

**Информатика, вычислительная  
техника и управление**

УДК 614.446

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-42-50

Н.В. Суханова

**РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА  
ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРОТИВОЭПИДЕМИЧЕСКИХ МЕР**

Разработана модель для прогнозирования заболеваемости и оценки эффективности противоэпидемических мер.

Результаты исследования и новизна - нейросетевая модель динамически изменяет свою структуру и адаптируется к текущей эпидемической обстановке. Модель позволяет провести прогноз эпидемической обстановки на перспективу и

оценку эффективности противоэпидемических мер. За основу разработки приняты существующие автоматизированные информационные системы, которые используются для мониторинга и визуализации данных о заболеваемости населения в Москве.

**Ключевые слова:** эпидемия, заболеваемость, мониторинг, нейросетевая модель, модульная система, нейронные сети.

N.V. Sukhanova

**NEURAL NETWORK MODEL DEVELOPMENT FOR DISEASE RATE  
MONITORING AND PREDICTION OF ANTI-EPIDEMIC MEASURE  
EFFECTIVENESS**

There is developed a neural network model for disease rate prediction and assessment of anti-epidemic measure effectiveness. As basis of the development there were adopted the existing automated information systems which are used for monitoring and visualization of data on Moscow population disease rate. Under conditions of the emergence and propagation of new dangerous infectious and virus diseases the information processing must be carried out in real time, a prediction for future is required.

It is necessary to create, update and adjust rapidly a set of anti-epidemic measures offered. The investigation purpose consists in the prediction of infection spreading and the assessment of anti-epidemic measures based on data on the population disease rate.

**Введение**

В настоящее время наиболее важной и актуальной проблемой является борьба с пандемией *COVID-19*. В решении этой задачи участвуют все страны мира. Сбор, обработка и систематизация данных о заболеваемости населения требуют существенных затрат. На противоэпидемические меры расходуются большие средства. Пандемия *COVID-19* нанесла большой ущерб экономике всех индустриальных стран. В каждой стране была создана своя система и план проведения противоэпидемических мер. Эффективность проведения различных противоэпидемических мер

There is offered a neural network model realized on the basis of the modular computing system and artificial neural networks. A modular computing system includes modules of different types connected between each other with a switch network.

In the modular computing system there are included modules of artificial neural networks with the special switch structure. Switchboards allow connecting and disconnecting single modules and elements of neural networks. A neural network model changes dynamically its structure and adapted to a current epidemic situation.

**Key words:** epidemic, disease rate, monitoring, neural network model, modular system, neural networks.

необходимо оценить путем сопоставления затрат на реализацию, ущерба от заболеваемости и полученных результатов. Активно разрабатываются и внедряются в практику методы искусственного интеллекта, которые позволяют проводить обработку неполной информации, и строить прогноз на будущее на основе оценки текущей ситуации. Методы искусственного интеллекта позволяют выполнить мониторинг текущей ситуации, построить прогноз заболеваемости и оценить эффект от проводимых противоэпидемических мероприятий.

**Объект, предмет и цель исследования**

Объект исследования – данные о заболеваемости населения на территориях разных стран, областей, городов, районов. В условиях современного мира распространение эпидемии не ограничено рамками отдельного государства, поэтому надо собирать и анализировать данные в мировом масштабе, использовать опыт всех

стран, где проводятся противоэпидемические меры.

Предмет исследования – прогнозирование распространения инфекций, выбор противоэпидемических мер.

Цель исследования – автоматизация сбора и анализа данных о заболеваемости, оценка эффективности проведения противоэпидемических мер.

**Решаемые задачи**

Для достижения поставленных целей научного исследования необходимо решить следующие задачи:

- анализ существующих информационных систем, которые используются для мониторинга заболеваемости;

- разработка нейросетевой модели для мониторинга и прогнозирования заболеваемости;

- разработка функциональной и структурной схемы для нейросетевой модели.

**Анализ информационных систем для мониторинга заболеваемости**

Анализ существующих информационных систем для мониторинга заболеваемости приведен в таблице [1, 2, 3].

