

УДК 004.942

EDN

## Мультиагентное моделирование развития эпидемий и анализ методов противодействия их распространению

М.Ю. Сидляр\*, О.А. Ковалева, С.В. Ковалев

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,  
ул. Интернациональная, 33, Тамбов, 392000, Россия

\*E-mail:mlkmikl@yandex.ru

**Аннотация** В статье рассмотрены способы по противодействию развития эпидемии с помощью методов мультиагентного моделирования. Показаны и описаны алгоритмы реализации масочности, карантинности, вакцинации, дезинфекции, а также методы различной передачи инфекции от простого контакта до кашля и передачи методом касания к зараженной вещи. Показана таблица сравнительных характеристик глобальных параметров эпидемии по отношению к указанным мерам противодействия, а также основные графики количества различных состояний.

**Ключевые слова:** мультиагентное моделирование, эпидемия, вакцинирование, ношение масок, дезинфекция, карантин, индекс здоровья, экономическая эффективность.

## Multi-agent modeling of the development of epidemics and analysis of methods to counter their spread

M.Yu. Sidlyar\*, O.A. Kovaleva, S.V. Kovalev

Tambov state University named after G. R. Derzhavin, 33, Internazionalnaya,  
Tambov, 392008, Russia

\*E-mail:mlkmikl@yandex.ru

**Abstract** The article discusses ways to counteract the development of the epidemic using multi-agent modeling methods. Algorithms for the implementation of masks, quarantine, vaccination, disinfection, as well as methods for various transmission of infection from simple contact to coughing and transmission by touching an infected thing are shown and described. A table of comparative characteristics of the global parameters of the epidemic in relation to the indicated countermeasures is shown, as well as the main graphs of the number of different conditions.

**Keywords** multi-agent modeling, epidemic, vaccination, wearing masks, disinfection, quarantine, health index, economic efficiency.

## 1. Введение

Авторским коллективом была разработан программный комплекс мультиагентного моделирования для имитации распространения эпидемий. В программном комплексе предусмотрены различные типы передачи инфекции среди агентов. «Агент» — это искусственный объект, способный взаимодействовать с окружающей средой и другими объектами [1]. В частности, между агентами происходят взаимодействия, проходят действия в зависимости от времени – сценарий, а агенты играют роли – некоторые стандартные действия [2]. В нашем случае, были рассмотрены виды передачи инфекции между агентами. Правило непосредственного контакта, когда находятся на соседних клетках с точки зрения окрестности Мура [3], при этом один агент здоров, а другой болен, заражение идет не всегда, а только при условии срабатывания некоторой вероятности. Вероятность заражения у разных агентов различна, а максимальная вероятность настраивается [4]. Кроме этого, в программе рассмотрены еще два способа заражения методом опосредованного контакта через касание зараженных вещей, а также через краткосрочный взрыв кашля. Длина косвенного контакта в виде следа, тянущегося за больным агентом и вероятность заражения от такой клетки вводятся в виде числовых коэффициентов. Имея несколько способов заражения агентов, эпидемия развивается стремительно, шансов остаться здоровым у агента ничтожны, а в случае наличия летальности-смертности есть большая вероятность разрушить социальное общество после эпидемии.

## 2. Постановка задачи

Разработать методы противодействия развития эпидемической угрозе. Рассмотреть их сравнительные характеристики, сделать выводы о наиболее успешных типах противодействия.

## 3. Методы исследования

В программном комплексе авторами были разработаны методы противодействия эпидемической угрозе. Рассмотрим, для примера одноволновое распространение эпидемии с летальностью. В нашем случае, у агентов будут состояния «здоров» (восприимчивый), «болен», «выздоровевший» (эти люди приобретают иммунитет к заболеванию), а также состояние «летальность» [5].

