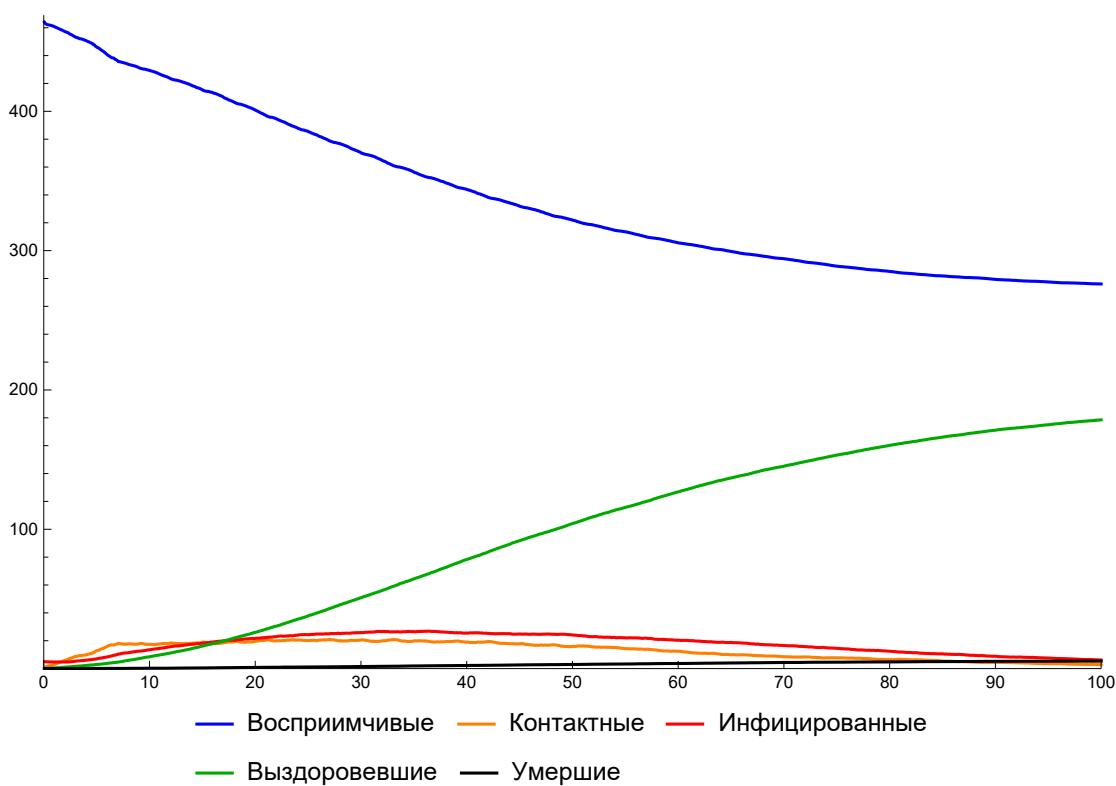
```
In[266]:= seird1hn5mwm80p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seird1hn5mwm80p7d.m"}];
(*seird1hn5mwm80p7d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm80p[[1]],16 7,16 93],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm80p[[2]],16 7,16 93],vertexcount,5,1,\epsilon1h,\gamma1h,0.03,100];*)
```

График

In[267]:=

SEIRDplot[seird1hn5mwm80p7d, 16, 10]

Out[267]=



Ношение масок снижает вероятность заражения на 80%, время ввода меры - через две недели от начала.

In[268]:=

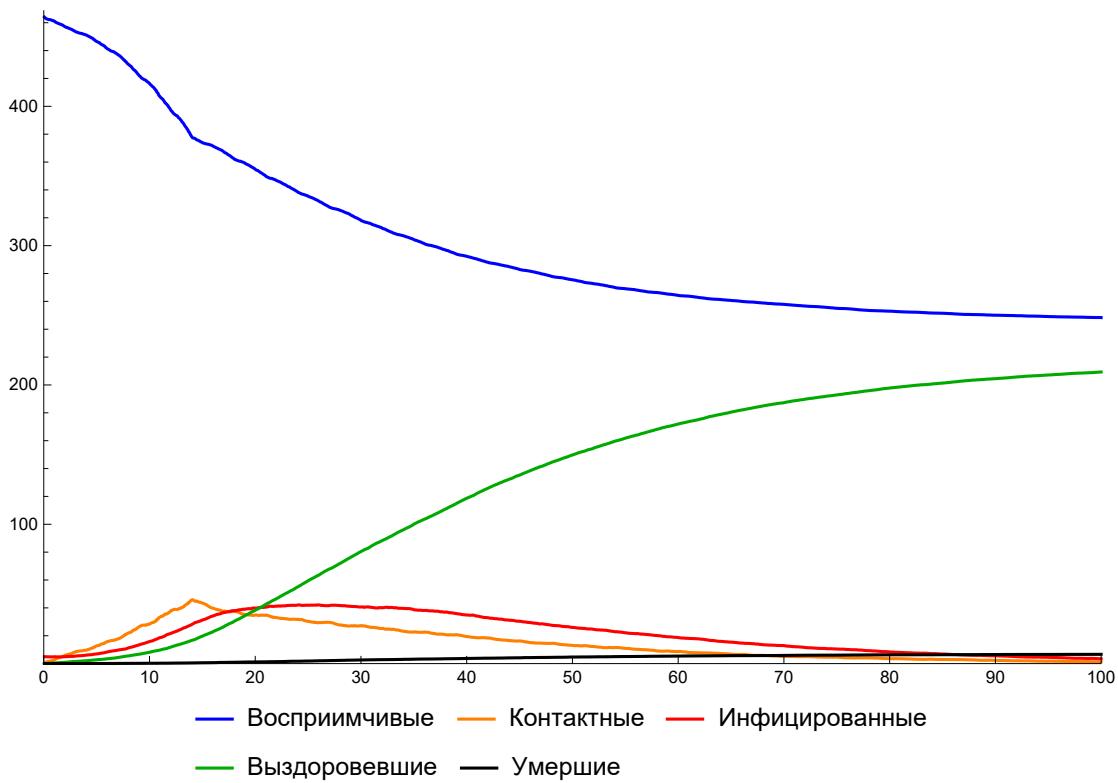
```
seird1hn5mwm80p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm80p14d.m"}]];
(*seird1hn5mwm80p14d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm80p[[1]],16 14,16 86],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm80p[[2]],16 14,16 86],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[269]:=

SEIRDplot[seird1hn5mwm80p14d, 16, 10]

Out[269]=



Ношение масок снижает вероятность заражения на 80%, время ввода меры - через три недели от начала.

In[270]:=

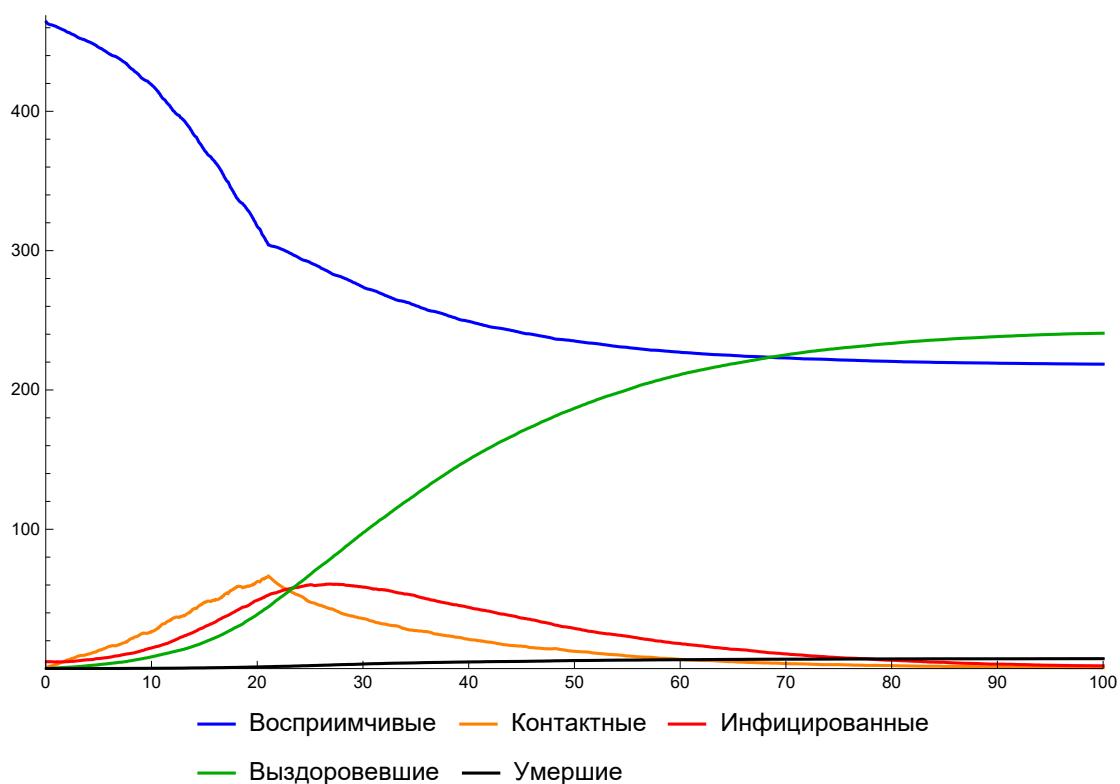
```
seird1hn5mwm80p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seird1hn5mwm80p21d.m"}]];
(*seird1hn5mwm80p21d=SEIRDmod[DA2[up1h5m[[1]],up1h5mwm80p[[1]],16 21,16 79],
DA2[up1h5m[[2]],up1h5mwm80p[[2]],16 21,16 79],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,100];*)
```

График

In[271]:=

SEIRDplot[seird1hn5mwm80p21d, 16, 10]

Out[271]=

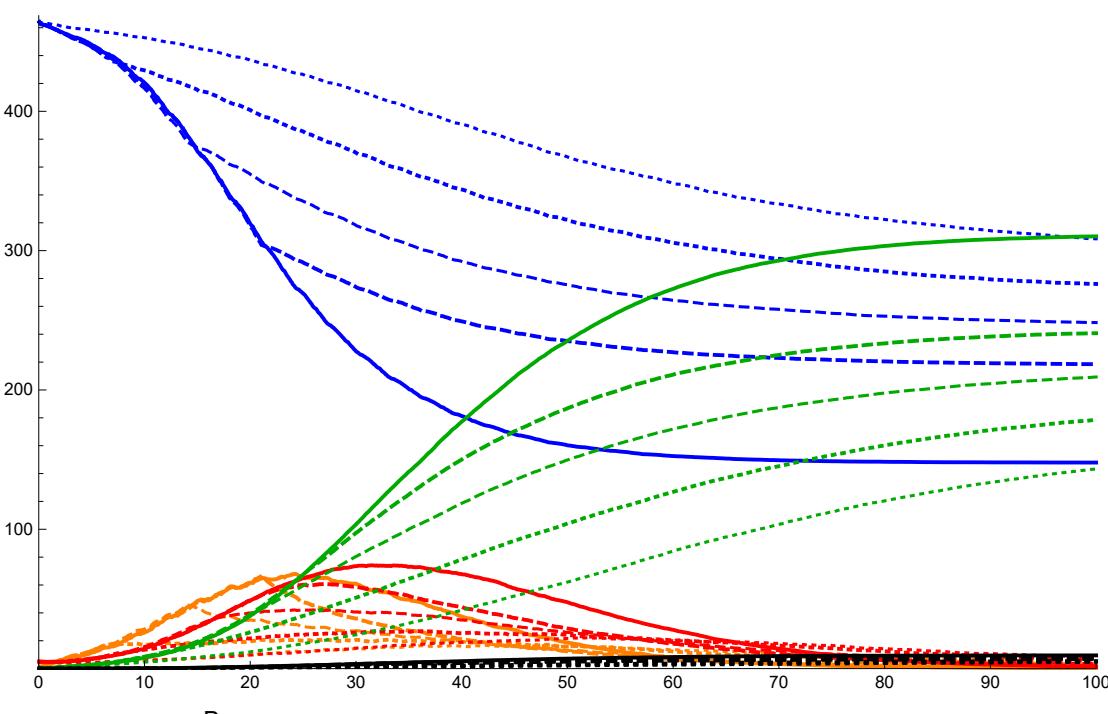


Наложение графиков

In[272]:=

```
SEIRDplotsum[seird1hn5mwm80p, seird1hn5mwm80p7d, seird1hn5mwm80p14d, seird1hn5mwm80p21d, seird1hn5m, 16, 10]
```

Out[272]=



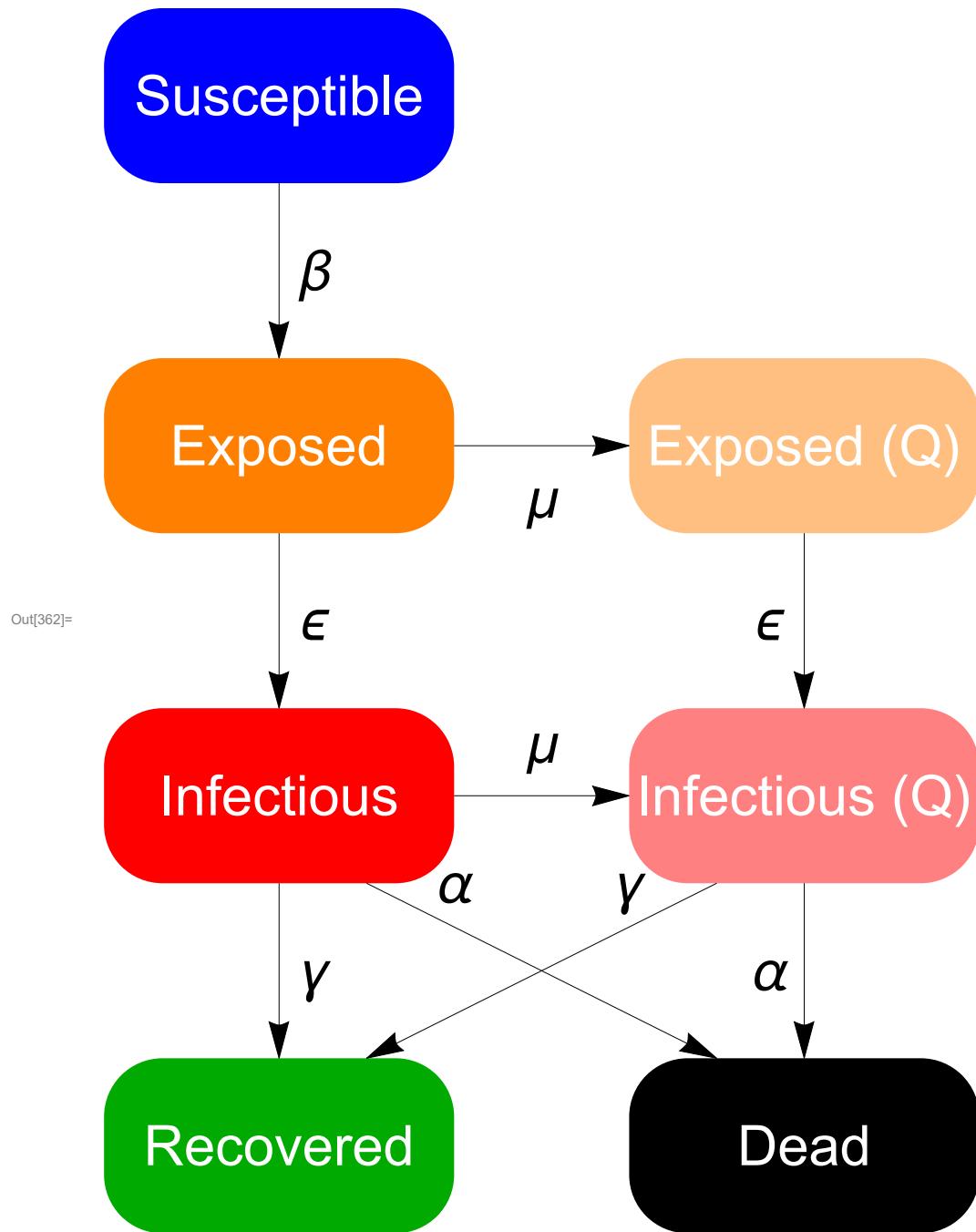
- Восприимчивые, время ввода меры – с первого дня
- Восприимчивые, время ввода меры – через неделю от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- . Контактные, время ввода меры – с первого дня
- . Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- . Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- . Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- . Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- . Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- . Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- . Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- . Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- . Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- . Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- . Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- . Умершие, время ввода меры – с первого дня
- . Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- . Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- . Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

Тестирование и карантинные меры

<ТЕКСТ>

График перехода состояний в SEIRDQ модели

