

С.В. Дианов¹, А.Н. Швецов²¹Вологодский научный центр Российской академии наук,²Вологодский государственный университет

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НЕОТЛОЖНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

Работа поддержана грантами РФФИ № 20-010-00852 А, № 18-47-350001 р-а и № 19-01-00103 А

В статье рассматриваются вопросы построения имитационных моделей служб неотложной медицинской помощи. Представлен процесс разработки агент-ориентированной модели скорой медицинской помощи для Сокольского муниципального района Вологодской области. Приведены результаты экспериментов по оптимизации количества одновременно работающих бригад скорой медицинской помощи с использованием разработанной модели.

Неотложная медицинская помощь, агент-ориентированное моделирование, оптимизация.

В настоящее время существует устойчивый тренд увеличения количества публикаций по компьютерному моделированию в области здравоохранения вообще и экстренной медицины в частности [1]. С одной стороны, это говорит о востребованности таких моделей. С другой стороны, до сих пор они не находят должного практического использования. При этом можно утверждать, что моделирование организационных аспектов медицинской практики должно стать точно такой же нормой, как и моделирование в клинической практике. От этого также в значительной степени зависит конечный результат – спасение жизни и здоровья людей.

Применительно к системам здравоохранения в основном используются четыре подхода к компьютерному имитационному моделированию: метод Монте-Карло, системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агент-ориентированное моделирование. Соответствующий выбор осуществляется на основании анализа моделируемой системы или проблемы. При этом основными факторами являются:

- 1) необходимость учета изменения системы во времени (динамические и статические модели);
- 2) способ учета изменения системы во времени в динамических моделях: непрерывно или дискретно;
- 3) способ формирования событий в системе: детерминированный (возникают в соответствии с определенным законом, либо предопределены ходом предыдущих событий) или стохастический (возникают случайным образом).

Моделирование по методу Монте-Карло – это метод моделирования, основанный на повторяющейся статистической выборке для приблизительного решения количественных задач. Оно особенно полезно для моделирования явлений со значительной изменчивостью входных вероятностей, систем с большим количеством неопределенных параметров,

а также в тех случаях, когда невозможно вычислить точный результат с помощью детерминированного алгоритма. Таким образом, метод Монте-Карло является статическим методом, подходящим для тех проблем принятия решений, в которых течение времени не играет существенной роли. Он хорошо подходит для моделирования медицинских решений и количественной оценки выгод или рисков, связанных с ними [2].

Моделирование и симуляция системной динамики направлены на понимание совокупного поведения системы с течением времени [3]. Это особенно полезно для понимания динамической сложности поведения системы. Ключевое различие между данным подходом и другими рассматриваемыми здесь подходами, ориентированными на моделирование динамических процессов, заключается в том, что он фокусируется на моделях поведения, генерируемых структурой обратных связей внутри системы, а не на влиянии в значительной степени случайных внешних событий. Его целью часто является прогнозирование качественного характера производительности системы (например, перерегулирования и коллапса, затухающих колебаний, неустойчивых колебаний, хаотического отклика), а не конкретных числовых результатов. Системное динамическое моделирование широко используется применительно к экстренной медицине, в основном для разработки долгосрочных стратегических моделей, предполагающих высокий уровень агрегации объектов, поскольку модели системной динамики рассматривают людей, товары, ресурсы и другие отдельные элементы как совокупность объектов.

Дискретно-событийное моделирование – это метод, используемый для моделирования эволюции состояния или поведения реальной системы в определенные моменты времени. Изменения в состоянии системы обусловлены событиями, которые

происходят мгновенно во времени в узлах или местах обработки. Данный метод является стохастическим (то есть вероятностным), динамическим (то есть изменяющимся во времени) и дискретным (то есть изменения состояния являются мгновенными событиями, разделенными временем) [4]. Он хорошо подходит для моделирования работы существующих или планируемых систем здравоохранения и медицинских учреждений, которые предоставляют диагностические и/или терапевтические услуги (например, лабораторные исследования) и других связанных процессов.