Рассмотрим модели и способы, уменьшающие вероятности развития заболеваний. Агенты на гео-плоскости в компьютерной реализации можно представить в виде массива записей, каждая запись которой характеризует свойства агента в виде координат на плоскости, состояния, внутреннего времени, а также дополнительная служебная информация. В качестве второго массива со своими характеристиками мы вводим еще массив пространства, в котором отдельно от живых агентов, собирается текущая информация о вероятностях заражения, а также о затухающих процессах заболевания на плоскости. Переходы из состояний срабатывают по считыванию временного датчика, кроме этого, имеются сценарии случайных процессов при взаимодействии агентов.

Параметр карантинности, который показывает действия агентов после заболеваемости. Первое – ограничение в движении. Агенты теряют половину своей мобильности в качестве вариантов есть минимальность движения, при котором длина шага становится равной 1, или полное отсутствие движения длина шага равна 0. Эти ограничения характеризуют ситуацию ограничение скорости географического распространения от больного агента. Параметр 0 (ноль) можем не только понимать как полное отсутствие движение (постельный режим), но и при наличии масштаба – жесткий карантин агента внутри квартиры.

Карантинность с переходом – соответствует, уходу агента на карантин в «красную зону» или в специальное лечебное заведение. Зоны карантина и вместимость их описаны на графических картах заранее, при считывании графических файлов в противном случае агенты сдвигаются в начало координат.

Масочность – агент, может быть, в состоянии наличия средств индивидуальной защиты и без указанных средств. При этом, маска понижает вероятность распространения заболевания от больного агента (настраиваемые значения 0, -2, -4, 1/2, 1/3), а также снижает вероятность заболевания у еще здорового при контакте (значения 0, 1, 2, 3, 1/2). Маска при кашле у больного – полностью блокирует распространение кашля.

Вакцинация – переводит «здорового» агента в состояние вакцинированного с тем вариантом сценария, при котором агент больше никого не заражает, а при окончании своей болезни гарантированно выздоравливает, не умирая (даже, если есть летальность) с гарантированным иммунитетом к болезни (или большим процентом

указанного иммунитета в общем случае). Вакцинация в системе происходит по мере нажатий командной клавиши, при этом настраиваемый процент от числа всех здоровых агентов случайным образом идет в состояние «вакцинированного». Процесс «Автовакцинация» отличается прежде всего тем, что можно указывать номера дней для вакцинации через запятую, или указывая диапазон дней через тире. При этом, в первом случае в одном дне (60 итераций) возможно проведение до трех слотов вакцинации. Имеется экономический вид вакцинации, которая включается в тот момент, когда линия «экономической эффективности» будет ниже определенного параметра. «экономическое взаимодействие» вычисляется от состояния агента, являясь «индексом здоровья» агента, в частности в качестве начальных значений выбраны – 100 здоровый агент, 20- больной, 40 – вакцинированный, 80 – вылечившийся, и минус 50 (-50) в положении летальность. Экономическая эффективность сама по себе является глобальным параметром, собирающей в себя все «индексы здоровья» каждого агента в каждый момент времени, показывающее какую разрушительную нагрузку оказывает на общество развитие эпидемической активности. Нахождение итогового значения экономической эффективности показывает, справилось ли общество с эпидемической активностью после проведенных медицинских мер и какой суммарный ущерб при этом принесен в процентах.

При опосредованном контакте, при котором агент на гео-карте оставляет предметы «следы», которые могут заражать других еще восприимчивых агентов, а также в случае кашля, который резко заражает вокруг себя зону с повышенной вероятностью заражения, которая быстро – за несколько итераций уменьшает свои характеристики. Для нейтрализации этого способа заражения в программном комплексе реализован способ очистки гео-карты, на которой перемещаются агенты от информации о кашле и следе. При этом, ширина настраиваемого квадрата и количество (агентов) можно выбирать в настройках. От текущего положения агента (если он здоров) производится дезинфекционные мероприятия, снимающие вероятности заражения с карты. Этот подход помогает снизить вероятность заражений и количество заражающих объектов в совокупной области.