```
In[362]:= Graphics[{{Blue, Rectangle[{0, 0}, {2, -1}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]}, {White, Text[Style["Susceptible", 32], {1, - $\frac{1}{2}$ }]}, {Orange, Rectangle[{0, -2}, {2, -3}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]}, {White, Text[Style["Exposed", 32], {1, - $\frac{5}{2}$ }]}, {Lighter[Orange, .5], Rectangle[{3, -2}, {5, -3}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]}, {White, Text[Style["Exposed (Q)", 32], {4, - $\frac{5}{2}$ }]}, {Red, Rectangle[{0, -4}, {2, -5}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]}, {White, Text[Style["Infectious", 32], {1, - $\frac{9}{2}$ }]}, {Lighter[Red, .5], Rectangle[{3, -4}, {5, -5}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]}, {White, Text[Style["Infectious (Q)", 32], {4, - $\frac{9}{2}$ }]}, {Darker[Green], Rectangle[{0, -6}, {2, -7}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]}, {White, Text[Style["Recovered", 32], {1, - $\frac{13}{2}$ }]}, {Black, Rectangle[{3, -6}, {5, -7}, RoundingRadius ->  $\frac{1}{3}$ ]}, {White, Text[Style["Dead", 32], {4, - $\frac{13}{2}$ }]}, {Black, Arrow[{{1, -1}, {1, -2}}]}, {Arrow[{{1, -3}, {1, -4}}]}, {Arrow[{{1, -5}, {1, -6}}]}, {Arrow[{{2, - $\frac{5}{2}$ }, {3, - $\frac{5}{2}$ }]}], {Arrow[{{2, - $\frac{9}{2}$ }, {3, - $\frac{9}{2}$ }]}], {Arrow[{{4, -3}, {4, -4}}]}, {Arrow[{{4, -5}, {4, -6}}]}, {Arrow[{{ $\frac{3}{2}$ , -5}, { $\frac{7}{2}$ , -6}}]}, {Arrow[{{ $\frac{7}{2}$ , -5}, { $\frac{3}{2}$ , -6}}]}, {Text[Style[" $\beta$ ", 32], { $\frac{6}{5}$ , - $\frac{3}{2}$ }]}, {Text[Style[" $\epsilon$ ", 32], { $\frac{6}{5}$ , - $\frac{7}{2}$ }]}, {Text[Style[" $\gamma$ ", 32], { $\frac{6}{5}$ , - $\frac{11}{2}$ }]}, {Text[Style[" $\epsilon$ ", 32], { $\frac{19}{5}$ , - $\frac{7}{2}$ }]}, {Text[Style[" $\alpha$ ", 32], { $\frac{19}{5}$ , - $\frac{11}{2}$ }]}, {Text[Style[" $\mu$ ", 32], { $\frac{5}{2}$ , - $\frac{14}{5}$ }]}, {Text[Style[" $\mu$ ", 32], { $\frac{5}{2}$ , - $\frac{21}{5}$ }]}, {Text[Style[" $\alpha$ ", 32], {2, -5}], {Text[Style[" $\gamma$ ", 32], {3, -5}]}}}, ImageSize -> Large]
```



<TEKCT>

```
In[363]:= SEIRDQ[ele_, ewe_, vc_, i0_, β_, ε_, γ_, α_, tr_, trf_, ts_]:= 
Module[{ntr=Round[tr vc], predata=Table[NearestNeighborList[ele[[i]],ewe[[i]],vc],{i,1,Length[ele]}], 
data=Table[{i,"Susceptible",{},{}}, {j,1,Length[ele]},{i,1,vc}], ev={}, iv={}, rv={}, dv={}, tv={},
eqv={}, iqv={}},{Do[Do[data[[i,j,3]]=predata[[i,j,1]];data[[i,j,4]]=predata[[i,j,2]],{j,1,vc}],{i,1,Length[ele]}];iv=RandomSample[Range[vc],i0];Do[data[[1,iv[[i]],2]]="Infected",{i,1,i0}]; 
Do[rv=Cases[data[[i]],{_, "Recovered", _, _}];If[rv!={},Do[data[[i+1,rv[[j,1]],2]]="Recovered",
{j,1,Length[rv]}]];dv=Cases[data[[i]],{_, "Dead", _, _}];If[dv!={},Do[data[[i+1,dv[[j,1]],2]]="Dead",
{j,1,Length[dv]}]];ev=Cases[data[[i]],{_, "Exposed", _, _}];iv=Cases[data[[i]],{_, "Infected", _, _}]; 
eqv=Cases[data[[i]],{_, "Exposed (quarantine)", _, _}];iqv=Cases[data[[i]],{_, "Infected (quarantine)", _, _}]; 
If[ev!={},Do[If[RandomChoice[{ε,1-ε}→{True,False}]==True,data[[i+1,ev[[j,1]],2]]="Infected",
data[[i+1,ev[[j,1]],2]]="Exposed"],{j,1,Length[ev]}]];
If[eqv!={},Do[If[RandomChoice[{ε,1-ε}→{True,False}]==True,data[[i+1,eqv[[j,1]],2]]="Infected (quarantine)",
data[[i+1,eqv[[j,1]],2]]="Exposed (quarantine)"],{j,1,Length[eqv]}]];
If[iqv!={},Do[If[RandomChoice[{γ,1-γ}→{True,False}]==True,If[RandomChoice[{α,1-α}→{True,False}]==True
data[[i+1,iqv[[j,1]],2]]="Dead",data[[i+1,iqv[[j,1]],2]]="Recovered"],
data[[i+1,iqv[[j,1]],2]]="Infected (quarantine)"],{j,1,Length[iqv]}]];If[iv!={},Do[If[iv[[j,3]]!={},
Do[If[RandomChoice[{β iv[[j,4,k]],1-β iv[[j,4,k]]}→{True,False}]==True,
If[data[[i,iv[[j,3,k]],2]]=="Susceptible",data[[i+1,iv[[j,3,k]],2]]="Exposed"],{k,1,Length[iv[[j,3]]]}];
If[RandomChoice[{γ,1-γ}→{True,False}]==True,If[RandomChoice[{α,1-α}→{True,False}]==True,
data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Dead",data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Recovered"],data[[i+1,iv[[j,1]],2]]="Infected"],
{j,1,Length[iv]}]];If[Mod[i+1,trf]==0&&i+1≥ts, tv=Flatten[{Cases[data[[i]],{_, "Susceptible", _, _}][[All,1]],
Cases[data[[i]],{_, "Exposed", _, _}][[All,1]],Cases[data[[i]],{_, "Infected", _, _}][[All,1]]}];
tv=RandomSample[tv,If[Length[tv]>ntr,ntr,Length[tv]]];Do[If[data[[i,tv[[j]],2]]=="Exposed",
data[[i+1,tv[[j]],2]]="Exposed (quarantine)"];If[data[[i,tv[[j]],2]]=="Infected",
data[[i+1,tv[[j]],2]]="Infected (quarantine)"],{j,1,Length[tv]}]],{i,1,Length[ele]-1}];data]
```

Вспомогательная функция для моделирования.

```
In[364]:= SEIRDQmod[ele_, ewe_, vc_, i0_, β_, ε_, γ_, α_, tr_, trf_, ts_, n_]:= 
Mean[Table[Module[{out=SEIRDQ[ele,ewe,vc,i0,β,ε,γ,α,tr,trf,ts,α]}, 
Table[{Length[Cases[out[[i]],{_, "Susceptible", _, _}]], 
Length[Cases[out[[i]],{_, "Exposed", _, _}]],Length[Cases[out[[i]],{_, "Exposed (quarantine)", _, _}]], 
Length[Cases[out[[i]],{_, "Infected", _, _}]],Length[Cases[out[[i]],{_, "Infected (quarantine)", _, _}]], 
Length[Cases[out[[i]],{_, "Recovered", _, _}]],Length[Cases[out[[i]],{_, "Dead", _, _}]]}, {i,1,Length[out]}]],{l,1,n}]]
```

Вспомогательная функция для построения графиков.

```
In[365]:= SEIRDQplot[data_,dt1_,dt2_]:=ListLinePlot[Table[{j,data[[j,i]]},{i,1,7},{j,1,Length[data]}], 
PlotRange→{{0,Length[data]},{0,Total[data[[1]]]}}, 
Ticks→{Table[{dt1 i,i},{i,0,Round[Length[data]/dt1],dt2}],Automatic}, 
PlotLegends→Placed[{"Восприимчивые","Контактные","Контактные на карантине","Инфицированные",
"Инфицированные на карантине","Выздоровевшие","Умершие"},Bottom], 
PlotStyle→{Blue,Orange,Lighter[Orange,.5],Red,Lighter[Red,.5],Darker[Green],Black},ImageSize→Large]
```

Вспомогательная функция для построения графиков .

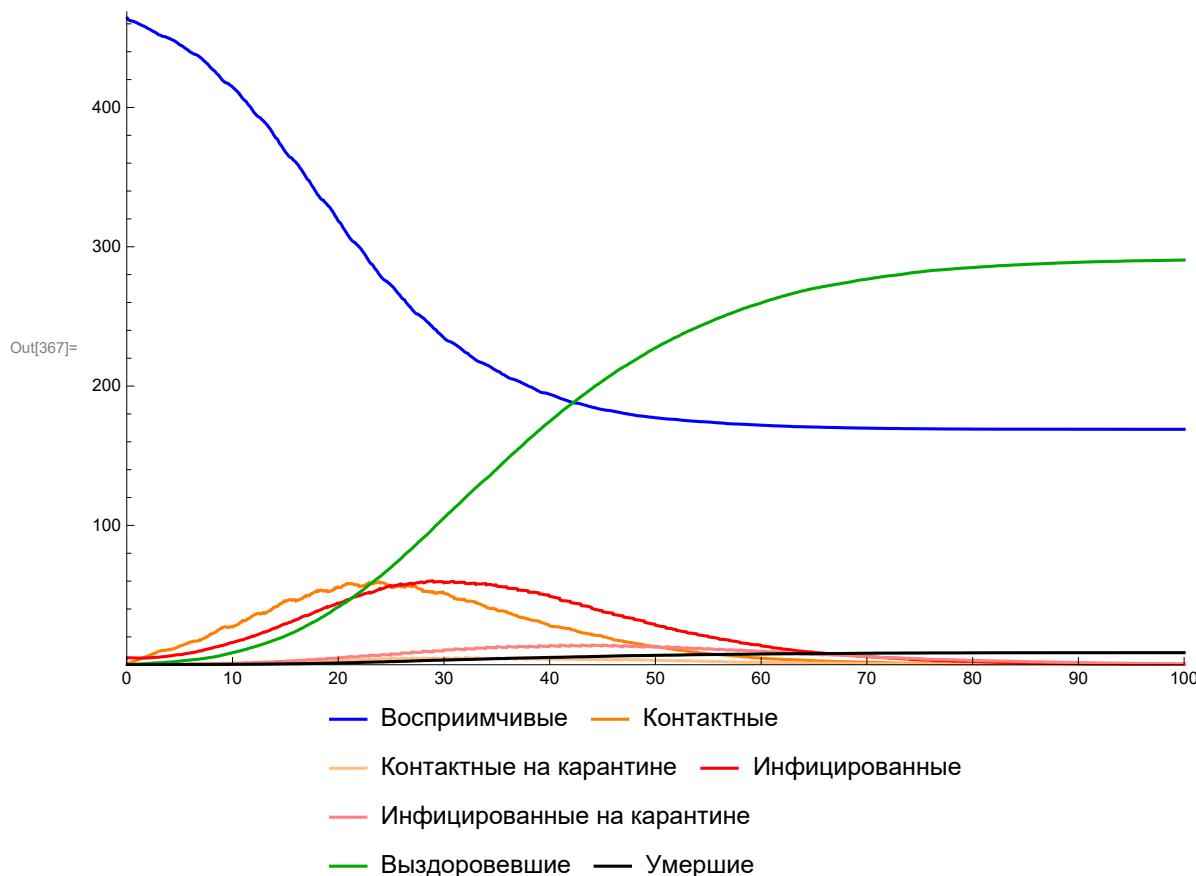
```
In[376]:= SEIRDQplotsum[o1_,o2_,o3_,o4_,o5_,dt1_,dt2_]:= 
ListLinePlot[Module[{n=Length[o1]}, {Table[{i,o1[[i,1]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,1]]},{i,1,n}],
Table[{i,o3[[i,1]]},{i,1,n}],Table[{i,o4[[i,1]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,1]]},{i,1,n}],
Table[{i,o1[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,2]]},{i,1,n}],
Table[{i,o4[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,2]]},{i,1,n}],Table[{i,o1[[i,3]]},{i,1,n}],
Table[{i,o2[[i,3]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,3]]},{i,1,n}],Table[{i,o4[[i,3]]},{i,1,n}],
Table[{i,o1[[i,4]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,4]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,4]]},{i,1,n}],
Table[{i,o4[[i,4]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,3]]},{i,1,n}],Table[{i,o1[[i,5]]},{i,1,n}],
Table[{i,o2[[i,5]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,5]]},{i,1,n}],Table[{i,o4[[i,5]]},{i,1,n}],
Table[{i,o1[[i,6]]},{i,1,n}],Table[{i,o2[[i,6]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,6]]},{i,1,n}],
Table[{i,o4[[i,6]]},{i,1,n}],Table[{i,o5[[i,4]]},{i,1,n}],Table[{i,o1[[i,7]]},{i,1,n}],
Table[{i,o2[[i,7]]},{i,1,n}],Table[{i,o3[[i,7]]},{i,1,n}],Table[{i,o4[[i,7]]},{i,1,n}],
Table[{i,o5[[i,5]]},{i,1,n}]}],PlotRange→{{0,Length[o1]}, {0,Total[o1[[1]]]}},
Ticks→{Table[{dt1 i,i},{i,0,Round[Length[o1]
dt1 ],dt2}],Automatic},
PlotStyle→{{Blue,Dotted},{Blue,Dotted,Thick},{Blue,Dashed},{Blue,Dashed,Thick},{Blue,Thick},
{Orange,Dotted},{Orange,Dotted,Thick},{Orange,Dashed},{Orange,Dashed,Thick},{Orange,Thick},
{Lighter[Orange,.5],Dotted},{Lighter[Orange,.5],Dotted,Thick},
{Lighter[Orange,.5],Dashed},{Lighter[Orange,.5],Dashed,Thick},
{Red,Dotted},{Red,Dotted,Thick},{Red,Dashed},{Red,Dashed,Thick},{Red,Thick},
{Lighter[Red,.5],Dotted},{Lighter[Red,.5],Dotted,Thick},
{Lighter[Red,.5],Dashed},{Lighter[Red,.5],Dashed,Thick},
{Darker[Green],Dotted},{Darker[Green],Dotted,Thick},{Darker[Green],Dashed},
{Darker[Green],Dashed,Thick},{Darker[Green],Thick},
{Black,Dotted},{Black,Dotted,Thick},{Black,Dashed},{Black,Dashed,Thick},{Black,Thick}},
PlotLegends→Placed[LineLegend[{"Восприимчивые, время ввода меры – с первого дня",
"Восприимчивые, время ввода меры – через неделю от начала",
"Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала",
"Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала",
"Восприимчивые, без ввода мер", "Контактные, время ввода меры – с первого дня",
"Контактные, время ввода меры – через неделю от начала",
"Контактные, время ввода меры – через две недели от начала",
"Контактные, время ввода меры – через три недели от начала",
"Контактные, без ввода мер", "Контактные на карантине, время ввода меры – с первого дня",
"Контактные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала",
"Контактные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала",
"Контактные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала",
"Инфицированные, время ввода меры – с первого дня",
"Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала",
"Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала",
"Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала",
"Инфицированные, без ввода мер",
"Инфицированные на карантине, время ввода меры – с первого дня",
"Инфицированные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала",
"Инфицированные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала",
"Инфицированные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала",
"Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня",
"Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала",
"Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала",
"Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала",
"Выздоровевшие, без ввода мер", "Умершие, время ввода меры – с первого дня",
"Умершие, время ввода меры – через неделю от начала",
"Умершие, время ввода меры – через две недели от начала",
"Умершие, время ввода меры – через три недели от начала",
"Умершие, без ввода мер"}],Bottom],ImageSize→Large]
```

Уровень тестирования от населения - 1%, время ввода меры - с первого дня.

