

Уральский медицинский журнал. 2023;22(5):58–65
Ural Medical Journal. 2023;22(5):58–65

Научная статья
УДК 616-036.22:616-002.5
<http://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-5-58-65>

Прогнозирование тенденций эпидемической ситуации по туберкулезу с применением имитационной динамической модели

Игорь Анатольевич Черняев^{1✉}, Андрей Игоревич Цветков², Юрий Петрович Чугаев³, Павел Федорович Чернавин⁴

¹⁻³ Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

⁴ Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
✉ obl tuborg@yandex.ru

Аннотация

Введение. В Свердловской области сохраняется высокий уровень распространенности ВИЧ-инфекции и туберкулеза, что влияет на результативность противотуберкулезных мероприятий. Новая коронавирусная инфекция в течение ряда лет заставляет перераспределять ограниченные ресурсы здравоохранения субъекта Российской Федерации. Это определяет необходимость разработки научно-обоснованных методов анализа и прогнозирования развития эпидемического процесса при туберкулезной инфекции в регионе. **Цель работы** – научное обоснование метода прогнозирования эпидемической ситуации по туберкулезу на территории субъекта с множеством муниципальных образований с построением математических моделей и применением искусственного интеллекта. **Материалы и методы.** Исходным материалом для исследования послужили статистические данные, полученные в период 2007–2012 гг. из официальных форм государственной статистической отчетности: форма № 8 «Сведения о заболеваниях активным туберкулезом», форма № 33 «Сведения о больных туберкулезом», форма 089-у/туб, данные Федерального регистра больных туберкулезом, полицейских регистров учета больных туберкулезом учреждений здравоохранения Свердловской области. Обработка информации проводилась с применением MS Excel, составлены комплексные аналитические таблицы абсолютных значений и эпидемиологических коэффициентов. С применением технологии искусственного интеллекта разработана математическая имитационная динамическая модель эпидемической ситуации по туберкулезу на уровне региона и в разрезе 63 муниципальных образований Свердловской области. **Результаты.** Сравнение прогнозных значений, сделанных в 2017 г., с фактическими значениями 2018–2021 гг. выявило достоверное совпадение тенденции движения эпидемиологических показателей туберкулеза в регионе, максимальное отклонение составило не более 14,8 %. **Обсуждение.** Предложенная динамическая модель позволила выявить, достоверно рассчитать и графически отобразить тенденции движения значений изучаемых характеристик эпидемического процесса туберкулеза, несмотря на незначительное расхождение фактических и прогнозных значений. **Заключение.** Результаты прогноза, полученные с помощью имитационной динамической модели, могут быть использованы в практике при оперативном планировании ресурсов для реализации мероприятий по противодействию распространению туберкулеза на региональном уровне.

Ключевые слова: машинное обучение, искусственный интеллект, туберкулез, эпидемическая ситуация, прогнозирование эпидемического процесса

Для цитирования: Черняев И.А., Цветков А.И., Чугаев Ю.П., Чернавин П.Ф. Прогнозирование тенденций эпидемической ситуации по туберкулезу с применением имитационной динамической модели. *Уральский медицинский журнал*. 2023;22(5):58–65. <http://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-5-58-65>

© Черняев И. А., Цветков А. И., Чугаев Ю. П., Чернавин П. Ф., 2023
© Cherniaev I. A., Tsvetkov A. I., Chugaev Yu. P., Chernavin P. F., 2023

Forecasting trends in the tuberculosis epidemic situation using a simulation dynamic model

Igor A. Cherniaev^{1✉}, Andrey I. Tsvetkov², Yuriy P. Chugaev³, Pavel F. Chernavin⁴