Агент-ориентированное моделирование используется для моделирования действий и взаимодействий «агентов» с целью оценки их воздействия на систему в целом. Генеративный характер моделей позволяет изучать системы на различных уровнях абстракции и обеспечивает следующие преимущества [5]:

- 1) способен отображать сложные явления, возникающие из простых правил;
- 2) обеспечивает естественное представление системы с минимальными ограничениями;
- 3) обеспечивает гибкость при описании допущений, касающихся агента и его среды.

Использование данного подхода позволяет моделировать реалистичные сценарии, в которых агентам разрешено изменять свое поведение, и, следовательно, обеспечивает надежное представление о работе системы в сценариях экстремальной рабочей нагрузки.

Существуют также гибридные модели, которые могут использовать несколько типов моделирования. Они позволяют получать результаты, более близкие к истинному поведению системы, за счет использования сильных сторон нескольких методов моделирования и возможности уменьшения ограничений, связанных с использованием одного типа моделирования. С их помощью можно имитировать индивидуальную изменчивость поведения пациентов и медицинских работников, сохраняя при этом сложное, совокупное поведение, демонстрируемое в системах здравоохранения. Например, подробный обзор совместного использования системной динамики и агент-ориентированного моделирования представлен в [6].

Система неотложной медицинской помощи существует для выполнения основных принципов оказания первой помощи, которые заключаются в том, чтобы сохранить жизнь, предотвратить дальнейшие травмы и способствовать выздоровлению человека. Ключевыми факторами успешного лечения являются: раннее обнаружение (представитель общественности обнаруживает инцидент), раннее оповещение (вызваны аварийные службы), раннее реагирование (аварийные службы быстро прибывают на место происшествия), хорошее медицинское обслуживание на месте происшествия (предоставляется соответствующее лечение), медицинское обслуживание в пути (пациент находится на пути в больницу), перевод на окончательное медицинское обслуживание (пациент передается на попечение врача). При управлении данными услугами необходимо учитывать различные факторы, такие как расположение и перемещение машин скорой помощи,

скорость принятия решений о назначении и маршрутизации машин для каждого вызова.

Наиболее серьезной задачей стратегического и тактического уровня планирования логистической деятельности скорой медицинской помощи является оптимизация расположения станций или отделений скорой помощи в пределах определенного района. Важность решения о наилучшем местоположении обусловлена тем, что результат лечения в экстренных случаях зависит от скорости оказания медицинской помощи. Во многих странах в качестве показателей, дающих представление об улучшении состояния больных, часто используют временные параметры работы скорой медицинской помощи, например среднее время доезда до пациента выездной бригады скорой медицинской помощи. Задача оптимального местоположения отделений скорой помощи относится к классу задач размещения объектов в заданном пространстве. Подходы к решению таких задач используют четыре характеристики [7]:

- клиенты (точки спроса), расположенные в узлах улично-дорожной сети территории;
- объекты обслуживания, также расположенные в узлах улично-дорожной сети территории;
- район расположения всех клиентов и объектов;
- метрика, задающая расстояние между узлами или время доезда до пациента выездной бригады скорой медицинской помощи от одного узла до другого.

В качестве целей задач размещения, как правило, выступают максимизация охвата территории обслуживания, что характерно для моделей покрытия, или минимизация среднего времени доезда до пациента выездной бригады скорой медицинской помощи.

Службы неотложной медицинской помощи представляют собой сложные системы, пытающиеся сбалансировать различные политические, экономические и медицинские интересы. Для их анализа применялись различные подходы, но именно имитационное моделирование обеспечивает более подробное описание системы и позволяет анализировать ее динамические характеристики. Это позволяет говорить о нем как о мощном инструменте принятия решений в сфере организации неотложной медицинской помощи.

Существует множество реализованных моделей служб скорой помощи. Большинство из них являются дискретно-событийными. При этом стоит отметить, что некоторые исследователи считают, что традиционные методы моделирования не всегда способны адекватно анализировать сложные системы. В этой связи они предполагают, что агент-ориентированное моделирование будет преобладающим подходом моделирования в будущем для подобных систем [8].

Данная проблема является актуальной и для Российской Федерации. Существующая в России система оказания населению скорой медицинской помощи включает в себя больше трех тысяч станций и отделений скорой медицинской помощи, в которых работают приблизительно двадцать тысяч врачей и больше семидесяти тысяч работников среднего медицинского

звена. Ежегодно служба скорой медицинской помощи обслуживает от сорока шести до сорока восьми миллионов вызовов, оказывая медицинскую помощь более чем пятидесяти миллионам граждан.