Масочность, карантинность, вакцинация имеют своим параметром процент агентов, соответствующий этому медицинскому противодействию эпидемии. Например, процент 15% означает, что 15 процентов всех агентов соблюдают масочный

режим и вероятность заразиться и заразить у них ниже, чем у остальных агентов, что маски не используют. Карантинность 15% - означает, что во время заражения агент с вероятностью 15% будет посажен на карантин, ограничивающий движение или перемещен в «красную зону» (в зависимости от выбранной опции). Вакцинация в 15% означает, что каждый день из всех доступных к вакцинации агентов (только здоровых-восприимчивых к болезни) рассчитывается ровно 15%, после чего их состояние переводится в состояние «вакцинации» и выздоровление идет без летальности с гарантированным иммунитетом.

#### 4. Полученные результаты

Рассмотрим совокупную Таблицу1 всех противодействий с учетом того, что размер 100x100, плотность населения 20% (2000 агентов) Стартовое количество зараженных – 5 агентов. Параметры движения: случайный. Радиус движения 4. Движение идет в пустую точку. Имеется летальность: длительность 140 итераций (частота 10). Вероятность летальности 15/1000. Вероятность заражения 16/1000. Длительность протекания заболевания 780 итераций. Заражение следом: длина следа 12, максимальная вероятность заразиться кашлем 50/1000 при частоте кашля 1 раз в 15 итераций. Рассмотрим случай одноволнового заражения. В таблице в колонках соответственно указаны тип противодействия, сколько дней длилась эпидемия, количество и процент здоровых агентов, которые ни разу не заболели и не оказались вакцинированными, количество вакцинированных агентов, летальность количество и процент, количество зараженных кашлем, количество зараженных следом (через зараженный предмет), параметр экономической эффективности минимум и итоговое значение.

В строках показаны различные типы противодействия, включающие несколько видов одинакового взаимодействия, но с различными дополнительными параметрами, так и несколько вариантов комплексного варианта противодействия эпидемической активности.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов противодействия.

Противодействие	День эпидемии	Здоровых	Вакцинировано	Летальность	Кашель	След	Мин. Эконом. Эффект	Итого Эконом. Эффекта
Нет противодействия	28	-	-	397 19,85%	801	87	19,2%	54,19%
Карантин 15%. ½ ограничение движения	28	-	-	386 19,3%	760	120	16%	54,9%
Карантин 50%. 1 - ограничение движения	27	-	-	417 20,85%	786	71	15%	52,89 %
Карантин 75% 0 - ограничение движения	27	-	-	435 21,75%	784	72	14%	51, 725%
Карантин 40%. + переход. 0-ограничение движения	34	-	-	421 21,05	729	152	15%	52,63%
Карантин 80%. + переход. 0-ограничение движения	51	25 1,2%	-	398 19,9%	684	170	26%	54,3%
Карантин 95%. + переход. 0-ограничение движения	151	723 36,5%	-	243 12,15%	541	79	69%	71,45%
Дезинфекция. 5-агентов радиус 6	30	-	-	373 18,65%	739	114	15%	55,75%
Дезинфекция. 15-агентов, радиус 12	28	-	-	403 20,15%	758	73	16%	51,66%
Масочность 40% $r_1=4$ $p_2=3$	30	-	-	406 20,3	784	101	17%	53,6%
Масочность 60% $r_1=1/2$ $p_2=1/2$	38	12 0,6%	-	395 19,75%	748	123	18%	54,4%
Масочность 95% $p_1=1/2$ $p_2=1/3$	76	76 3,8%	-	380 19,3%	710	136	37%	55,15%
Вакцинация 5%. Дни 2-6	25	-	350	345	656	130	20%	53,8%
Вакцинация 10% Дни: 2,2,3,3,4,4,5,5	28	-	960	216 10,8%	357	78	29%	73,160 %
Вакцинация 15% диапазон дней 10-30	25	-	3	394 19,7%	828	101	18%	54,41%
Вакцинация 7% диапазон дней: 1-30	29	-	590	296 14,8%	482	115	29%	65,23%
Экономическая Вакцинация 7% старт 95%	27	-	970	225 11,25%	390	90	28%	72,65%
Экономическая Вакцинация 15% старт 98%	34	1	1680	65 3,2%	92	30	39%	88,393 %
Масочность 40% $p_1=1/2$ $p_2=1/2$ Вакцинация дни 3-10 7%	32	1	520	269 13,45%	543	60	25%	66, 455%