```
In[366]:= seirdq1hn5mtr1p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr1p.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr1p=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.01,16,15,100];*)
```

График

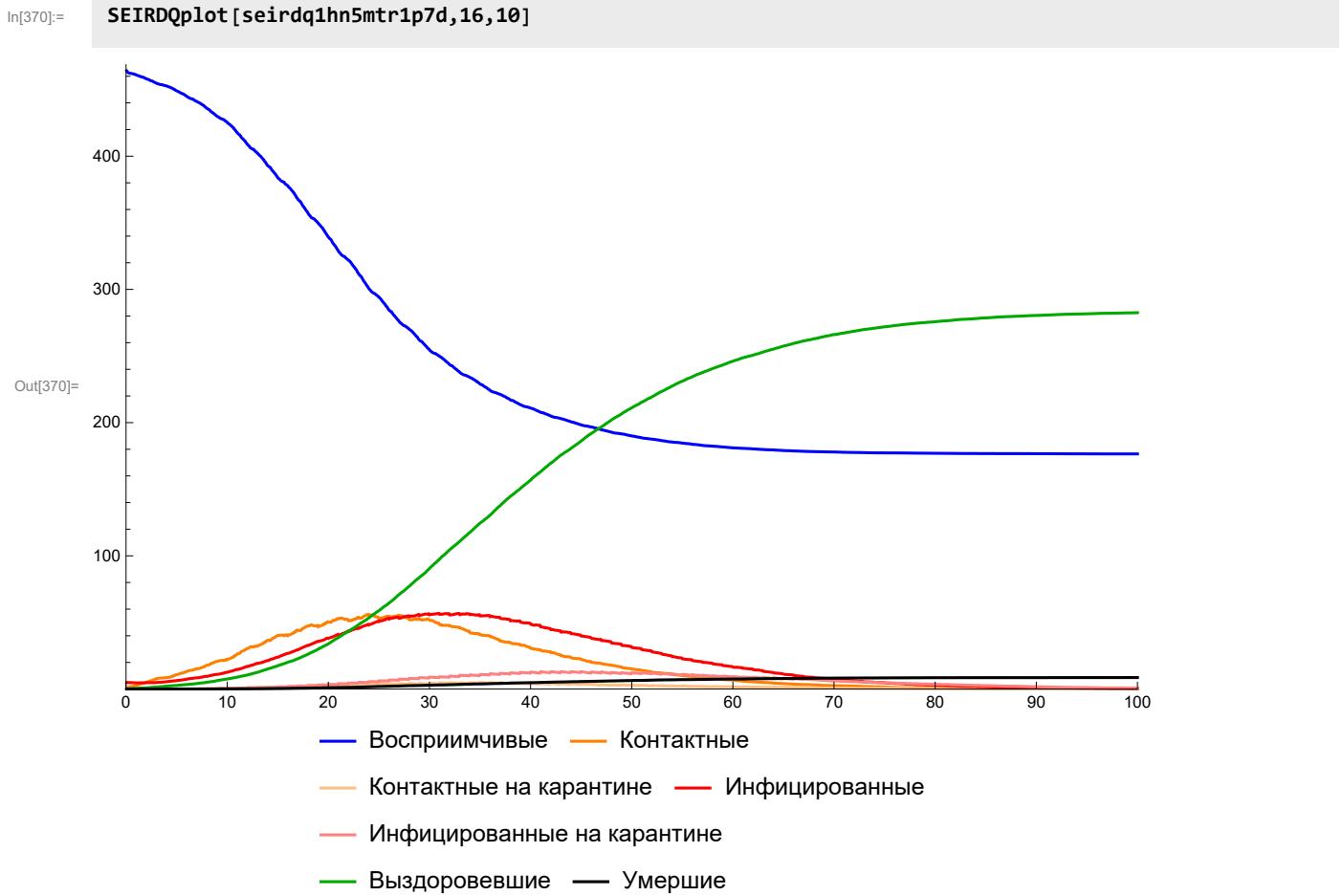
```
In[367]:= SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr1p,16,10]
```



Уровень тестирования от населения - 1%, время ввода меры - через неделю от начала.

```
In[369]:= seirdq1hn5mtr1p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr1p7d.m"}];
(*seirdq1hn5mtr1p7d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.01,16,15+16 6,100];*)
```

График



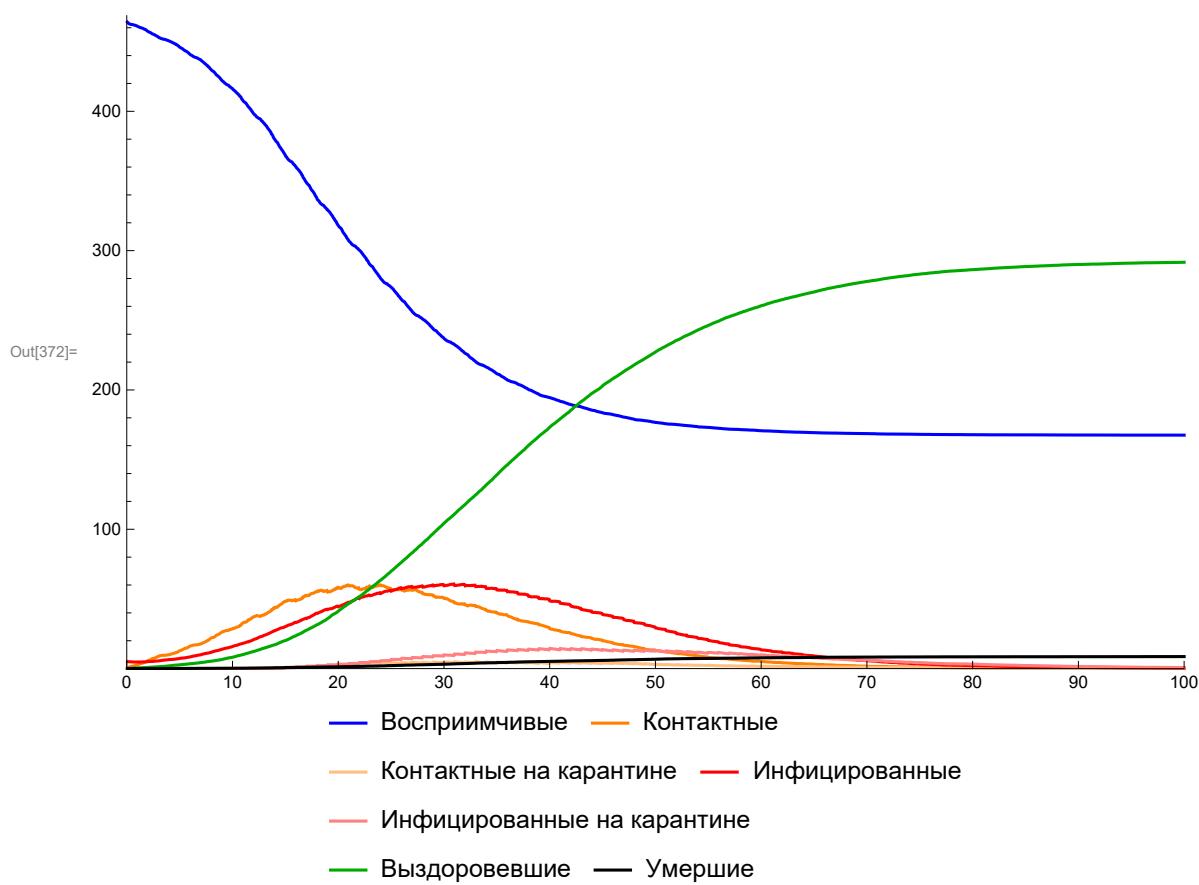
Уровень тестирования от населения - 1%, время ввода меры - через две недели от начала.

In[371]:= seirdq1hn5mtr1p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr1p14d.m"}]];(*seirdq1hn5mtr1p14d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100], DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\u03b51h,\u03b31h,0.03,0.01,16,15+16 13,100];*)

График

In[372]:=

SEIRDQplot [seirdq1hn5mtr1p14d, 16, 10]



Уровень тестирования от населения - 1%, время ввода меры - через три недели от начала.

In[373]:=

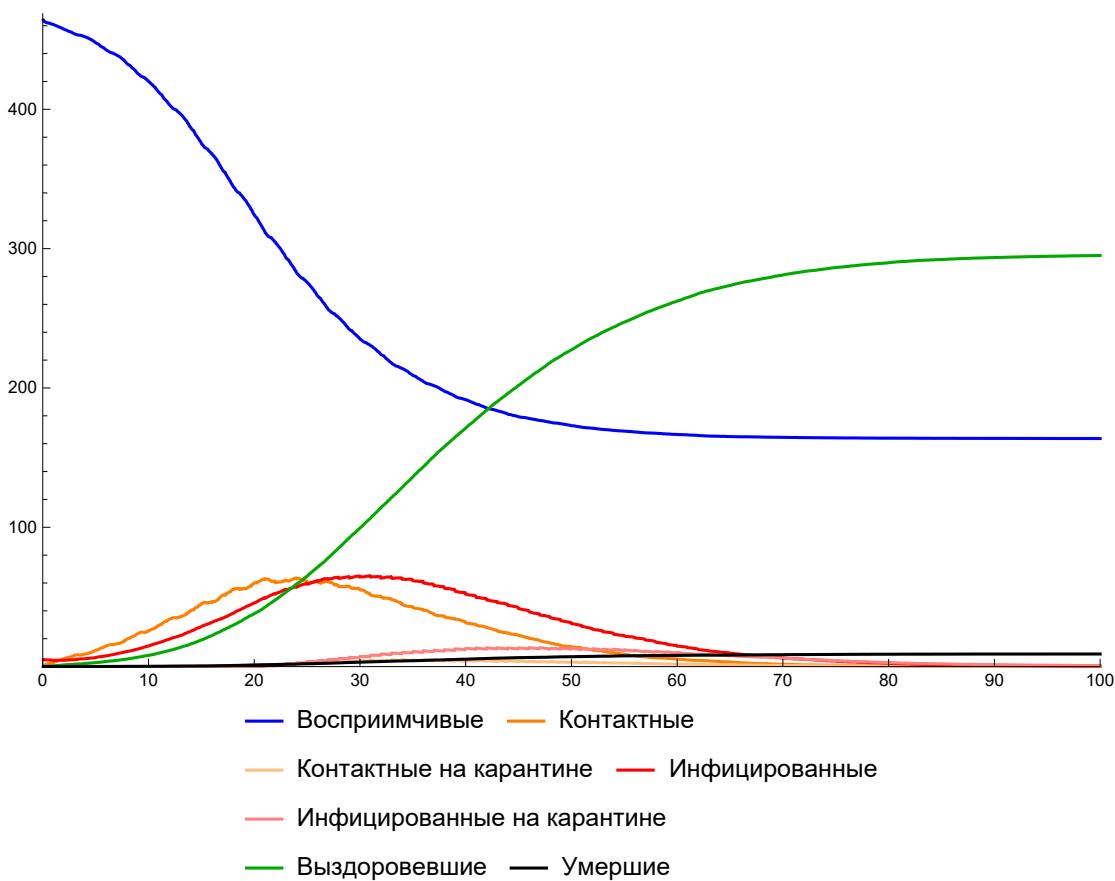
```
seirdq1hn5mtr1p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr1p21d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr1p21d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Rho]1h,0.03,0.01,16,15+16 20,100];*)
```

График

In[374]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr1p21d, 16, 10]

Out[374]=

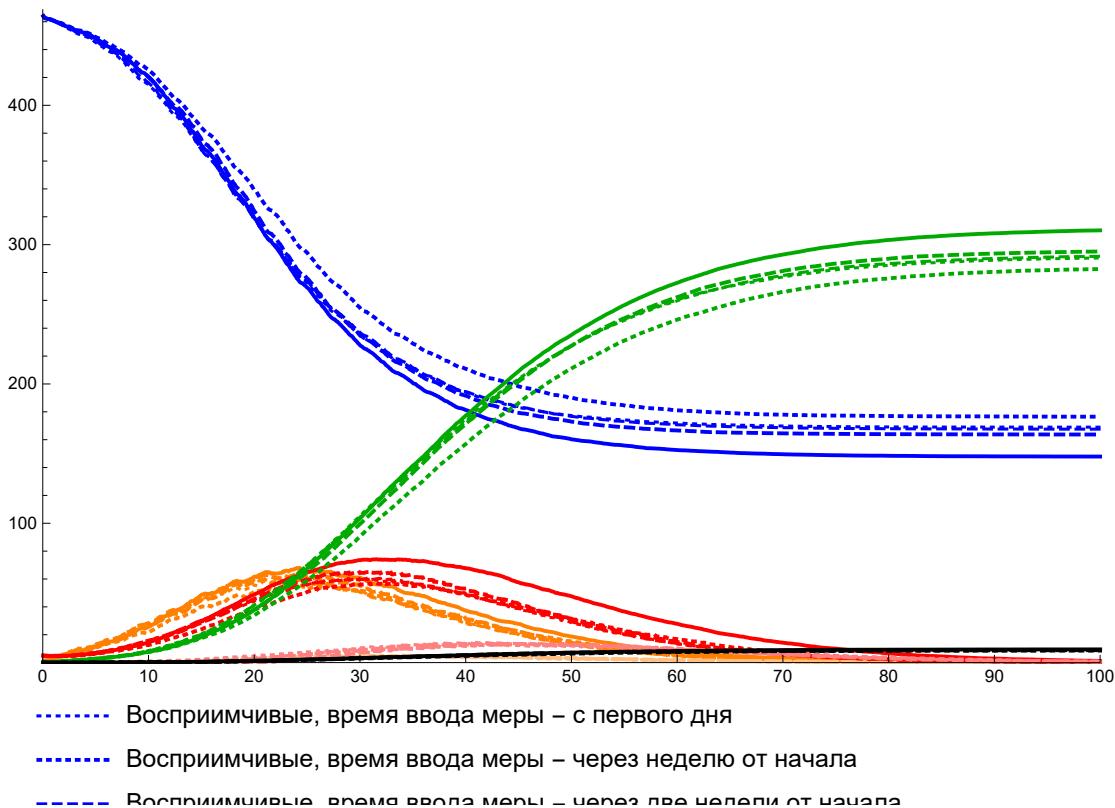


Наложение графиков

In[377]:=

SEIRDQplotsum[seirdq1hn5mtr1p, seirdq1hn5mtr1p7d, seirdq1hn5mtr1p14d, seirdq1hn5mtr1p21d, seird1hn5m, 16, 10]

Out[377]=



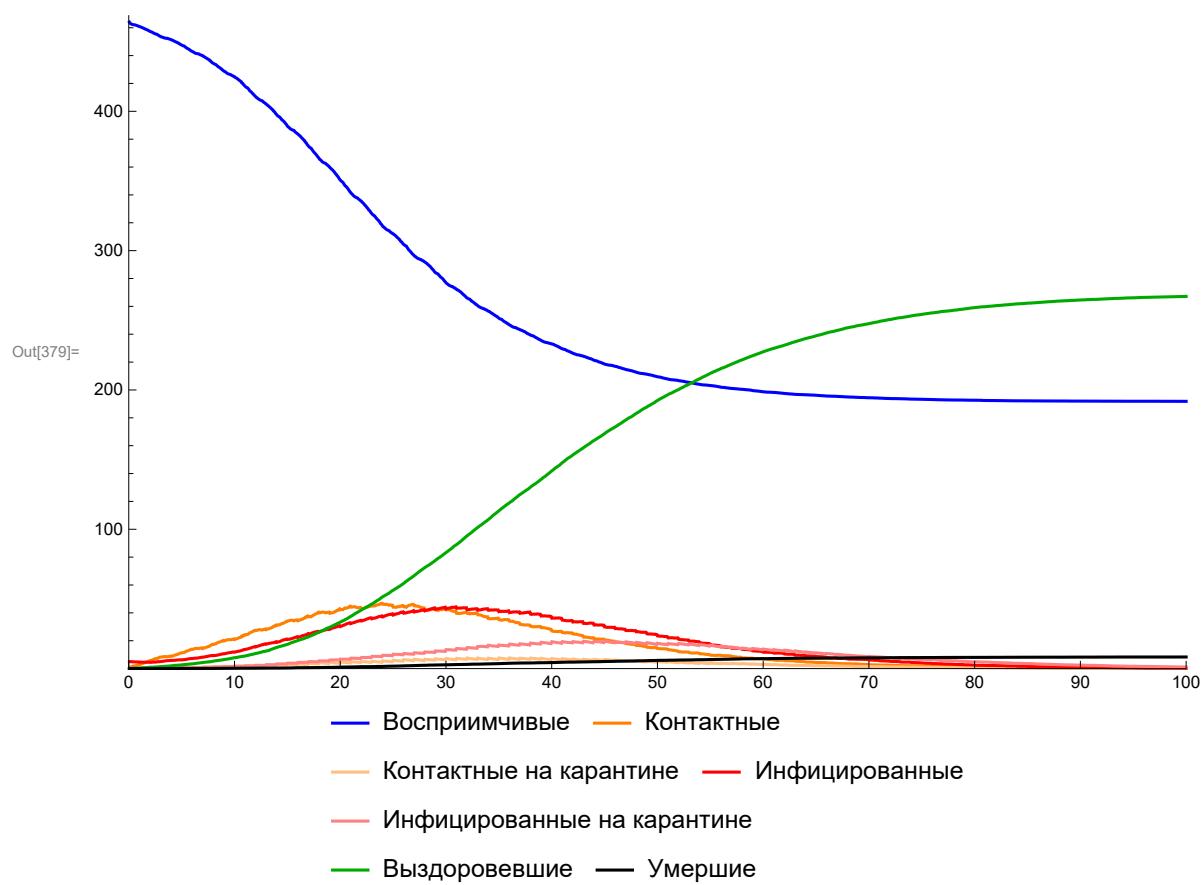
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Контактные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Контактные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

Уровень тестирования от населения - 2%, время ввода меры - с первого дня.