В информационных системах для мониторинга заболеваемости [2, 3] использованы статистические методы обработки данных.

Основным статистическим методом является построение плотности распределения вероятности заболевания, когда по оси  $x$  откладывают время наблюдений, а по оси  $y$  - вероятность заболевания. Вероятность определяется как отношения количества заболевших к численности населения.

В автоматизированной системе ФМБА [3] расчеты статистических показателей проводятся на основе предположения о Пуассоновском законе распределения количества заболевших. Пуассоновский закон распределения описывает распределение числа случайных событий, произошедших за заданное время. При этом принимаются следующие предположения [4]:

- случайные события происходят с постоянной средней интенсивностью;
- случайные события происходят независимо друг от друга;
- среднее значение Пуассоновской случайной величины равно ее дисперсии.

Таблица

Анализ информационных систем для мониторинга заболеваемости

Показатель	Автоматизированная система [2]	Автоматизированная система ФМБА [3]	Разработанная нейросетевая модель
Функции	Сбор и анализ данных о заболеваемости Визуализация результатов на карте города	Сбор и анализ данных о заболеваемости Отчет в форме таблицы	Сбор и анализ данных о заболеваемости Прогнозирование заболеваемости Оценка эффективности проведения противоэпидемических мер
Методы обработки данных	Статистические методы	Статистические методы	Методы искусственного интеллекта

Окончание таблицы

Способ обработки данных	<i>Off-line</i>	<i>On-line</i>	В реальном времени
Технические средства, входящие в информационную систему	Мейнфрейм, суперкомпьютер, клиентские компьютеры	Компьютерная сеть	Модульная вычислительная система, включающая модули искусственных нейронных сетей
Структура информационной системы	Распределенный сбор данных, централизованная обработка	Распределенный сбор данных, централизованная обработка	Динамическая структура, изменяемые связи между модулями

Графики плотности распределения вероятностей Пуассоновской случайной величины приведены на рис. 1. В Пуассоновском законе распределении график плотности имеет один глобальный максимум (рис. 1). После того как пройден пик заболеваемости, можно ожидать окончания эпидемии в течение времени интервала нарастания пика. На рис. 1 моменты окончания эпидемии отмечены как интервалы, когда плотность распределения становится меньше порогового значения. Эти интервалы обозначены как  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ . Имеются сведения о возможности второй волны заражения *COVID-19* или о рецидивах заболевания у выздоровевших. В этом случае у плотности распределения вероят-

ности заболевания может быть несколько локальных максимумов (рис. 1).

Когда график плотности распределения имеет несколько локальных максимумов, то это указывает на то, что в одной выборке имеются случайные величины с разными параметрами закона распределения. В случае с пандемией *COVID-19* вид плотности распределения и параметры закона распределения количества заболевших неизвестны. Предположение о Пуассоновском законе и взаимной связи его параметров нельзя принять без дополнительной проверки. Гипотеза о равенстве среднего значения и дисперсии при Пуассоновском распределении числа заболевших может оказаться несостоятельной.