Карантин 40% ограничение 1 Дезинфекция 6- агентов. радиус 5.								
Масочность 66% $r_1=1/2, r_2=1/2$ Вакцинация 2,2,3,3,4,4,5,5 12% Карантин 55% +переход Дезинфекция 14 радиус 8.	69	291 14,55%	1170	110 5,5%	410	76	59%	84,53%
Масочность 75% $r_1=1/2, r_2=1/3$ Вакцинация 2,3,4,4,5,5,6,6,7,7 10% Карантин 66% +переход Дезинфекция 15 радиус 10.	57	536 26,8%	345	20 1%	350	100	58%	94,17%

В строках представлены карантин 15%, 1/2 - ограничение, означает, что как только агент заболел, с вероятностью 15% у него применяются карантинные меры, заключающиеся в ограничении движения на половину длины его обычного максимального радиуса шага. Карантин 15%. Ограничение 1 – показывает, что максимальный шаг заболевшего агента равен 1, то есть ограничиваем скорость перемещения. Ограничение 0 – оставляет агента на жестком карантине в домашних условиях без права выхода. Карантин + переход – означает, что агенты при этом перемещаются в красную зону в примерах, рассчитанных на таблице, все агенты перемещались в ячейку – начало координат. Дезинфекция 5 агентов, радиус 6. Указывает, что дезинфекция проводится 5 здоровыми каждый раз случайными агентами, радиус дезинфекции составляет 6 клеток. Расстояние радиуса понимается метрикой П.Л. Чебышёва – иными словами у нас квадрат со сторонами в 12 клеток и центром в здоровом агенте. Масочность 40%  $r_1=4$   $r_2=3$  показывает сколько агентов носят средства защиты в виде масок и перчаток: параметр  $r_1$ - показывает на сколько уменьшается вероятность заразить у того кто заражает,  $r_2$  – на сколько (во сколько раз) уменьшается вероятность заразиться у здорового агента. В нашем примере: 40% из всех агентов носят маски, вероятность заражения от каждого больного агента в маске уменьшается на 4(на 4 тысячные), а устойчивость к заражению здорового агента увеличивается на 3 единицы (на 3 тысячные). Масочность 60%  $r_1=1/2$   $r_2=1/2$  - 60% агентов в масках, вероятность заразить и заразиться падают в два раза. Вакцинация 5%.



Дни 2-6 – означает, что вакцинируются агенты 5% от всех здоровых со 2 по 6 день по одному разу в сутки. Вакцинация 10% Дни: 2,2,3,3,4,4,5,5 показывает, что вакцинационные мероприятия идут 2,3,4,5 день по два раза в сутки – каждый раз медицинские мероприятия проходят у 10% всего возможного к вакцинации населения. Экономическая вакцинация 15% старт 98% показывает автоматическое включение вакцинации с 98% экономической эффективности, при этом вакцинируются 15% всех здоровых агентов. В нижних строках представлены комбинированные методы, учитывающие все медицинские меры по противодействию эпидемии.

Сразу оговоримся, что числа в таблице абсолютные при каждом опыте, в котором агенты заполняются случайно, движутся случайно, а заболевание, и другие процессы ставятся в зависимость от вероятности заражения, вероятности летальности при следующем опыте будут другими. Однако, движение агентов, как броуновских молекул, в своей случайности дает закономерности. Линии экономической эффективности как глобальные параметры при одном и том же опыте чертят линию минимально отличающуюся, а ее минимум в днях и итоговое значения не зависят от случайности выбора агентов. Ровно, как и глобальный параметр длительности, все эпидемии считаются в днях (в дне 60 итераций) показывает устойчивый результат. Количество оставшихся здоровых, вакцинированных, зараженных следом и кашлем, перешедших в состояние летальности в абсолютных числах различаются, а процент разброса минимальный для каждого проведенного опыта. Сравнение методов показывает изменение этих параметров.