```
In[378]:= seirdq1hn5mtr2p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seirdq1hn5mtr2p.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr2p=SEIRDmod[DA[up1h5m\[1]],16 100],
DA[up1h5m\[2],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.02,16,15,100];*)
```

График

In[379]:= SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr2p, 16, 10]



Уровень тестирования от населения - 2%, время ввода меры - через неделю от начала.

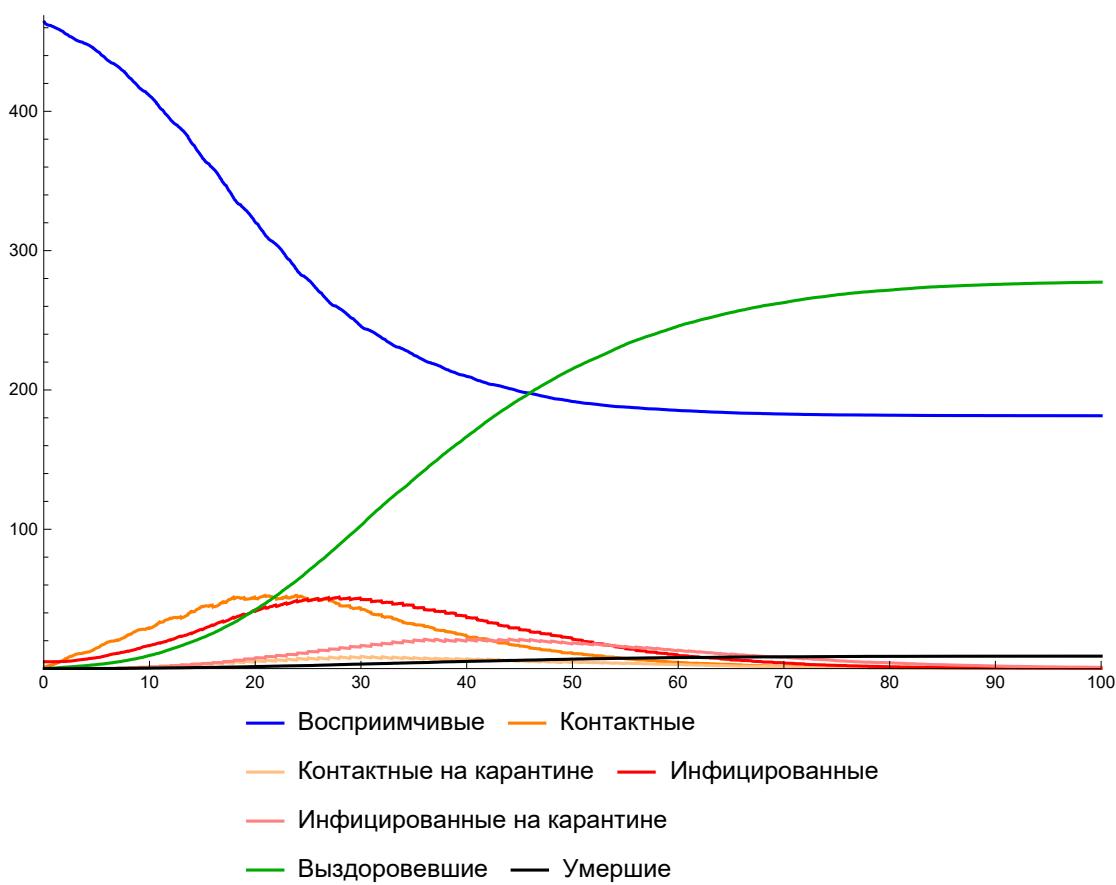
In[380]:= seirdq1hn5mtr2p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr2p7d.m"}]]; (*seirdq1hn5mtr2p7d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100], DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\u03b51h,\u03b31h,0.03,0.02,16,15+16 6,100];*)

График

In[381]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr2p7d, 16, 10]

Out[381]=



Уровень тестирования от населения - 2%, время ввода меры - через две недели от начала.

In[383]:=

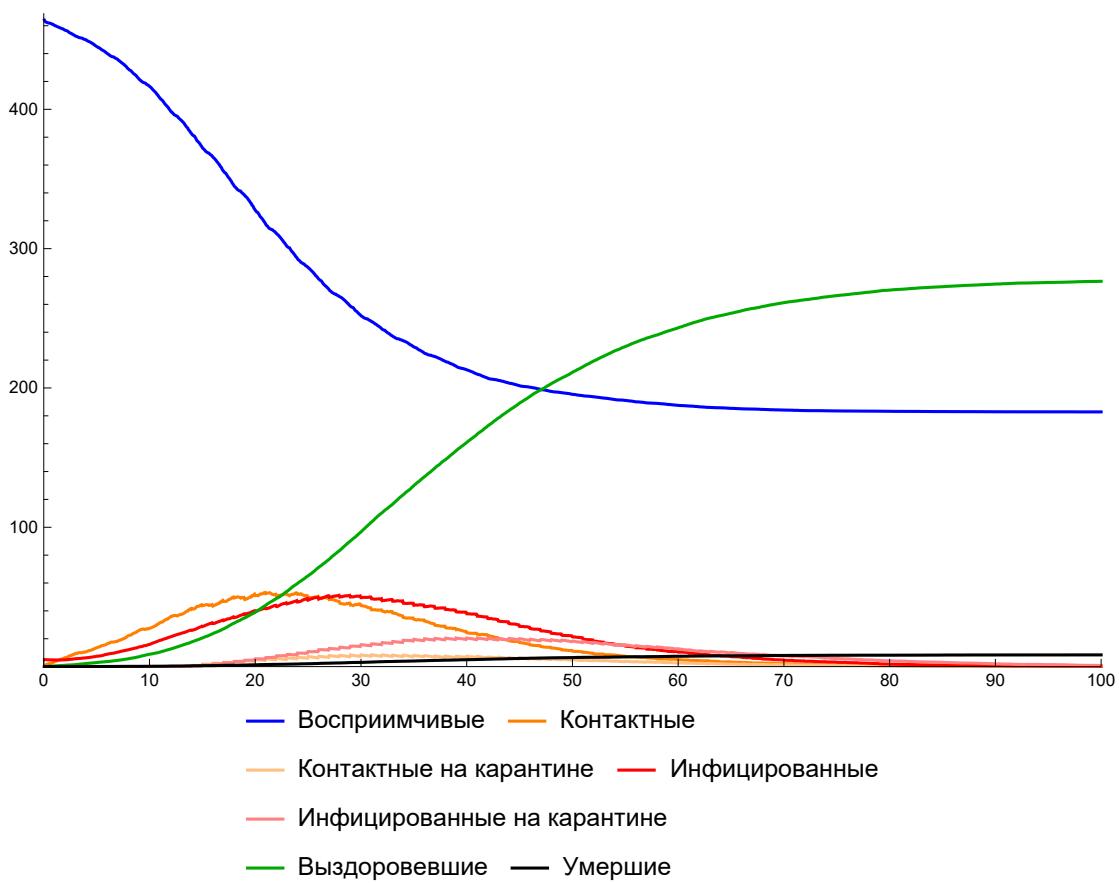
```
seirdq1hn5mtr2p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr2p14d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr2p14d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.02,16,15+16 13,100];*)
```

График

In[384]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr2p14d, 16, 10]

Out[384]=



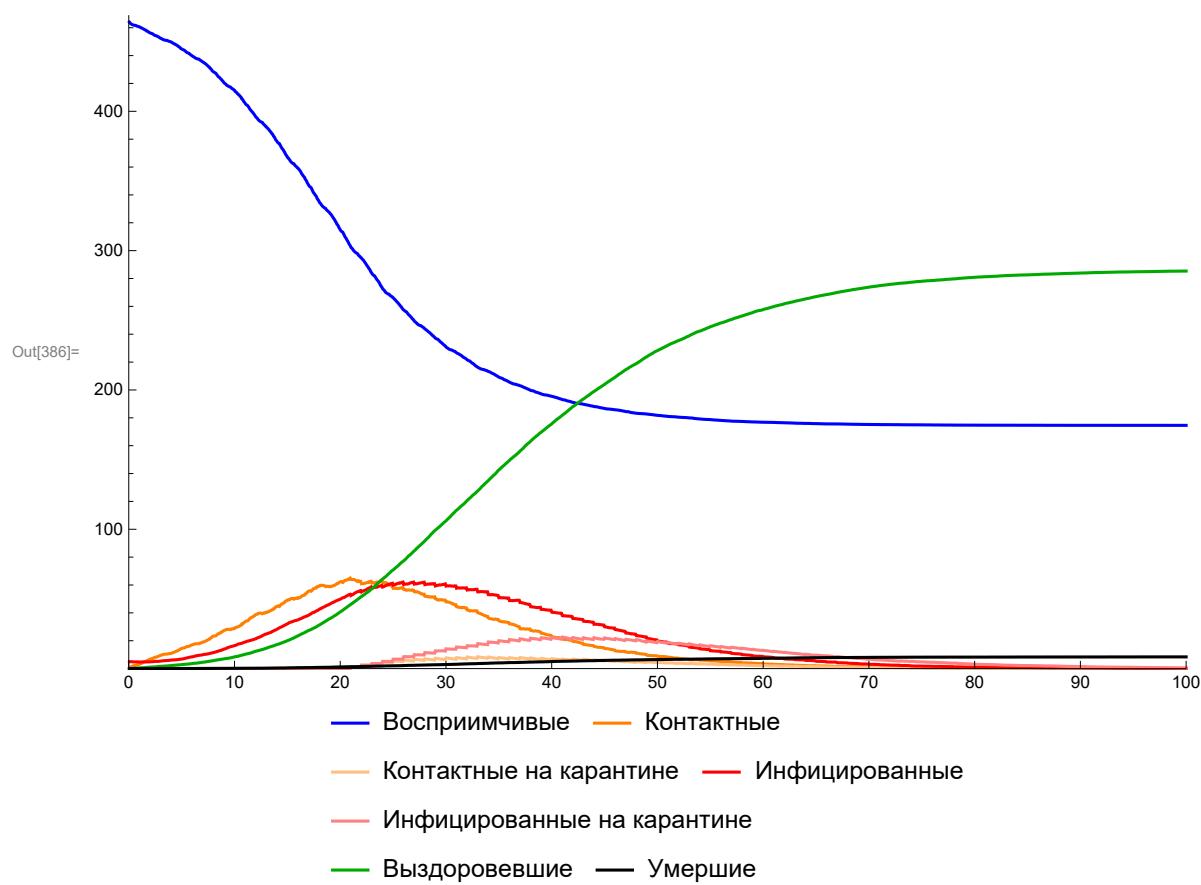
Уровень тестирования от населения - 2%, время ввода меры - через три недели от начала.

In[385]:=