Вместе с тем сложившаяся к настоящему времени в Российской Федерации система организации скорой медицинской помощи населению недостаточно эффективна. Зачастую служба скорой медицинской помощи выполняет несвойственные ей функции, подменяя обязанности амбулаторно-поликлинической службы. Значительное количество выездов бригад скорой медицинской помощи к больным, нуждающимся в экстренном поддержании жизненных функций, на места происшествий выполняется недостаточно быстро. Специализированные врачебные бригады большую часть времени не задействованы или обслуживают непрофильные вызовы. Вышеперечисленные проблемы и еще много других недостатков существующей системы скорой медицинской помощи говорят о необходимости формирования нового подхода к ее организации. Среди наиболее острых проблем можно выделить низкий уровень оказания скорой медицинской помощи сельскому населению. И здесь серьезную поддержку должны оказывать компьютерные имитационные модели, позволяющие определять оптимальные характеристики элементов системы скорой медицинской помощи и их пространственного размещения.

Авторами статьи осуществляется реализация имитационной модели работы отделений скорой медицинской помощи в Сокольском муниципальном районе Вологодской области. По данным федеральной службы государственной статистики в Сокольском

районе на первое января 2019 года проживало 48 133 человека. Из них примерно 7 000 – сельские жители. На его территории расположены четыре амбулатории и четырнадцать фельдшерско-акушерских пунктов (рис. 1). Отделение скорой медицинской помощи располагается в городе Соколе и является отделением центральной районной больницы. В нем круглосуточно работают не менее пяти бригад скорой помощи.

В настоящее время на основе агент-ориентированного и дискретно-событийного подходов в среде AnyLogic создан прототип модели [9]. Так как в Сокольском районе малые деревни и села объединены в сельские поселения, то для упрощения модели в качестве точек, откуда может поступить вызов скорой помощи, выбраны административные центры сельских поселений. Кроме того, для реалистичности модели выбраны еще три деревни, расположенные максимально близко к границам Сокольского района:

- деревня Шулепово располагается севернее города Сокола в пятидесяти семи километрах от него. К ней ведет асфальтированная дорога в не слишком хорошем состоянии;

- деревня Вакориха располагается восточнее города Сокола. Путь до этой деревни примерно сто двадцать километров. Из них около шести километров – грунтовая дорога;

- деревня Лодейщик расположена восточнее города Сокола, путь до нее составляет сорок шесть километров, из которых двадцать пять – грунтовая дорога.