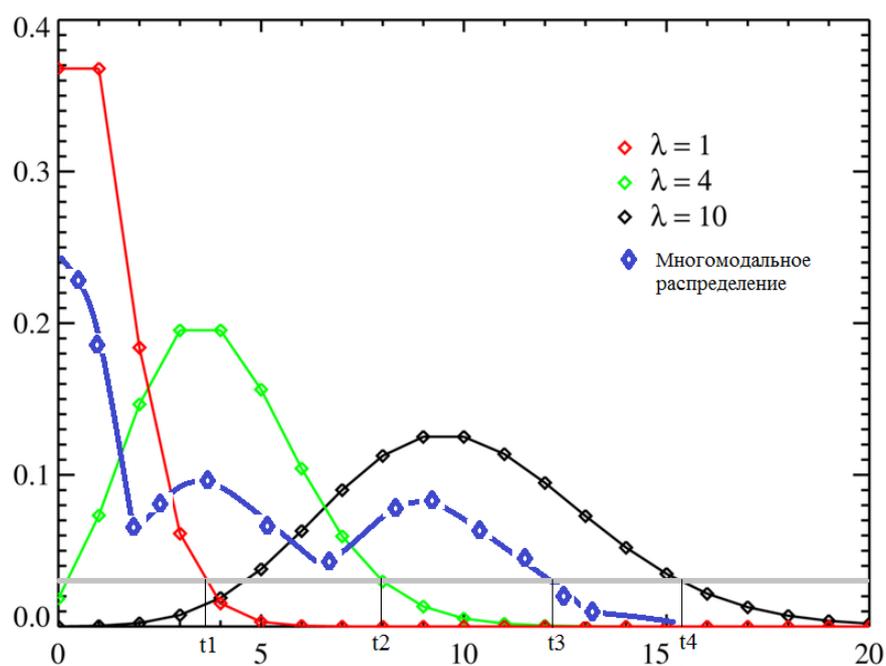


Рис. 1. Графики плотности распределения вероятностей

Как видно из рис. 1 окончание эпидемии следует ожидать на правой границе доверительного интервала. Чем более растянуты по времени локальные максимумы графика плотности, тем длиннее доверительный интервал, полученный в результате оценки продолжительности времени эпидемии. Противозидемические мероприятия направлены на то, чтобы активно влиять на состояние здоровья населения и сократить интервал с начала до конца заболевания. Сокращение продолжительности эпидемии позволит снизить затраты на противозидемические меры. Путем сокращения продолжительности эпидемии будет получена экономия средств, равная величине предотвращенного ущерба.

Области и территории, где отмечены случаи заражения вирусом *COVID-19*,

расширяются. Данные свидетельствуют о зависимости между количествами зараженных в соседних странах, областях, городах, районах. Данные о заболеваниях полностью не определены, заражения в соседних областях не являются независимыми случайными событиями. Предположение о Пуассоновском законе распределения числа заболевших может не выполняться.

В таких условиях для мониторинга и прогнозирования заболеваемости целесообразно использовать методы искусственного интеллекта.

Рассмотрены известные математические модели и исследована возможность их применения для мониторинга и прогнозирования заболеваемости.

### Математическая модель цепи Маркова для оценки состояния здоровья человека

Заболевание *COVID-19* характеризуется различными последствиями для организма человека, в том числе как тяжелыми, так и смертельными исходами.

Для отдельного человека можно описать развитие болезни как процесс изменения состояния его здоровья. Разработана математическая модель на цепи Маркова

для оценки состояния здоровья человека. Применена модель цепи Маркова, известная как «схема гибели и размножения» (рис. 2). В соответствии с этой моделью, с течением времени происходит переход из начального состояния здоровья в конечное состояние смерти.

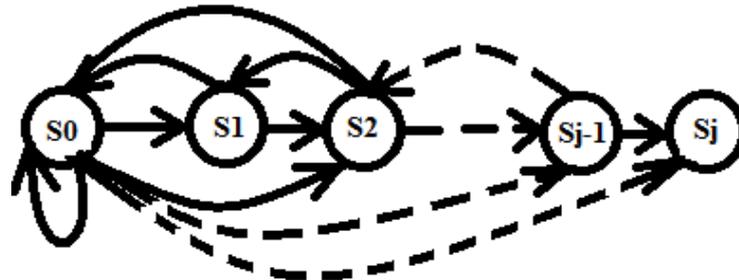


Рис. 2 Математическая модель цепи Маркова для оценки состояния здоровья человека

Выделено множество состояний в цепи Маркова  $\{ S_0, S_1, \dots, S_j \}$ , где имеется начальное состояние:  $S_0$  - здоровое, работоспособное состояние, и промежуточные состояния, например,  $S_1$  - хронические заболевания в стадии ремиссии;  $S_2$  - хронические заболевания в стадии обострения;  $S_3$  - снижение иммунитета;  $S_4$  - бессимптомное течение инфекционной болезни;  $S_5$  - слабо выраженные симптомы инфекционного заболевания;  $S_6$  - легкое течение инфекционного заболевания;  $S_{(j-1)}$  - полная потеря трудо-

способности, инвалидность и конечное состояние  $S_j$  - смерть.