```
seirdq1hn5mtr2p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr2p21d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr2p21d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.02,16,15+16 20,100];*)
```

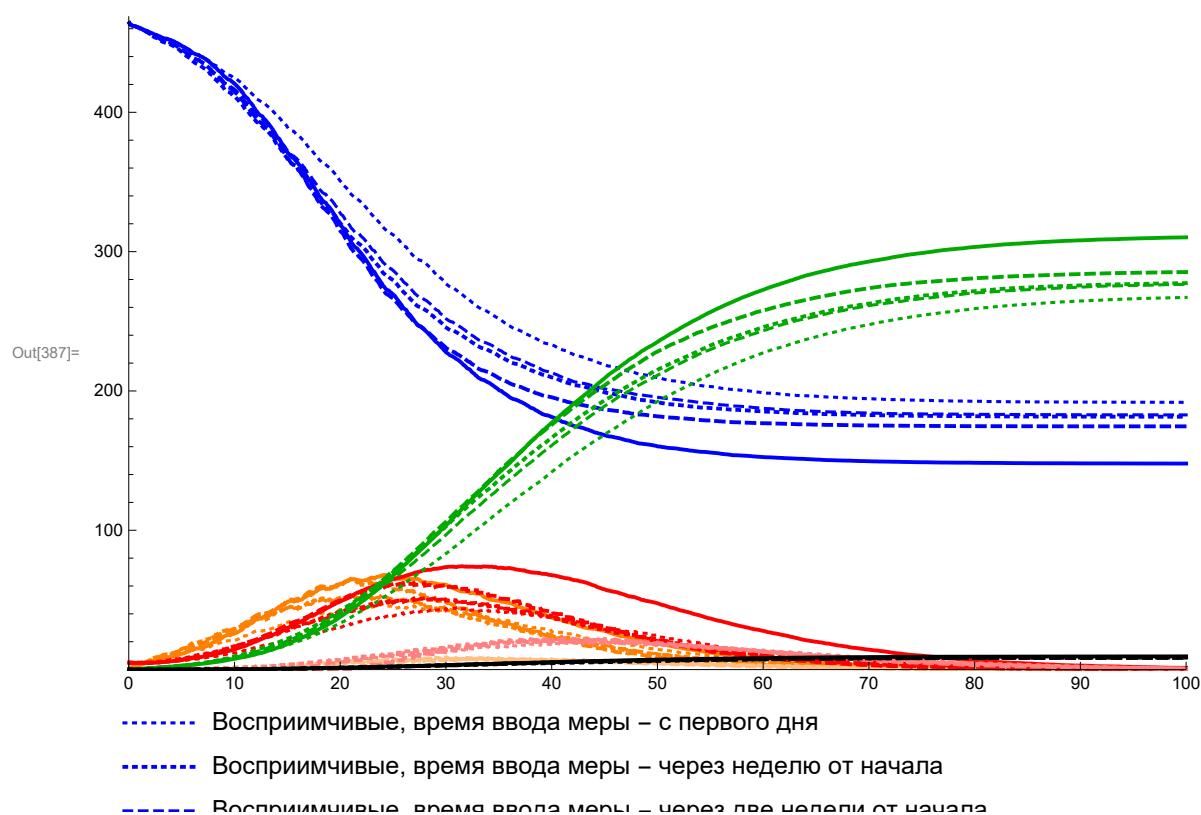
График

In[386]:= SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr2p21d, 16, 10]



Наложение графиков

In[387]:= SEIRDQplotsum[seirdq1hn5mtr2p, seirdq1hn5mtr2p7d, seirdq1hn5mtr2p14d, seirdq1hn5mtr2p21d, seird1hn5m, 16, 10]



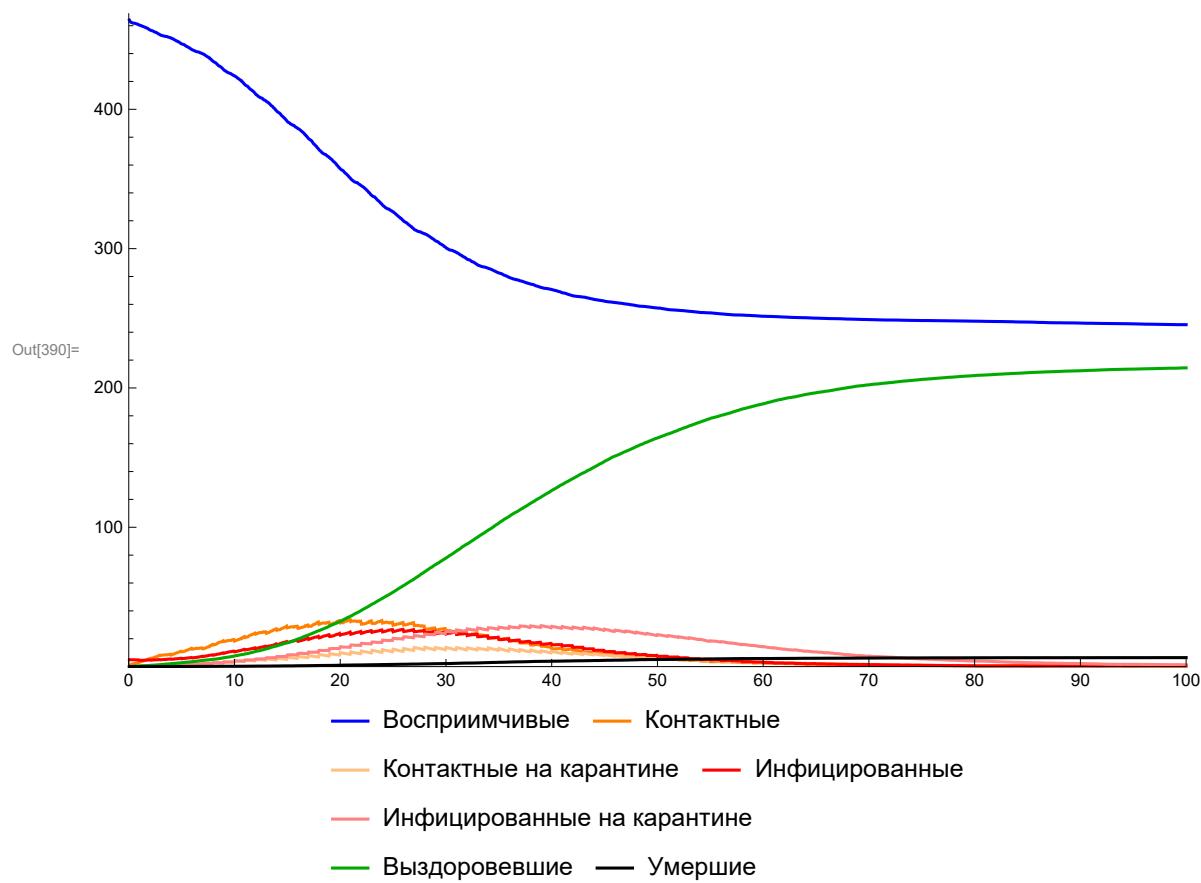
- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Контактные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Контактные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

Уровень тестирования от населения - 5%, время ввода меры - с первого дня.

```
In[389]:= seirdq1hn5mtr5p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[],"seirdq1hn5mtr5p.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr5p=SEIRDmod[DA[up1h5m\[1]],16 100],
DA[up1h5m\[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.05,16,15,100];*)
```

График

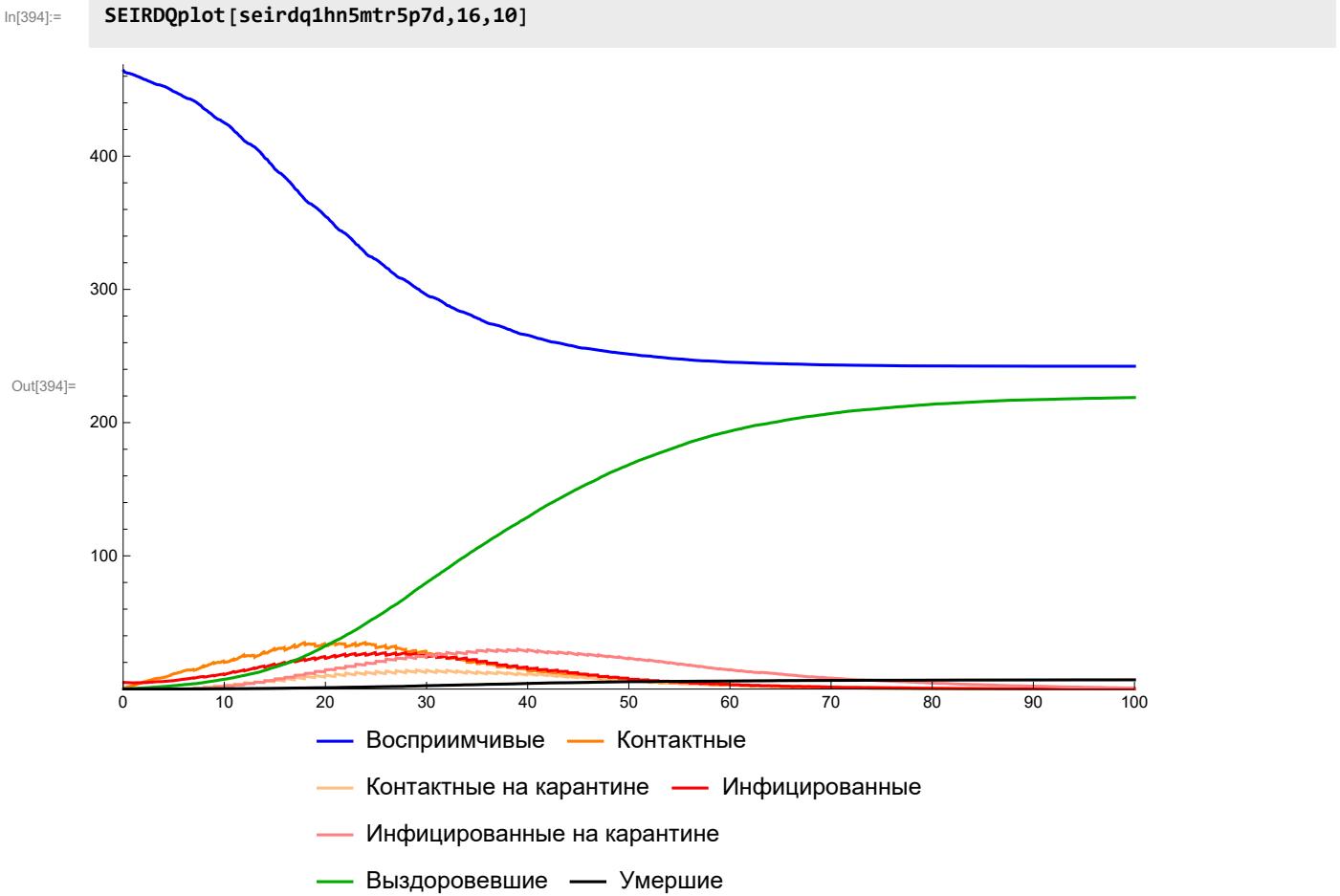
In[390]:= SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr5p, 16, 10]



Уровень тестирования от населения - 5%, время ввода меры - через неделю от начала.

In[393]:= seirdq1hn5mtr5p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr5p7d.m"}]];(*seirdq1hn5mtr5p7d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100], DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\u03b51h,\u03b31h,0.03,0.05,16,15+16 6,100];*)

График



Уровень тестирования от населения - 5%, время ввода меры - через две недели от начала.

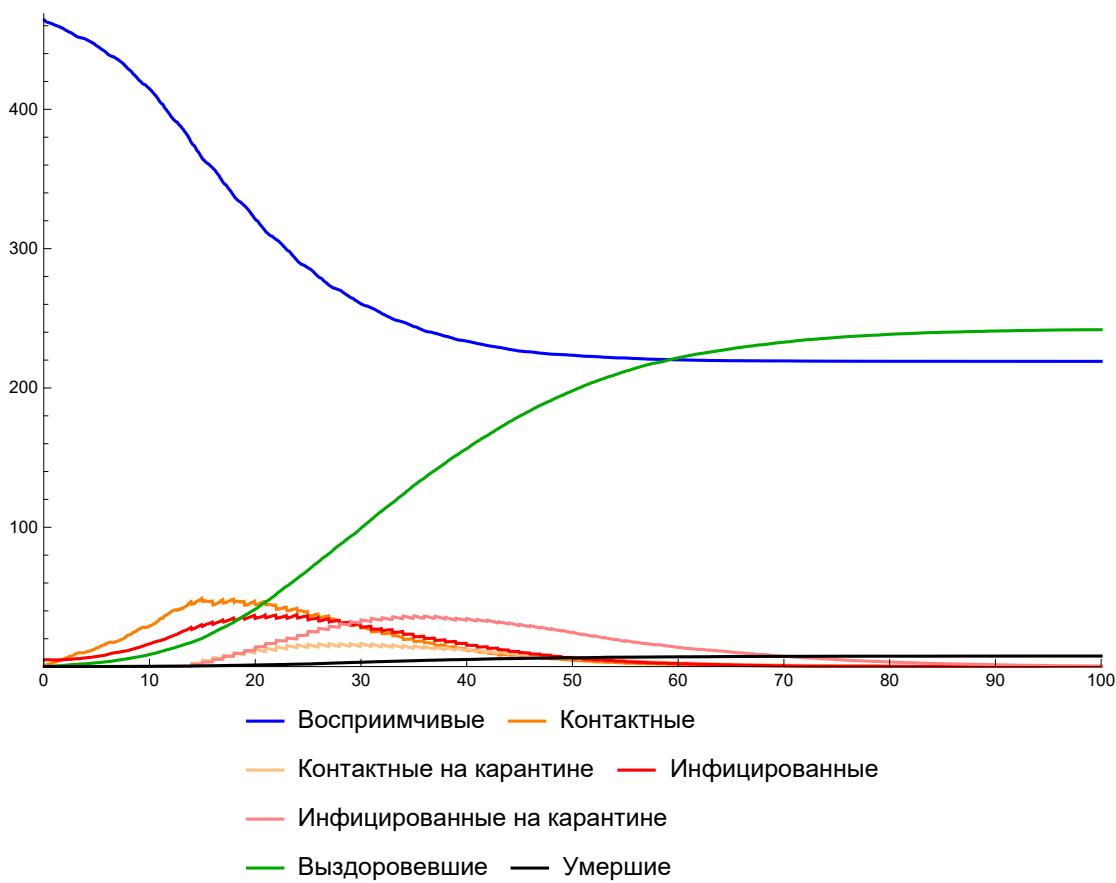
In[395]:= seirdq1hn5mtr5p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr5p14d.m"}]];(*seirdq1hn5mtr5p14d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100], DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\u03b51h,\u03b31h,0.03,0.05,16,15+16 13,100];*)

График

In[396]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr5p14d, 16, 10]

Out[396]=



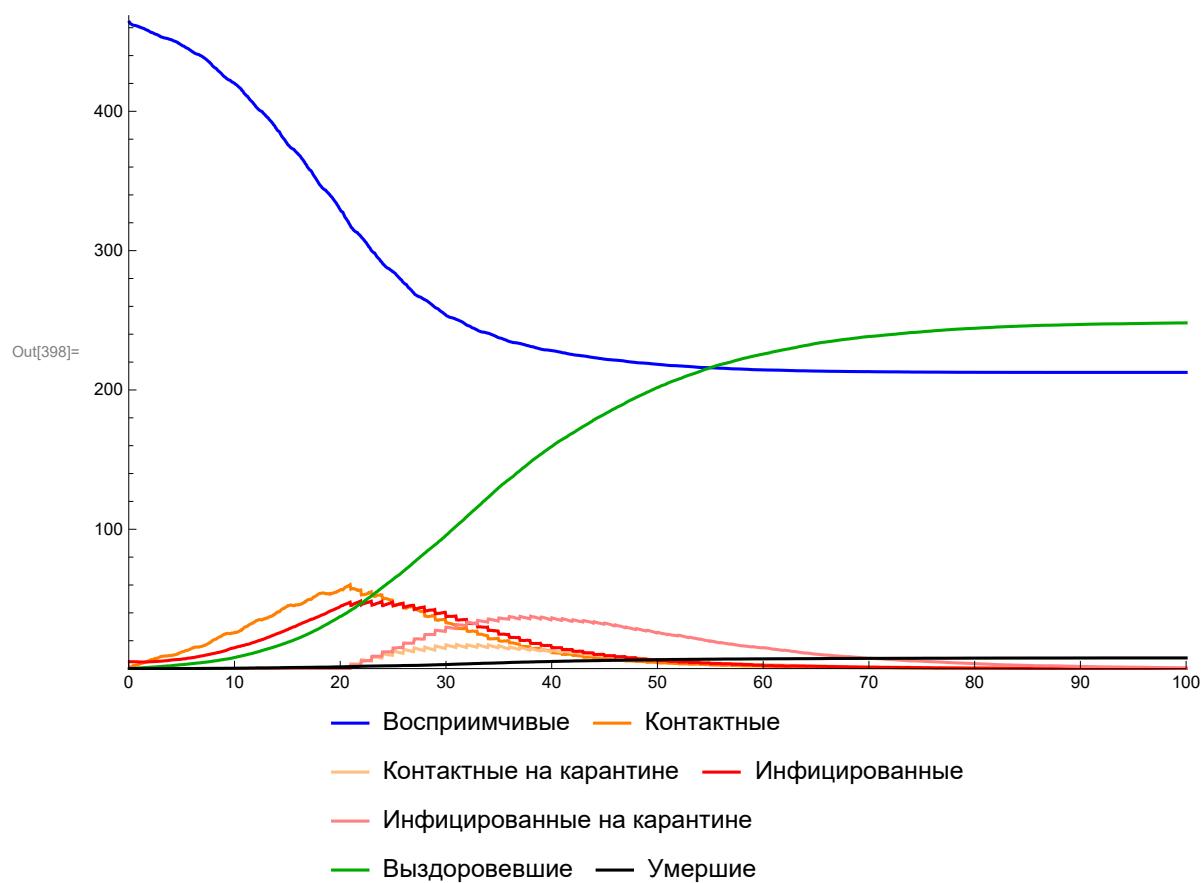
Уровень тестирования от населения - 5%, время ввода меры - через три недели от начала.

In[397]:=