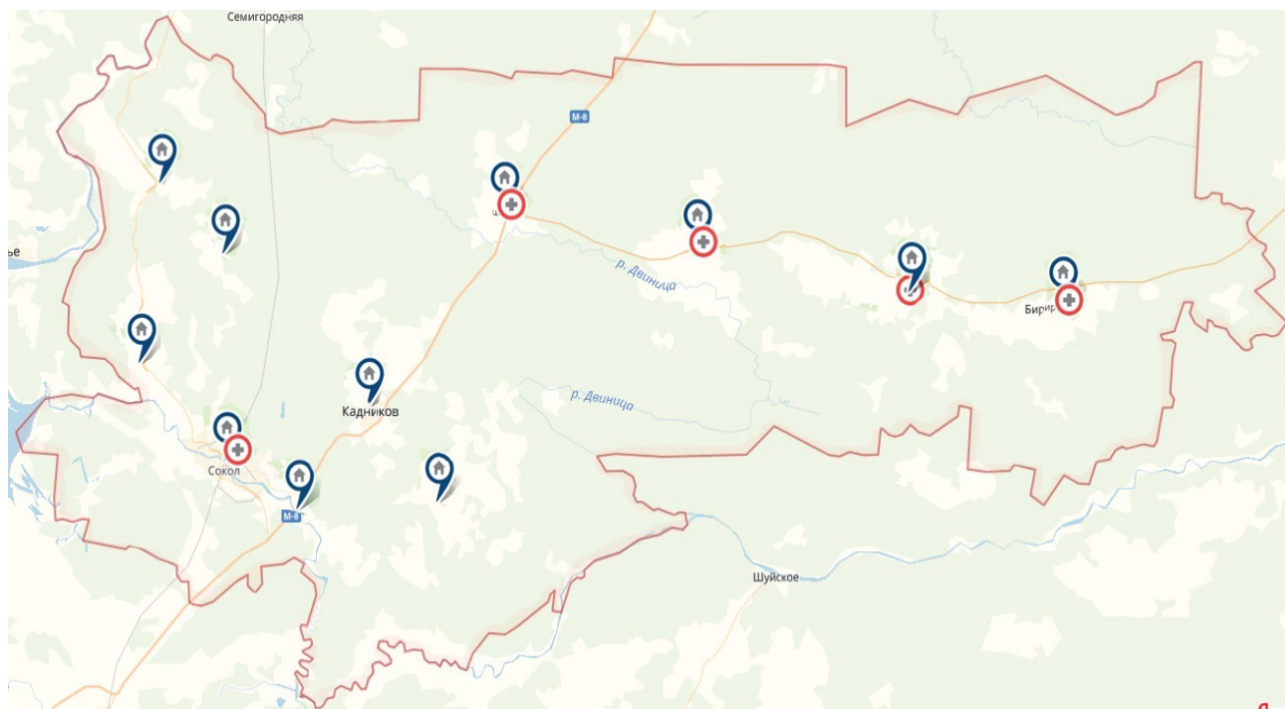


Рис. 1. Расположение отделений скорой помощи

В таблице приведен список всех населённых пунктов, отмеченных на карте, расстояние до районного центра и примерное время, за которое возможно добраться из города Сокола до указанного населенного пункта.

Таблица

Список населенных пунктов

Населённый пункт	Путь до г. Сокола, км	Примерное время в пути, мин
Деревня Шулепово	57	56
Село Архангельское	13	16
Город Сокол	0	0
Деревня Литега	15	20
Деревня Марковское	32	37
Город Кадников	20	24
Деревня Лодейщик	46	57
Деревня Чекшино	43	39
Деревня Воробьёво	61	53
Деревня Чучково	84	68
Село Биряково	98	79
Деревня Вакориха	120	95

Для реализации модели были созданы две популяции агентов, имитирующих население и машины скорой помощи. С целью обеспечения точности модели был использован механизм интеграции AnyLogic с ГИС-картами. Популяция агентов населения была привязана к географическому положению реальных населенных пунктов (рис. 2).

Реализован механизм изменения состояний агентов, с использованием которого происходит генерация вызова скорой помощи. Интенсивность вызовов определена на основе анализа сведений о деятельно-

сти бригад скорой медицинской помощи в Сокольском районе за два года: в 2016 году было выполнено 17 675 выездов, а в 2017 году – 16 660. С учетом того, что 2017 год был високосным, среднее количество вызовов скорой медицинской помощи в Сокольском районе за два года равно 47,61 вызовам в день. Так как обстоятельства, требующие вызова скорой помощи, складываются случайно и с постоянной вероятностью нахождения в малом интервале, то для задания интенсивности поступления вызовов использовано равномерное распределение.

Первоначальное местоположение популяции агентов машин скорой помощи с использованием той же карты привязано к географическому расположению отделения скорой помощи. С помощью интеграции с ГИС обеспечивается возможность задания перемещения машин скорой помощи не с использованием случайного заданного времени, а с учетом своей скорости и наличия дорог. Взаимодействие двух популяций агентов описывается с помощью дискретно-событийной диаграммы (рис. 3).

Параметры диаграммы определялись на основании следующих рассуждений. Общее затрачиваемое бригадами скорой помощи на каждый выезд время является случайной величиной. Его распределение по Сокольскому району за 2016 и 2017 годы представлено на рисунке 4.

Из гистограммы видно, что большая часть выездов занимала от двадцати одной до сорока минут. А меньше всего вызовов обслуживалось более часа. Для отображения этих данных в модели использована встроенная треугольная (triangular) функция распределения вероятностей (рис. 5).