Имеются переходы из одного состояния в другое. Последнее конечное состояние  $S_j$  является поглощающим. Из него нет переходов в другие состояния.

В него имеются переходы из всех других состояний.

Переходы из одного состояния в другое характеризуются величиной вероятности, которую можно оценить по статистическим данным об обращениях за меди-

цинской помощью. Цепь Маркова позволяет получить зависимости вероятности каждого состояния от времени. Данные, полученные для одного человека, можно экстраполировать на группу людей, проживающих в одном районе.

### Сеть Петри для оценки состояния здоровья человека

На основе модели цепи Маркова разработана динамическая модель на сети Петри для оценки состояния здоровья человека. Позиции в сети Петри  $P_0 \dots P_j$  соответствуют одноименным состояниям цепи Маркова (рис. 2, 3). Из одной позиции в другую имеются переходы. Переходы из здорового и работоспособного состояния в состояние болезни активируются при взаимодействии с инфицированным челове-

Математическая модель цепи Маркова является упрощенной и не учитывает взаимодействие людей друг с другом, обмен инфекцией между разными людьми.

ком, а также внешней среды, ослабленном иммунитете, стрессе. Предполагается, что негативные события происходят в случайные заранее неизвестные моменты времени. Обратные переходы из болезни в здоровое и работоспособное состояние связаны с проведением курса лечения, изоляцией от источников инфекции, исключением негативных воздействий внешней среды на организм человека и др.

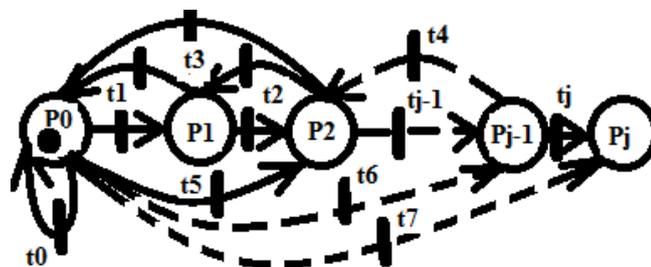


Рис. 3. Сеть Петри для оценки состояния здоровья человека

Математические модели цепи Маркова и сети Петри можно применить для оценки здоровья отдельного человека. Для оценки вероятностей переходов из одного состояния в другое можно использовать статистические данные о заболеваемости. Когда требуется провести оценку состоя-

ния здоровья для населения многомиллионного города, области, страны, то используют рассмотренные ранее стандартные статистические методы, которые применялись в автоматизированных информационных системах [1, 2, 3].

### Нейросетевая модель для мониторинга заболеваемости и прогнозирования эффективности противоэпидемических мероприятий

Разработана новая нейросетевая модель для мониторинга заболеваемости и прогнозирования эффективности противоэпидемических мероприятий. Эта модель интегрирована с уже существующими автоматизированными системами [2, 3]. В разработанной нейросетевой модели реализованы новые функции мониторинга и прогнозирования заболеваемости на базе методов искусственного интеллекта, в коммутаторных нейронных сетях (рис. 4).

Нейросетевая модель включает фрагменты большой обученной нейронной

сети, которые соединены между собой с помощью коммутаторов (рис. 4). В свою очередь, фрагменты нейронной сети также имеют коммутаторную структуру (рис. 3), где нейроны ( $N$ ) соединены с помощью коммутаторов ( $SW$ ).

Коммутаторная нейросетевая модель реализована с помощью аппаратно-программных средств как модульная вычислительная система [5, 6]. В модульную вычислительную систему входят модули искусственных нейронных сетей с особой коммутаторной структурой. Коммутаторы

позволяют подсоединять и отсоединять отдельные модули и фрагменты нейронных сетей. Нейросетевая модель динамически изменяет свою структуру и адаптируется к текущей эпидемической обстановке. В вычислительной системе модули реализуют фрагменты обученной нейронной сети. Модульная вычислительная система использует данные о заболеваемости и о проводимых противоэпидемических мерах (рис. 5).