```
seirdq1hn5mtr5p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr5p21d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr5p21d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.05,16,15+16 20,100];*)
```

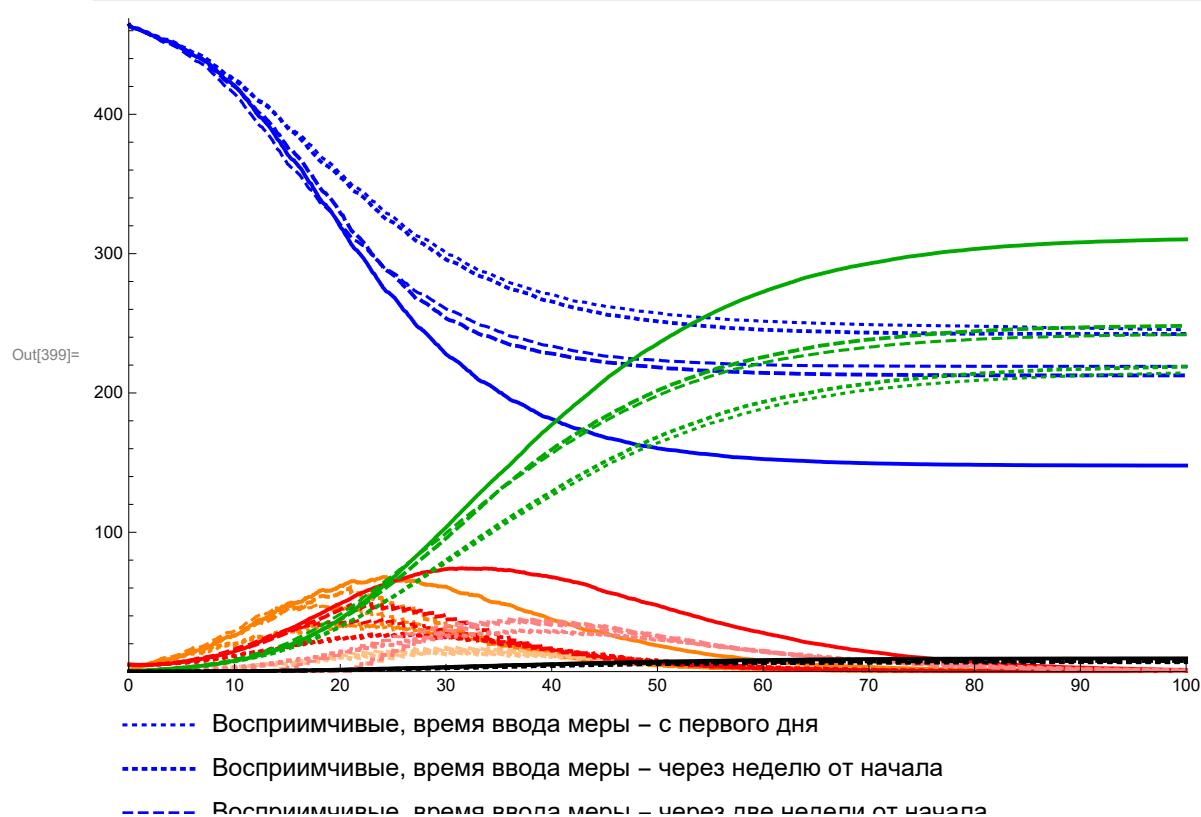
График

In[398]:= SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr5p21d, 16, 10]



Наложение графиков

In[399]:= SEIRDQplotsum[seirdq1hn5mtr5p, seirdq1hn5mtr5p7d, seirdq1hn5mtr5p14d, seirdq1hn5mtr5p21d, seird1hn5m, 16, 10]



- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Контактные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Контактные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

Уровень тестирования от населения - 10%, время ввода меры - с первого дня.

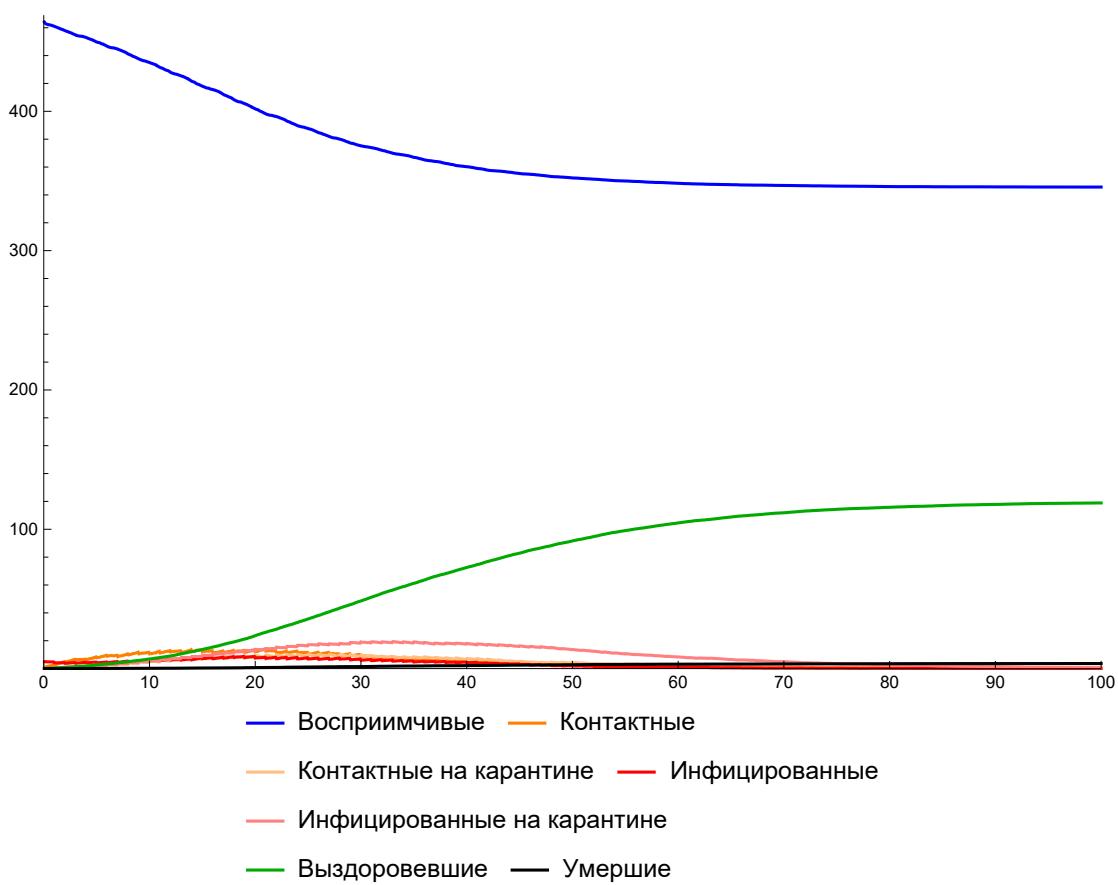
```
In[400]:= seirdq1hn5mtr10p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr10p.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr10p=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.1,16,15,100];*)
```

График

In[401]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr10p, 16, 10]

Out[401]=



Уровень тестирования от населения - 10%, время ввода меры - через неделю от начала.

In[402]:=

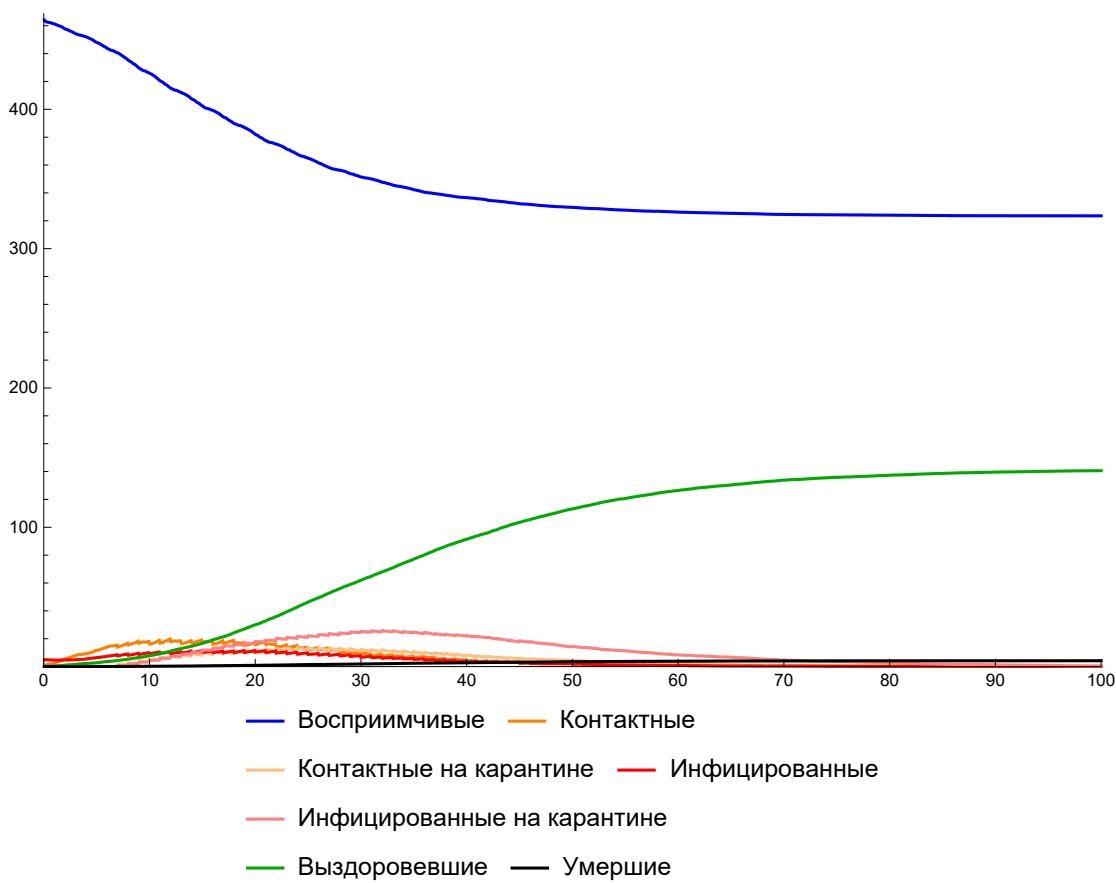
```
seirdq1hn5mtr10p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr10p7d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr10p7d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.1,16,15+16 6,100];*)
```

График

In[403]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr10p7d, 16, 10]

Out[403]=



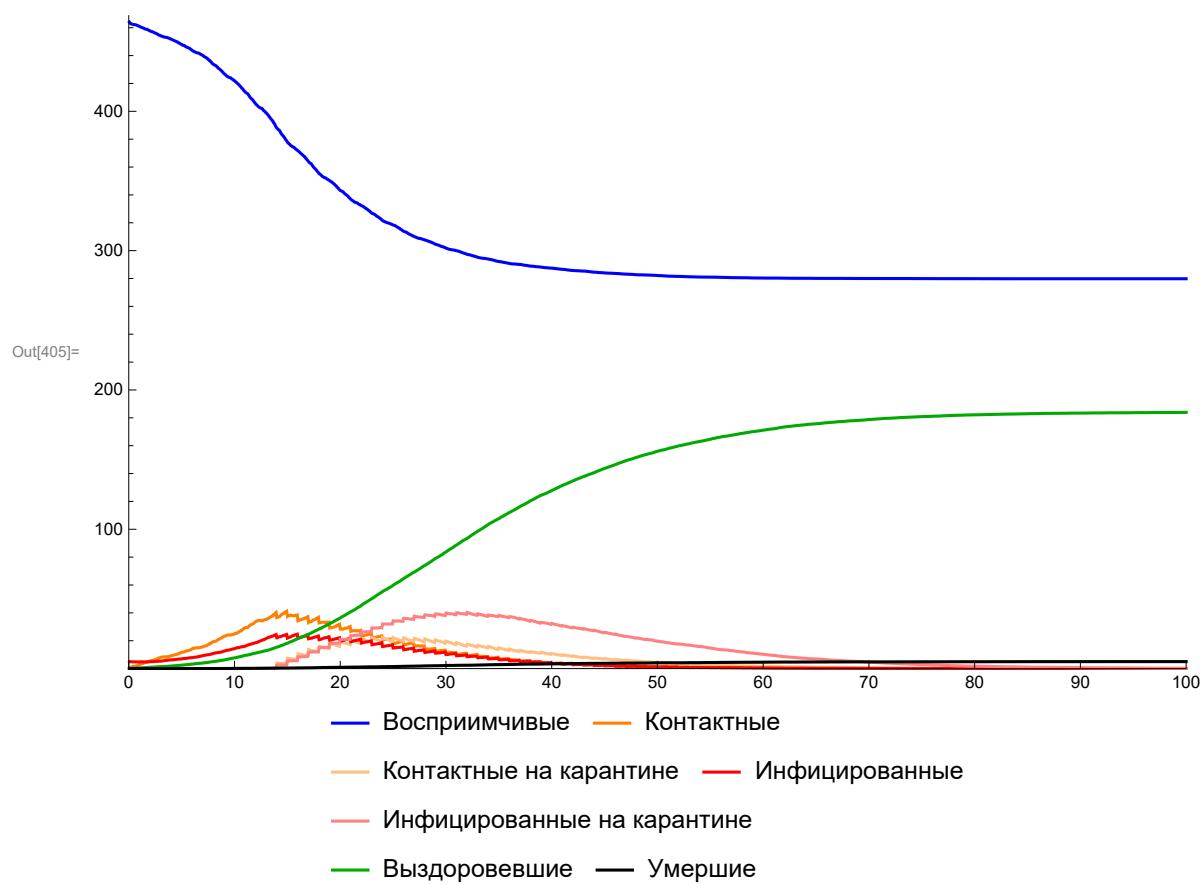
Уровень тестирования от населения - 10%, время ввода меры - через две недели от начала.

In[404]:=