Из таблицы видим, что без медицинских мер, а только по ограничению движения первые три строки с карантинами не приводят к существенному улучшению положения. Заслуживает внимание способ карантина 80% с переходом в изоляционную точку – он оставляет здоровых менее 2%, а значение экономической эффективности падает, но уже до отметки 26%, что низко, но уже значительно лучше, чем в стартовом случае, при этом, скорость распространения эпидемии замедлилась до 51 дня. Вариант жесткого карантина с перемещением в красную зону – у всех, кто заболел 95% приводит к более интересному результату: здоровых остается 723 (36,5%) при том, что экономическая эффективность не упала до 69%, а итоговая составляющая стала 71,45% при летальности в 12%, что в половину меньше чем в предыдущих случаях. Эпидемия продолжалась 151 день. Модель напоминает распространение эпидемии с жесткими



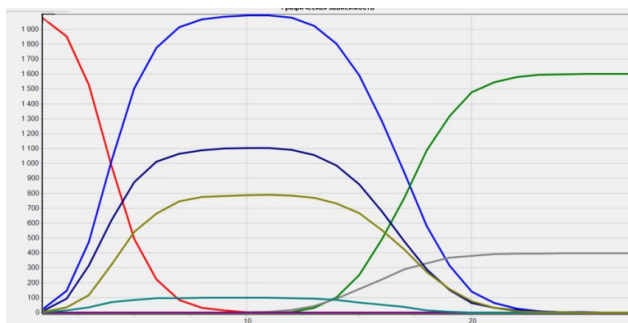
ограничительными мерами в Китае с жесткой изоляцией и минимальными итоговыми последствиями в экономике без применения терапевтических и каких-то медицинских средств борьбы. Как видим, далее простая дезинфекция уменьшает количество агентов, заразившихся от следа и кашля, но эффективность одной этой меры недостаточно, чтобы изменить статистические характеристики здоровых, умерших, длительности эпидемии и итоговой экономической линии. Ношение масок слегка уменьшает характеристики итоговые. Главное, что при хороших масочных и защитных мероприятиях увеличивается длительность эпидемии, а здоровых агентов остается в самом жестком случае и в самых лучших масках 4% от всего населения, при этом минимум экономической линии не упал ниже 37%. Этот уровень критический для экономики страны, но уже намного лучше, чем стартовые 19,2%. На летальность ношение масок влияет, уменьшая, но не сильно.

Вакцинация 5% со 2-6 день, то есть в тот момент, когда эпидемия смогла быть обнаружена, при этом проводилась недостаточно активно и быстро закончилась. Было вакцинировано 350 агентов, которые потом получают иммунитет, не осталось здоровых агентов – их тоже вакцинировали, экономическая эффективность составила минимальные отличия от случаев с отсутствием медицинских взаимодействий, ровно как и поздняя вакцинация с большим процентом 15%, но начавшаяся после 10 дня – не сыграла роли – только 3 агента вакцинированы. Заслуживают внимания непрерывная вакцинация 7% с диапазоном дней: 1-30. Вакцинируются агенты первый месяц каждый день по 1 разу - 7% от всего доступного к вакцинации населения. Летальность понизилась до 14,8%, уменьшилось заражение кашлем. В итоге вакцинировано 590 агентов, 29% агентов минимальное число экономической эффективности, 65,23% ее итоговый процент. Лучший вариант вакцинации – усиленная вакцинация первую неделю после обнаружения 2,2,3,3,4,4,5,5 с 10% от здоровых агентов, в итоге главный экономический параметр составил 72,65%, при этом летальность составила 216, что около 10% от всего населения. Эковакцинация, которая оперативно срабатывает и не снимается до конца эпидемии, показывает отличные результаты: более 70% итоговый экономический параметр, а в жестком случае летальность доходит до 65 агентов, что составило 3,2% от общего количества агентов. Комбинированные случаи, в которых соблюдался баланс между свободой агентов и их ограничениями, показывает значительный результат в обоих случаях. В самом жестком из приведенных вариантов:

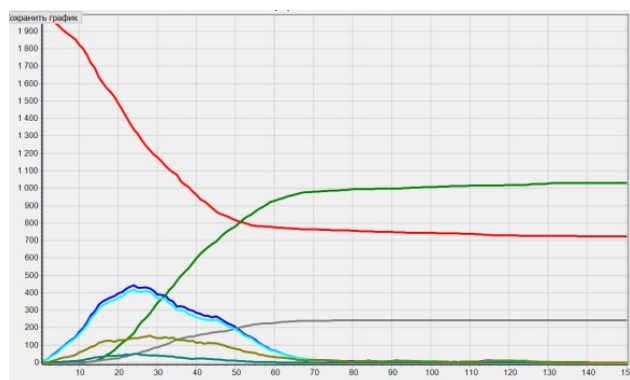
при соблюдении масочности 75%, активной начальной вакцинации в первую неделю после обнаружения, 66% карантин с перемещением в красную зону и дезинфекционные мероприятия, сбивающие процент заражения, дал в результате летальность в 1%, а здоровых – совсем не болевших 536 (26,8%), при этом на долю вакцинированных 1170 (пришлось 58,5%) минимальное падение экономического параметра до 58%, а итоговый параметр получился на уровне 94,17%. Общее падение экономических показателей от прохождения эпидемии, от заболевания и смертности агентов, составляющих общество, не превысило 6%.

На рисунке 1 показан график изменения количества агентами в состояниях: красный – здоровый, «синий» - больной, «зеленый» - выздоровел, коричневый – «кашель», «темно-зеленый» - заражение следом, «серый» - летальность.

На графике 2 карантин 95% видим линию красного цвета (линия здоровых агентов, которая стабилизировалась с 50 дня на уровне 750 и до конца эпидемии не упала до уровня 700, уровень летальности был стабилен с 60 дня, пик заражения пришелся на 22 день, после чего эпидемия начала спадать.



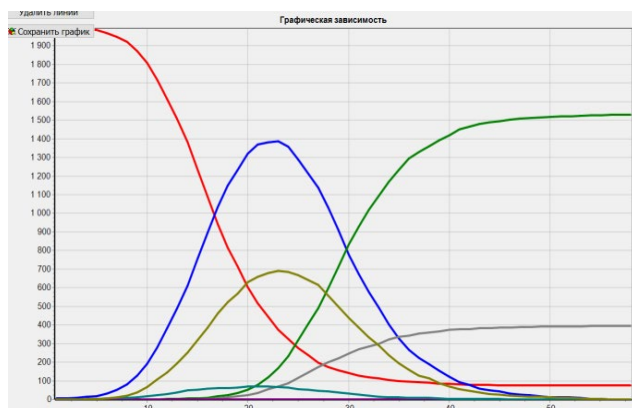
**Рисунок 1.** Нет медицинского противодействия.



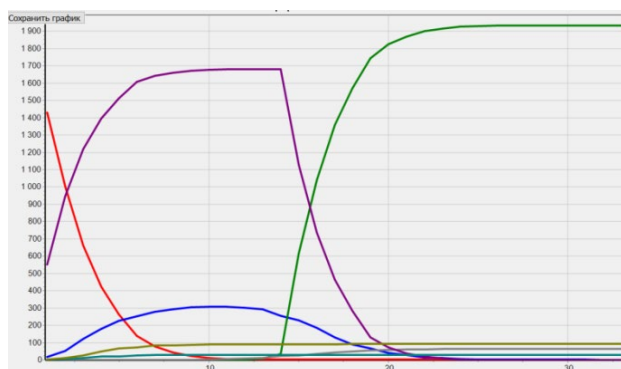
**Рисунок 2.** Карантин+ 95%.

На рисунке 3 показано применение масок, соответствующий строке таблице: «масочность 95%  $p_1=1/2$   $p_2=1/3$ », обращаем внимание на более медленный рост

больных (синий график), а также медленный рост летальности с последующей стабилизацией. На рисунке 4 – резкий рост выздоровевших, минимальный уровень смертности и стабилизация зараженных с 5 по 16 день, так называемое «плато». Достигается жесткой вакцинации с момента обнаружения и не прекращающейся до конца эпидемии. Фиолетовый график – рост вакцинированных.