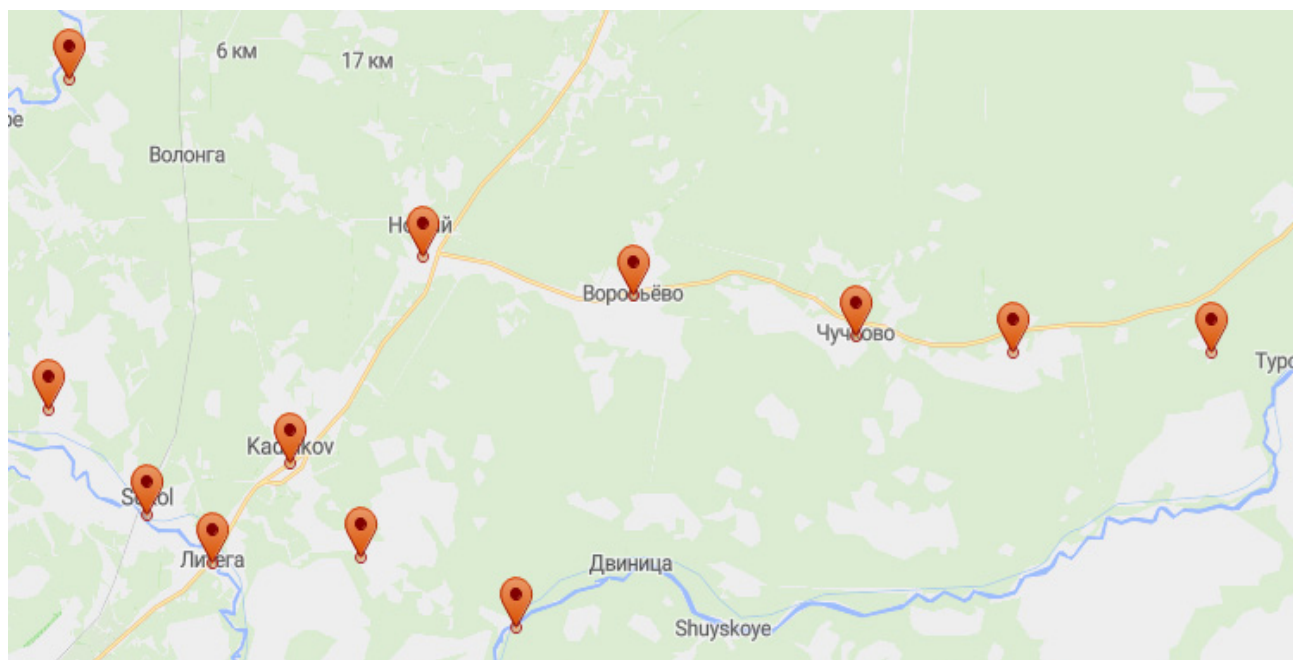


Рис. 2. Карта населенных пунктов

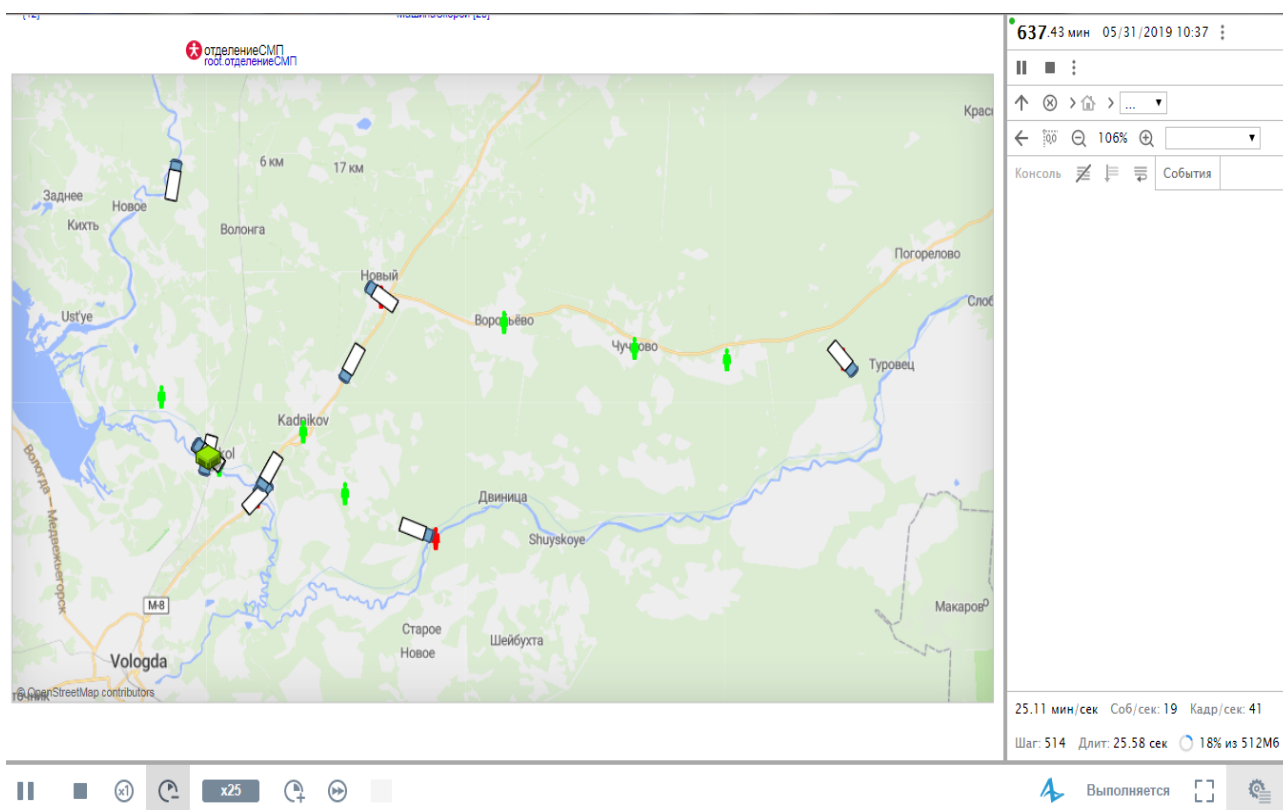


Рис. 6. Вид окна выполнения модели

Общий алгоритм работы модели определен следующим образом: генерируется вызов, поступающий в отделение скорой помощи; вызов передается свободной бригаде; машина скорой помощи доезжает до места вызова; вызов обслуживается; вызов уничтожается; бригада возвращается на станцию. Вид окна выполнения модели представлен на рисунке 6.

На основе разработанной модели был проведен ряд экспериментов с использованием текущих параметров работы станции скорой медицинской помощи (пример результата представлен на рисунке 7). Они свидетельствуют о том, что значение загрузки машин скорой помощи изменяется в пределах от 24 до 30 процентов. Это значит, что соответствующий ресурс используется не оптимально.



МашиныСМП
27%
14/20

Рис. 7. Средняя загрузка ресурса машин скорой помощи

Для определения оптимально необходимого количества автомобилей скорой помощи был проведен эксперимент с использованием встроенного в AnyLogic оптимизатора OptQuest. Он заключается в последовательном выполнении нескольких прогонов модели с различными значениями параметров и нахождении оптимальных для данной задачи значений параметров. Были определены следующие значения параметров: количество бригад скорой помощи – от 4 до 20; модельное время 300 дней. Результаты представлены на рисунке 8.

Максимально возможное значение средней загрузки было при использовании одновременно семи бригад скорой помощи. Средняя загрузка при этом была равна 77 %. Был проведен эксперимент с полученным оптимальным значением показателя количества машин скорой помощи. Значение средней загрузки ресурсов при этом варьировалось в диапазоне от 70 до 90 процентов.

Для получения более достоверных и полезных результатов авторы предполагают доработать модель: реализовать дифференциацию поступающих вызовов на экстренные и неотложные, реализовать возможность отправлять на вызов ближайшую к месту вызова машину, реализовать возможность доставки пациента в стационар и др.

Результаты проделанной работы могут быть использованы органами исполнительной власти при принятии решений по организации системы оказания неотложной медицинской помощи на уровне муниципальных районов.