Входные данные для нейросетевой модели:

- карта страны, области, города, района;
- интервал времени наблюдения;
- данные об обращениях к врачам жителей района в течение заданного времени;

- количество заболевших жителей района в течение заданного времени;
- данные о состоянии здоровья заболевших.

Выходные данные по заболеваемости в районе, городе, области, стране, в мире:

- результат мониторинга текущей ситуации по заболеваемости;
- прогноз заболеваемости на перспективу;
- мониторинг противоэпидемических мероприятий;
- оценка результатов противоэпидемических мероприятий;
- визуализация результатов обработки, нанесение на карту.

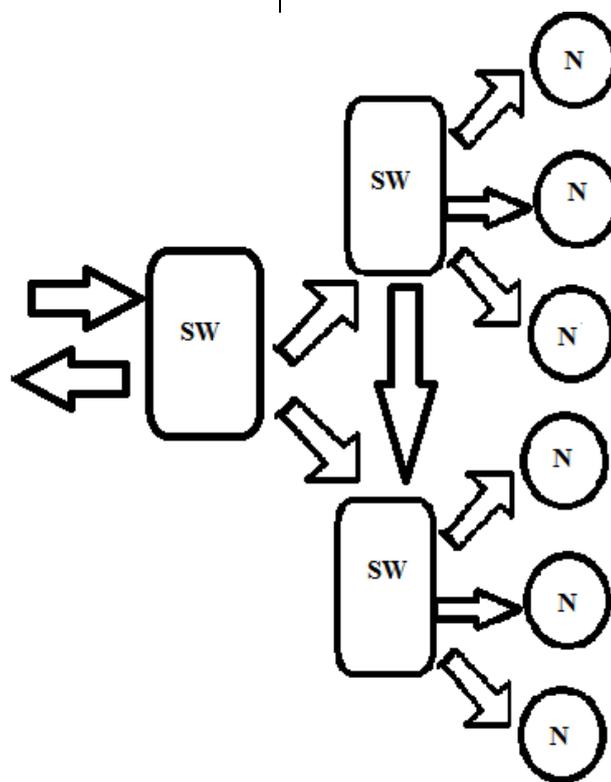


Рис. 4. Коммутаторная нейросетевая модель:  
SW-коммутатор; N - фрагмент нейронной сети или нейрон

### Разработка структурной схемы автоматизированной системы для мониторинга и прогнозирования заболеваемости

Разработана структурная схема автоматизированной системы для мониторинга и прогнозирования заболеваемости. В этой системе также предусмотрен прогноз заболеваемости и оценка эффективности противоэпидемических мер.

За основу разработки приняты существующие автоматизированные информационные системы [2, 3], которые используются для мониторинга и визуализации данных о заболеваемости населения в Москве. В условиях появления и распространения новых опасных инфекционных

и вирусных заболеваний прогноз и обработка информации должны проводиться в реальном времени.

Нейросетевая модель реализована на базе модульной вычислительной системы, где имеются модули искусственных нейронных сетей с особой коммутаторной структурой. Модули искусственных нейронных сетей интегрированы с суще-

## Выводы

1. Сбор, обработка и систематизация данных о заболеваемости населения являются важной и актуальной проблемой. В настоящее время активно разрабатываются методы искусственного интеллекта, которые позволяют проводить обработку неполной информации и строить прогноз на будущее на основе оценки текущей ситуации. Методы искусственного интеллекта позволяют выполнить мониторинг и построить прогноз заболеваемости, оценить эффект от проводимых противоэпидемических мероприятий.

2. Проведен анализ существующих информационных систем мониторинга заболеваемости [1, 2, 3]. Данные о заражении вирусом COVID-19 указывают на зависимости между количеством заболевших в соседних странах, областях, го-

ствующей автоматизированной системой мониторинга заболеваемости населения в мегаполисе [2] и расширяют ее функциональные возможности (рис. 5).

Достоверность прогнозирования заболеваемости по разработанной нейросетевой модели может быть получена по известной методике оценки точности нейросетевых моделей [8].

родах, районах. В условиях, когда данные о заболевании полностью не определены и заражения не являются независимыми случайными событиями, целесообразно использовать методы искусственного интеллекта.