**Рисунок 3.** Масочность 95%,  $p_1=1/2, p_2=1/3$ .



**Рисунок 4.** Эковакцинация 15%. Старт с 98%.

На рисунке 5 Показан комбинированный метод противодействия, описанный в последней строке таблицы с минимальной итоговой летальностью и максимальным уровнем линии экономической эффективности.

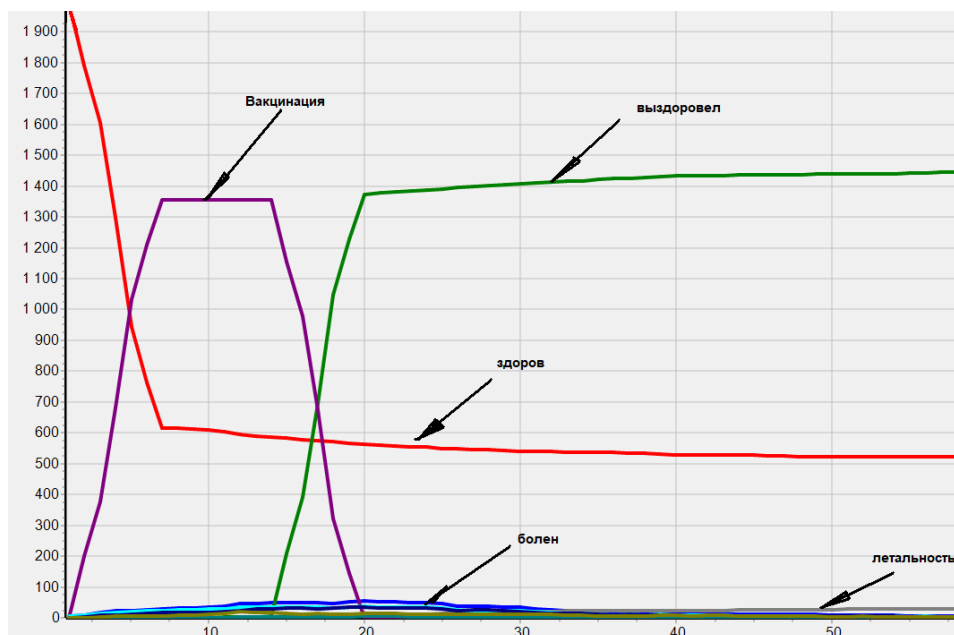


Рисунок 5. Графики состояний агентов при комбинированном противодействии.

## 5. Выводы

Разработанный программный комплекс по распространению эпидемических ситуаций рассмотрены типы противодействующие распространению угрозы. В каждом методе были рассмотрены максимальные случаи для увеличения значения «индекса здоровья» каждого агента, а также значения функции «экономической эффективности». Рассмотрены случаи по стабилизации эпидемии при комплексном применении всех указанных методов.

## Список литературы

1. Петрова И.Ю. Методика проектирования мультиагентных систем и модулей на основе генератора мультиагентных систем / И.Ю. Петрова, А.Д. Кравец // Перспективы развития строительного комплекса. – 2015. – № 1. – С. 79-85.
2. Гладков Л.А. Эволюционирующие многоагентные системы и эволюционное проектирование / Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – № 4 (214). – С. 48-59.
3. Оськин, А.Ф. Моделирование эпидемии с помощью клеточных автоматов / А.Ф. Оськин, Д.А. Оськин // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2021. – № 4. – С. 29-34.

4. Судаков В.А. Имитационное моделирование распространения вируса с использованием мультиагентного подхода / В.А. Судаков, Т.В. Сивакова // Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАИ'2022). Материалы конференции. Москва, 2022. – С. 401-403.
5. Баран В.И. Имитационное моделирование процессов развития пандемии / В.И. Баран, Е.П. Баран // Вестник Российского университета кооперации. – 2021. – № 3(45). – С. 9-13.