СМП1 : Optimization

	Текущее	Лучшее
Итерация:	21	7
Функционал:	0.654	0.773
Параметры	Copy best	
КоличествоМашинСМП	1	7

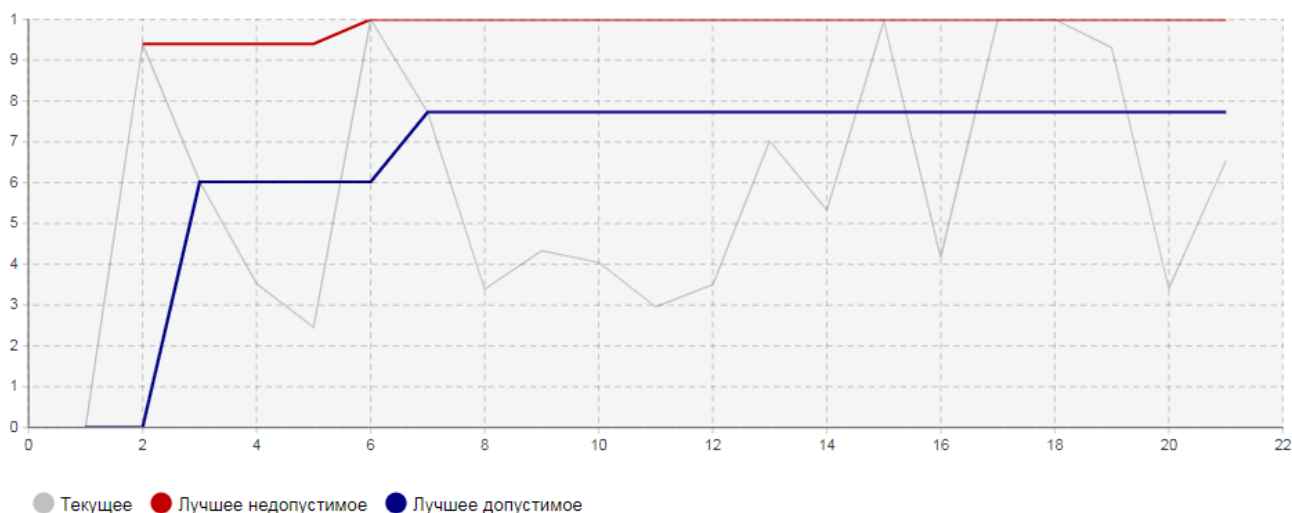


Рис. 8. Результаты эксперимента оптимизации

Литература

1. Understanding emergency care delivery through computer simulation modeling / L. F. Laker, E. Torabi, D. J. France, C. M. Froehle et al // Acad. Emerg. Med. – 2018. – 25. – pp. 116–127.
2. Simulation Modeling and Analysis / Law A. M., W. D. Kelton, W. D. Kelton // 5th ed. – New York. – McGraw-Hill. – 2015.
3. Sterman, J. D. System dynamics modeling: tools for learning in a complex world / J. D. Sterman // Calif Manage Rev. – 2001. – 43 (8). – P. 25.
4. Discrete-event System Simulation / J. Banks, J. S. Carson, B. L. Nelson, D. Nicol // 5th ed. UpperSaddleRiver. – NJ – PrenticeHall. – 2009.
5. Bazghandi, A. Techniques, advantages and problems of agent based modeling for traffic simulation / A. Bazghandi // IJCSI International Journal of Computer Science Issues. – Vol. 9. – No 3, January. – 2012. – pp. 115–119.
6. Mathematical modelling for health systems research: a systematic review of system dynamics and agent-based models / R. Cassidy, N. S. Singh, P. Schiratti, et al. // BMC Health Services Research. – Vol. 19. – No 845. – 2019. – pp. 1–24.
7. Parragh, S. N. Introducing heterogeneous users and vehicles into models and algorithms for the dial-a-ride problem. Res. C Emerg. 2011. Technol. – № 19. – P. 912–930.
8. Anagnostou, A., Nouman, A., Taylor, S. J. E. Distributed Hybrid Agent-Based Discrete Event Emergency Medical Services Simulation / A. Anagnostou, A. Nouman, S. J. E. Taylor // In Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference. – Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers – 2013. – pp. 1625–1636.
9. Сергеев, Е. С. Имитационное моделирование в системе ANYLOGIC / Е. С. Сергеев // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 3–3. – С. 109–111.

S.V. Dianov, A.N. Shvetsov

SIMULATION MODELING OF EMERGENCY HEALTH CARE SYSTEM

The article deals with the development of simulation models of emergency medical services. The process of developing an agent-based model of ambulance for Sokolsky municipal district of Vologda region is presented. The results of the experiments to optimize the number of simultaneously working ambulance teams with the use of the developed model are presented.

Emergency medical care, agent-based modeling, optimization.