```
seirdq1hn5mtr10p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr10p14d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr10p14d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.1,16,15+16 13,100];*)
```

График

In[405]:= SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr10p14d, 16, 10]



Уровень тестирования от населения - 10%, время ввода меры - через три недели от начала.

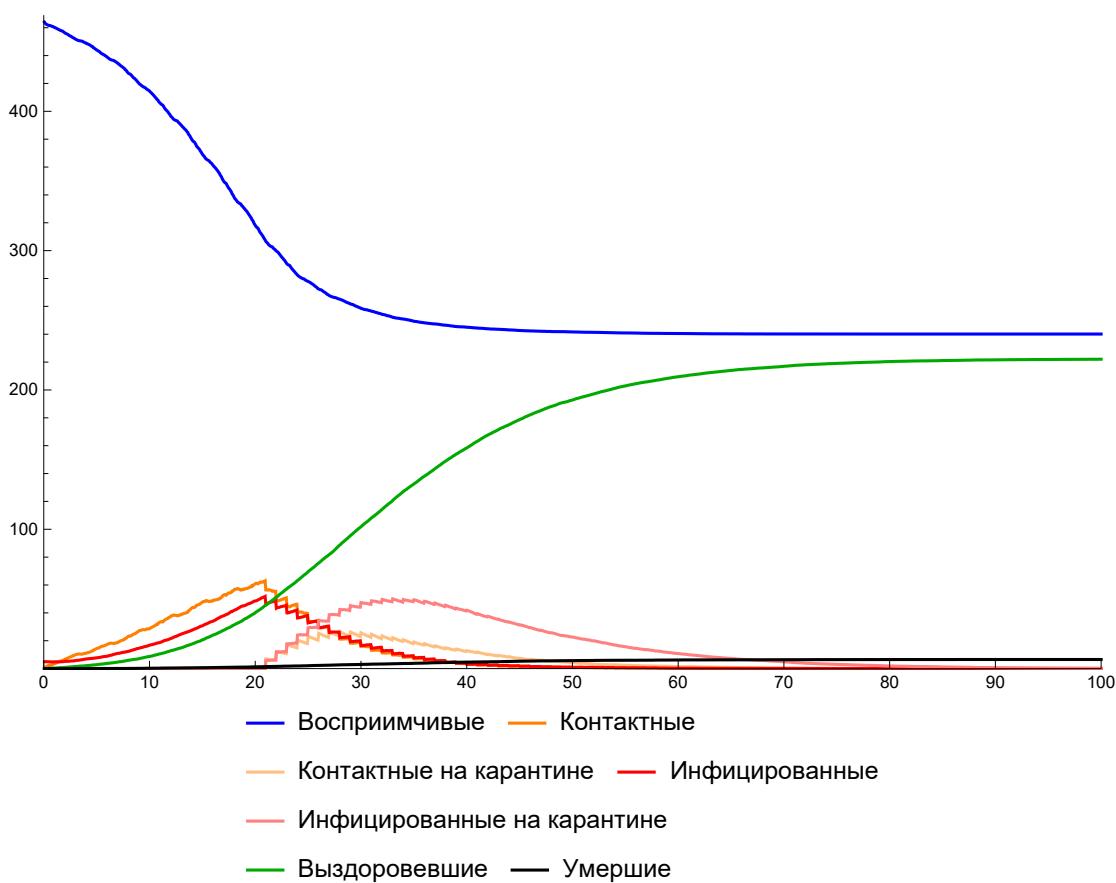
In[406]:= seirdq1hn5mtr10p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr10p21d.m"}]];(*seirdq1hn5mtr10p21d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100], DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\u03b51h,\u03b31h,0.03,0.1,16,15+16 20,100];*)

График

In[407]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr10p21d, 16, 10]

Out[407]=

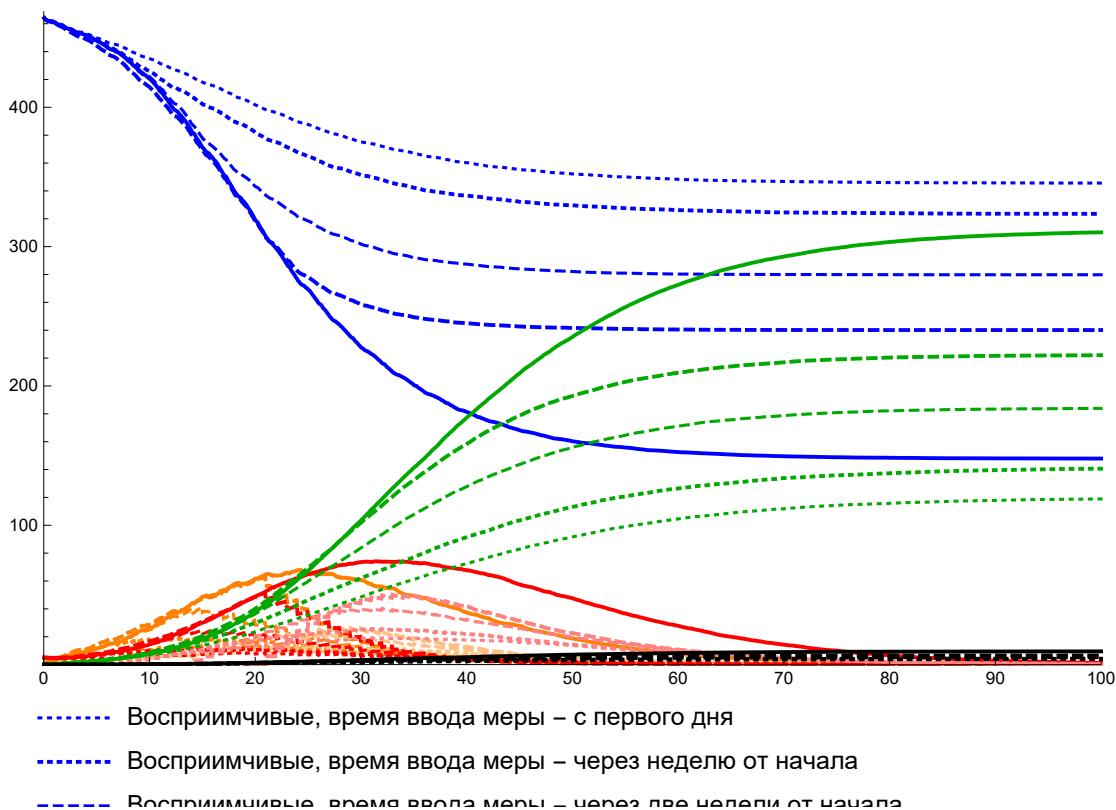


Наложение графиков

In[408]:=

SEIRDQplotsum[seirdq1hn5mtr10p, seirdq1hn5mtr10p7d, seirdq1hn5mtr10p14d, seirdq1hn5mtr10p21d, seird1hn5m, 1]

Out[408]=



- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Контактные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Контактные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

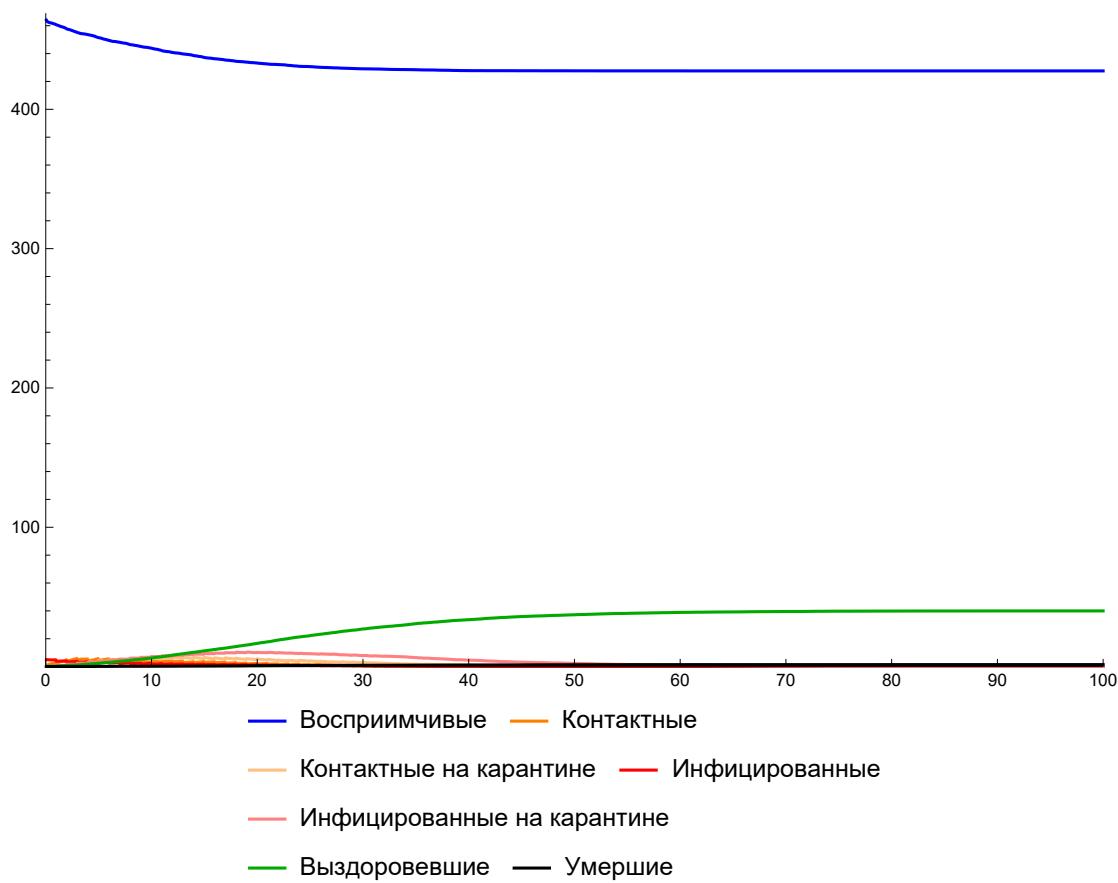
Уровень тестирования от населения - 20%, время ввода меры - с первого дня.