3. Рассмотрены возможности применения известных математических моделей для мониторинга и прогнозирования заболеваемости: статистических методов, цепи Маркова, сети Петри.

4. Разработана новая нейросетевая модель для мониторинга заболеваемости и прогнозирования эффективности противоэпидемических мероприятий (рис. 5). Эта модель интегрирована с уже существующими автоматизированными системами [2, 3].

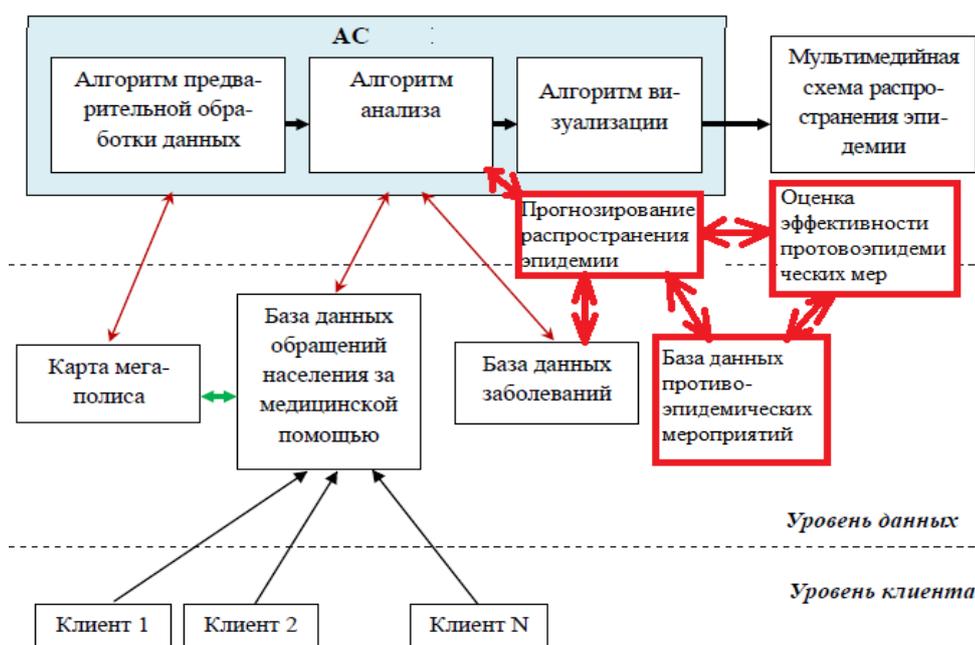


Рис. 5 Интеграция разработанной нейросетевой модели в структуру системы мониторинга заболеваемости

5. Нейросетевая модель реализована на базе модульной вычислительной системы. В модульную вычислительную систему входят модули искусственных нейронных сетей с особой коммутаторной структурой. Коммутаторы позволяют подсоединять и отсоединять отдельные модули и фрагменты нейронных сетей. Нейросетевая модель позволяет динамически изме-