```
In[409]:= seirdq1hn5mtr20p=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr20p.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr20p=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.2,16,15,100];*)
```

График

In[410]:= SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr20p, 16, 10]

Out[410]=



Уровень тестирования от населения - 20%, время ввода меры - через неделю от начала.

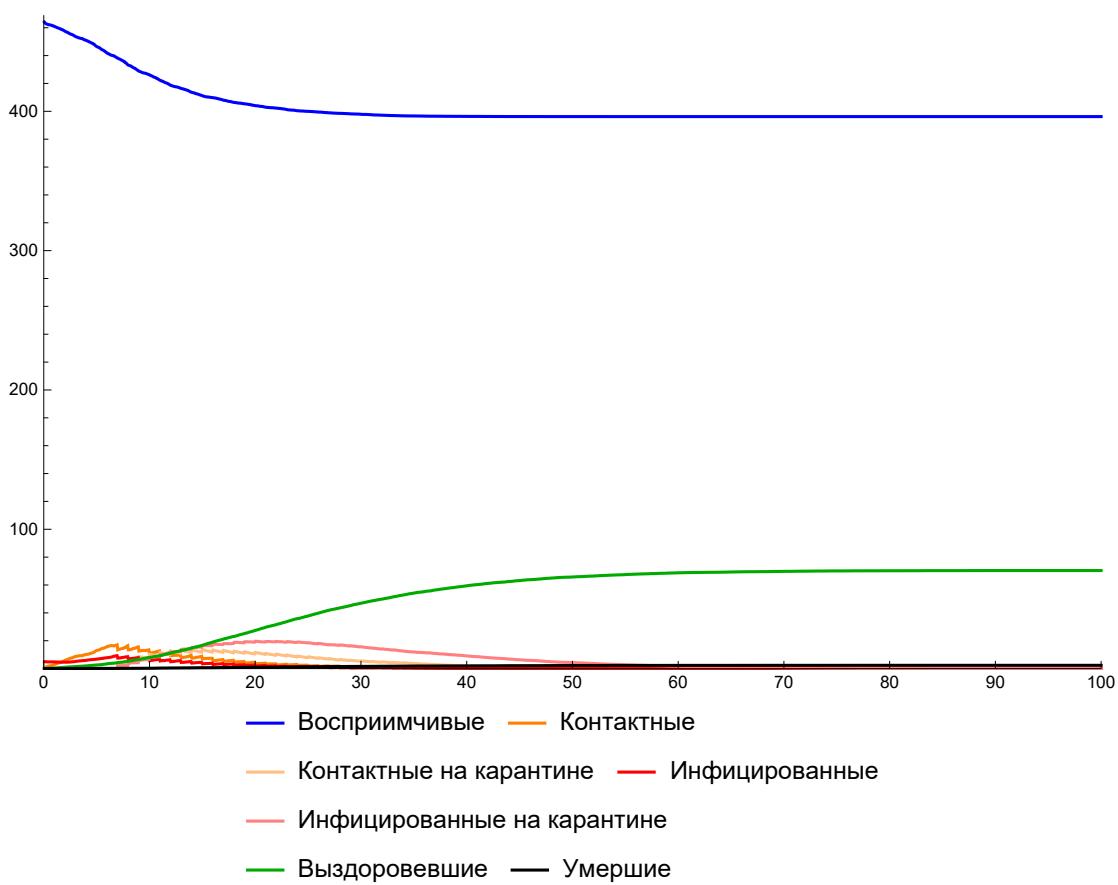
In[411]:= seirdq1hn5mtr20p7d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr20p7d.m"}]]; (*seirdq1hn5mtr20p7d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100], DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\u03b51h,\u03b31h,0.03,0.2,16,15+16 6,100];*)

График

In[412]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr20p7d, 16, 10]

Out[412]=



Уровень тестирования от населения - 20%, время ввода меры - через две недели от начала.

In[413]:=

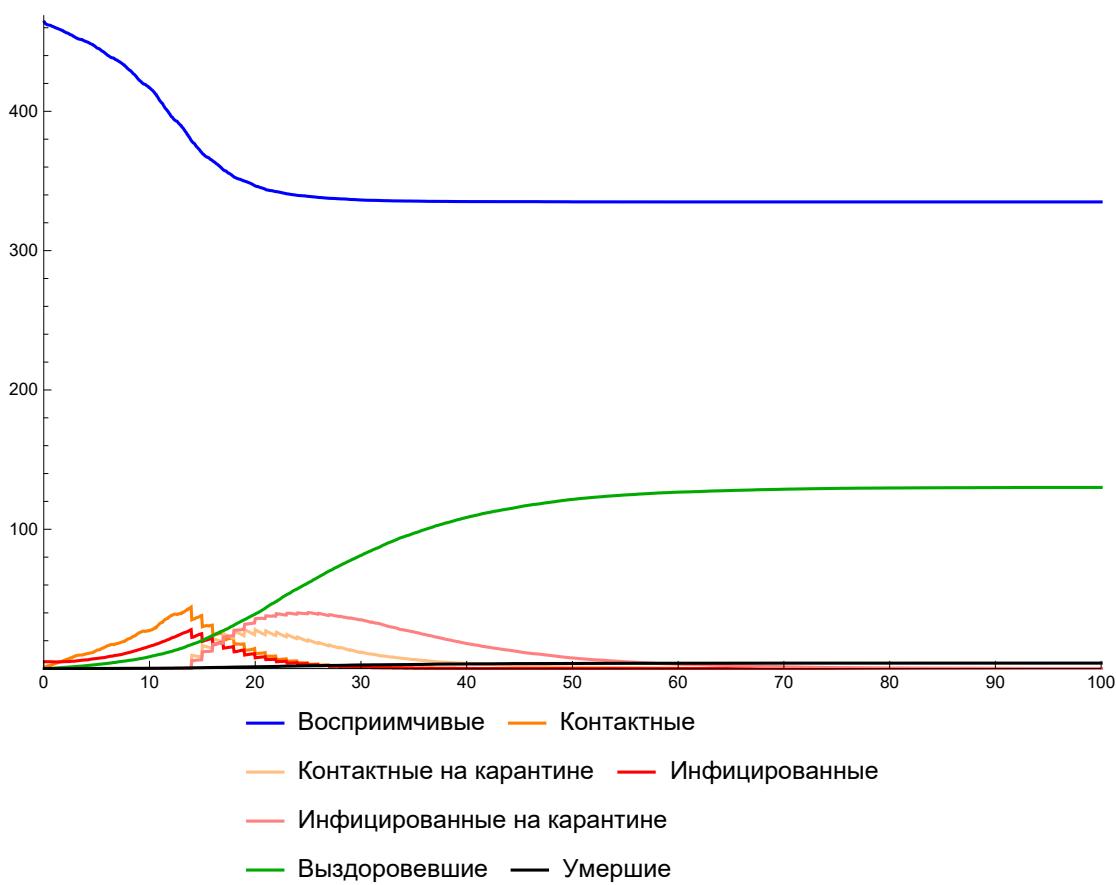
```
seirdq1hn5mtr20p14d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr20p14d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr20p14d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.2,16,15+16 13,100];*)
```

График

In[414]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr20p14d, 16, 10]

Out[414]=



Уровень тестирования от населения - 20%, время ввода меры - через три недели от начала.

In[415]:=

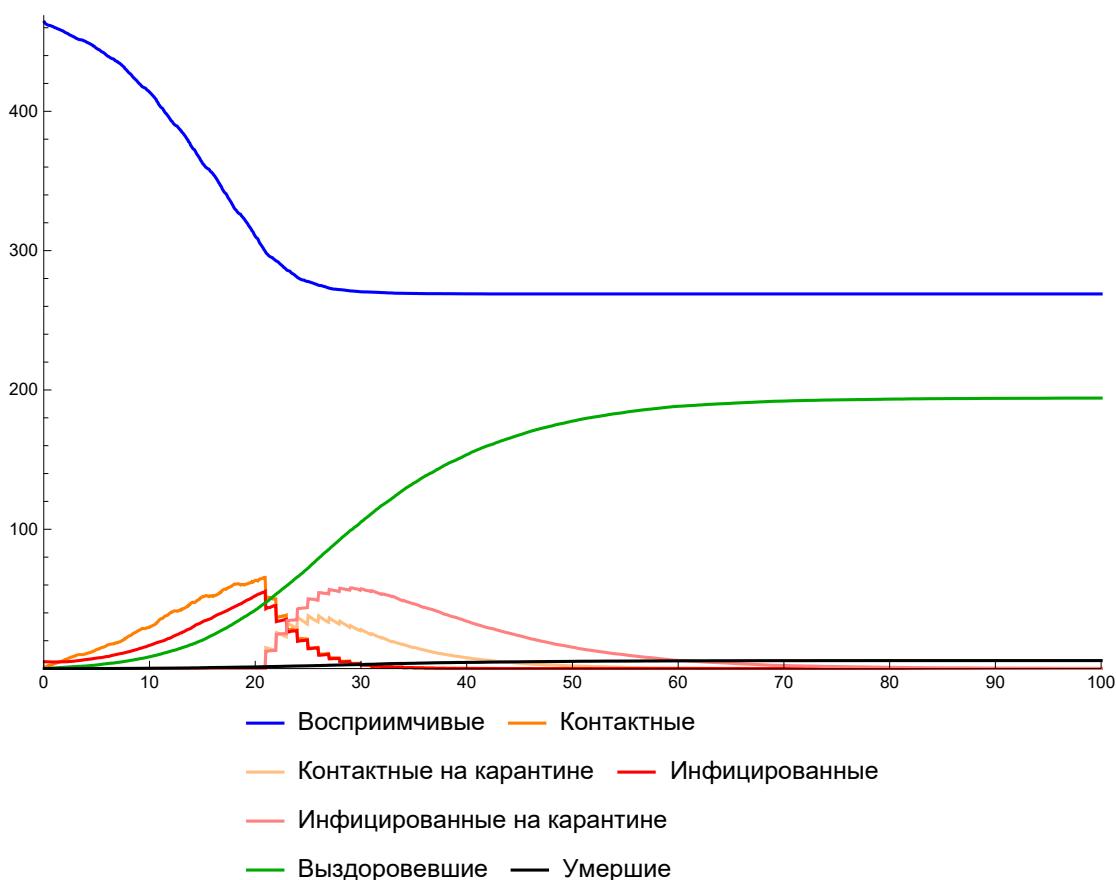
```
seirdq1hn5mtr20p21d=Import[FileNameJoin[{NotebookDirectory[], "seirdq1hn5mtr20p21d.m"}]];
(*seirdq1hn5mtr20p21d=SEIRDmod[DA[up1h5m[[1]],16 100],
DA[up1h5m[[2]],16 100],vertexcount,5,1,\[Epsilon]1h,\[Gamma]1h,0.03,0.2,16,15+16 20,100];*)
```

График

In[416]:=

SEIRDQplot[seirdq1hn5mtr20p21d, 16, 10]

Out[416]=

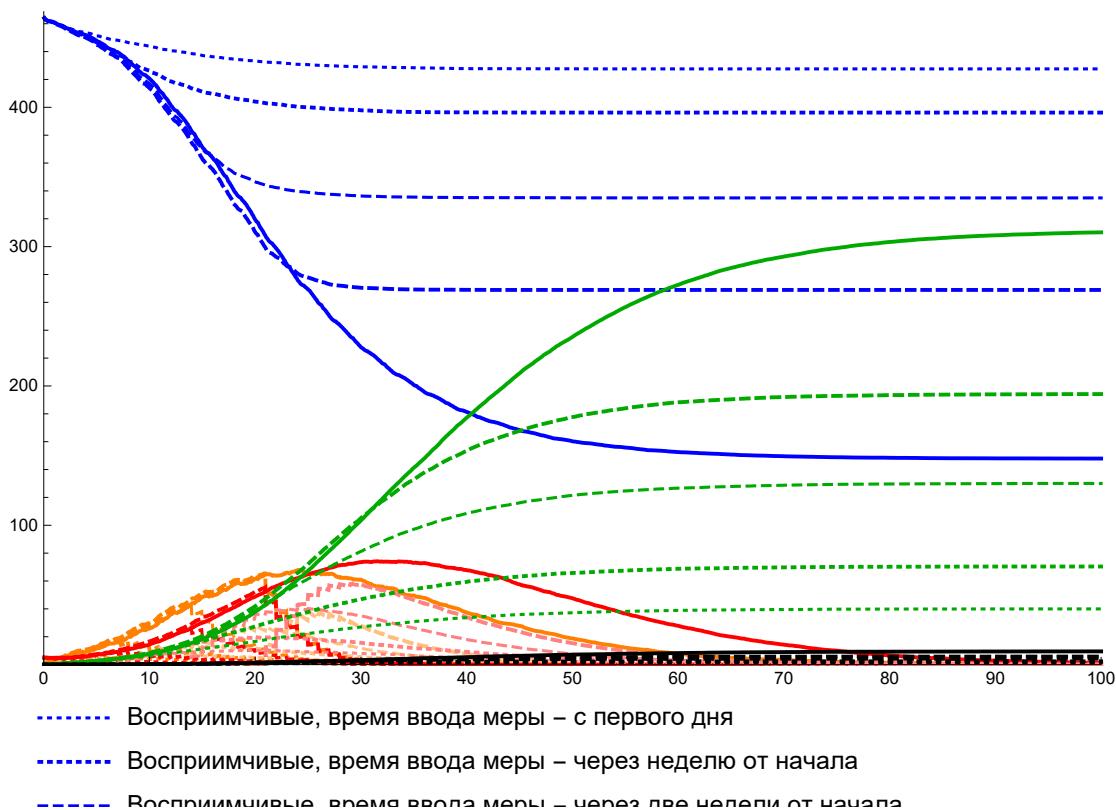


Наложение графиков

In[417]:=

SEIRDQplotsum[seirdq1hn5mtr20p, seirdq1hn5mtr20p7d, seirdq1hn5mtr20p14d, seirdq1hn5mtr20p21d, seird1hn5m, 1]

Out[417]=



- Восприимчивые, время ввода меры – через две недели от начала
- Восприимчивые, время ввода меры – через три недели от начала
- Восприимчивые, без ввода мер
- Контактные, время ввода меры – с первого дня
- Контактные, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные, время ввода меры – через три недели от начала
- Контактные, без ввода мер
- Контактные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Контактные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Контактные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные, время ввода меры – через три недели от начала
- Инфицированные, без ввода мер
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – с первого дня
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через неделю от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через две недели от начала
- Инфицированные на карантине, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – с первого дня
- Выздоровевшие, время ввода меры – через неделю от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через две недели от начала
- Выздоровевшие, время ввода меры – через три недели от начала
- Выздоровевшие, без ввода мер
- Умершие, время ввода меры – с первого дня
- Умершие, время ввода меры – через неделю от начала
- Умершие, время ввода меры – через две недели от начала
- Умершие, время ввода меры – через три недели от начала
- Умершие, без ввода мер

ИТОГИ

ССЫЛКИ

- [1] <https://github.com/skissler/haslemere>
- [2] UK Office for National Statistics, “2011 Census summaries for towns and villages in Waverly”, tech. rep., 2011.
- [3] Centers for Disease Control and Prevention, “How Flu Spreads,” 2014.
- [4] http://crm.ics.org.ru/uploads/crmissues/crm_2012_2/12216.pdf
- [5] ???
- [6] Kermack, W. O.; McKendrick, A. G. (1927). “A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics”. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. 115 (772): 700-721.
- [7] <https://www.bmjjournals.org/content/370/bmj.m3223>