нять структуру информационной системы и адаптировать ее к текущей эпидемической обстановке. В разработанной модели реализованы новые функции мониторинга и прогнозирования заболеваемости на базе методов искусственного интеллекта, в частности искусственных нейронных сетей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карта распространения коронавируса по Москве. – Текст: электронный URL=<https://www.7ya.ru/journal/1398274>, режим доступа - свободный.
2. Карлова, Т.В. Модель автоматизированной системы мониторинга заболеваемости населения в мегаполисе / Т.В. Карлова, Н.М. Кузнецова, И.А. Михайлов // Вестник Брянского государственного технического университета.- 2018. - № 9. - С. 66-73.
3. Аксенов, Л.А. Онлайн-автоматизированная система мониторинга инфекционной заболеваемости обслуживаемого контингента и населения ФМБА России / Л.А. Аксенов, О.В. Кривенко, Г.Г. Мамаева, А.И. Петухов // Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2013. - №10. - Т. 11. - С. 42-45.
4. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и её инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. - Изд. 2-е. – М.: Высш. шк. - 2000. - 135 с.
1. Diagram of corona-virus spread in Moscow. – Text: electronic: URL=<https://www.7ya.ru/journal/1398274>, access mode: free.
2. Karlova, T.V. Model of automated system for monitoring population disease rate in megapolis / T.V. Karlova, N.M. Kuznetsova, I.A. Mikhailov // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2018. – No.9. – pp. 66-73.
3. Aksyonov, L.A. On-line automated system of infection disease rate monitoring of contingent served and FMBA population of Russia / L.A. Aksyonov, O.V. Krivenko, G.G. Mamaeva, A.I. Petukhov // *Information-Measuring and Control Systems*. – 2013. – No.10. – Vol.11. – pp. 42-45.
4. Wentzel, E.S. *Probability Theory and Its Engineering Applications* / E.S. Wentzel, L.A. Ovcharov. – 2-d Edition. – M.: Higher School. 2000. – pp. 135.
5. Патент № 75247 Российская Федерация, МПК 7 G06F15/16. Модульная вычислительная система: № 2008106859; заявл. 26.02.2008; опубл. 27.07.2008 / Кабак И.С., Суханова Н.В.; заявитель Кабак И.С., Суханова Н. В. – 2 с.
6. Патент № 2398281 Российская Федерация, МПК 7 G06N 3/06. Многослойная модульная вычислительная система: № 2008143737; заявл. 07.11.2008; опубл. 27.08.2010 / Соломенцев Ю. М., Шептунов С.А., Кабак И.С., Суханова Н.В.; заявитель ИКТИ РАН. – 8 с.
7. Фельдблом, И.В. Эпидемиологический надзор за инфекционными заболеваниями: теория и практика / И.В. Фельдблом // Эпидемиология и инфекционные болезни. - 2008. - № 6.- С. 19-23.
8. Котельников, С.А. Методика оценки точности нейросетевых моделей / С.А. Котельников, А.А.Усков // Программные продукты и системы. - 2008. - № 2. - С. 63-65.
5. Patent No. 75247 the Russian Federation, IPC 7 G06F15/16. *Modular Computing System* No. 2008106859; applied: 26.02.2008; published: 27.07.2008 / Kabak I.S., Sukhanova N.V.; applicant: Kabak I.S., Sukhanova N.V. – pp. 2.
6. Patent No. 2398281 the Russian Federation, IPC 7 G06N 3/06. *Multi-layer Modular Computing System*: No. 2008143737; applied: 07.11.2008; published: 27.08.2010 / Solometsev Yu.M., Sheptunov S.A., Kabak I.S., Sukhanova N.V. N.V.; applicant: ICTI RAS. – pp. 8.
7. Feldblum, I.V. Infection disease epidemiologic supervision: theory and practice / I.V. Feldblum // *Epidemiology and Infection Diseases*. – 2008. – No.6. – pp. 19-23.
8. Kotelnikov, S.A. Procedure for assessment of neural network model accuracy / S.A. Kotelnikov, A.A. Uskov // *Software Products and Systems*. – 2008. – No.2. – pp. 63-65.

Ссылка для цитирования:

Суханова, Н.В. Разработка нейросетевой модели для мониторинга заболеваемости и прогнозирования эффективности противоэпидемических мер / Н.В. Суханова // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 7. С. 42 - 50. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-42-50.

Статья поступила в редакцию 20.05.20.

Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного  
технического университета

Рытов М.Ю.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ».

Статья принята к публикации 30.09.20.

#### Сведения об авторах:

**Суханова Наталия Вячеславовна**, к.т.н., доцент  
МГТУ «СТАНКИН», ст. науч. сотрудник Института  
конструкторско-технологической информатики

РАН, тел.: 8-963-723-81-62, e-mail:  
n\_v\_sukhanova@mail.ru.

**Sukhanova Natalia Vyacheslavovna**, Can. Sc. Tech.,  
Assistant Prof., MSTU “STANKIN”, Senior scientific  
assistant, Institute of Design-Technological Informatics

of RAS, phone: 8-963-723-81-62, e-mail:  
n\_v\_sukhanova@mail.ru.