¹⁻³ Ural State Medical University, Ekaterinburg, Russia

⁴ Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

✉ obltuborg@yandex.ru

Abstract

Introduction Sverdlovsk region still has a high prevalence of HIV infection and tuberculosis, which affects the effectiveness of anti-tuberculosis measures. The new coronavirus infection for a number of years makes it necessary to redistribute the limited health care resources of the subject of the Russian Federation. This determines the need to develop science-based methods for analyzing and forecasting the development of the epidemic process in tuberculosis infection in the region. **The aim of the work** is to scientifically substantiate the method of forecasting the epidemic situation of tuberculosis on the territory of the subject with a set of municipalities with the construction of mathematical models and application of artificial intelligence. **Materials and methods** The source material for the study was statistical data obtained in 2007–2012 from state statistical reporting forms: Form No. 8 “Information about diseases with active tuberculosis”, Form No. 33 “Information about tuberculosis patients”, Forms 089-u/tub, data from the Federal Register of Tuberculosis Patients, police registers of tuberculosis patients in health care institutions of Sverdlovsk region. Information processing was carried out using MS Excel, complex analytical tables of absolute values and epidemiological coefficients were compiled. Using artificial intelligence technology, a mathematical simulation dynamic model of the tuberculosis epidemic situation at the regional level and in the context of 63 municipalities of the Sverdlovsk region was developed. **Results** Comparison of the forecast values made in 2017 with the actual values of 2018–2021 revealed a reliable coincidence of the trend of movement of tuberculosis epidemiological indicators in the region, the maximum deviation was no more than 14.8 %. **Discussion** The proposed dynamic model made it possible to identify, reliably calculate and graphically display trends in the movement of the values of the studied characteristics of the tuberculosis epidemic process, despite the insignificant discrepancy between actual and forecast values. **Conclusion** The forecast results obtained using the simulation dynamic model can be used in practice for operational resource planning of resources for the implementation of measures to counter the spread of tuberculosis at the regional level.

Keywords: machine learning, artificial intelligence, tuberculosis, epidemic situation, forecasting of epidemic process

For citation: Cherniaev IA, Tsvetkov AI, Chugaev YuP, Chernavin PF. Forecasting trends in the tuberculosis epidemic situation using a simulation dynamic model. *Ural Medical Journal*. 2023;22(5):58–65. (In Russ.). <http://doi.org/10.52420/2071-5943-2023-22-5-58-65>

ВВЕДЕНИЕ

Проводимые в течение ряда лет противотуберкулезные мероприятия вывели нашу страну из списка территорий с наибольшим бременем туберкулеза, но Российская Федерация остается в числе стран с высокой распространенностью туберкулеза с различными вариантами лекарственной устойчивости возбудителя. В Свердловской области, на территории которой выполнялось данное исследование, сохраняется высокий уровень распространенности ВИЧ-инфекции, что мнению как экспертов Всемирной организации здравоохранения, так и отечественных исследователей, существенно влияет на результативность противотуберкулезных программ [1–4]. Как следует из «Общенационального плана действий, обеспечивающих восстановление занятости и доходов населения, рост экономики и долгосрочные структурные

изменения в экономике»¹, новая коронавирусная инфекция в течение ряда лет заставляет перераспределять и так достаточно ограниченные ресурсные возможности здравоохранения субъекта РФ. Все вышеизложенное определяет необходимость разработки научно-обоснованных методов анализа и прогнозирования развития эпидемического процесса при туберкулезной инфекции в регионе.

Переход отечественного здравоохранения на платформу доказательной медицины потребовал конкретности описания происходящих эпидемиологических процессов, что стало возможным благодаря цифровой трансформации формализации событий в рамках Единой государственной информационной системы здравоохранения и внедрением технологий, получивших название «искусствен-

¹ Одобрено Правительством РФ 23.09.2020, протокол № 36, раздел VII, № П 13-60855 от 02.10.2020.

ный интеллект». Математические модели анализа эпидемических ситуаций, имея полувековую историю, послужили предтечей к разработке новых математических решений контроля над движением эпидемиологических коэффициентов и выходу на технологии прогнозирования развития эпидемического процесса [5–9], чему не в малой степени способствовали обобщающие работы К.К. Авилова и А.А. Романюхи [10]. Дебютом настоящего исследования явилось моделирование эпидемической ситуации по туберкулезу за 2007–2017 гг. в крупном промышленном регионе Среднего Урала по рекомендациям М.В. Шиловой², И.М. Сон с соавт.³, О.Б. Нечаевой с соавт.⁴, выявившее, что на территории действуют разнонаправленные тенденции развития эпидемиологических коэффициентов по туберкулезу. Однако при углубленном дисперсионном анализе нами было установлено, что в области действует единый эпидемиологический процесс, позволяющий выделить типовые ситуации и разработать универсальные варианты преодоления неблагоприятных тенденций.

Цель работы – научное обоснование метода прогнозирования эпидемической ситуации по туберкулезу на территории субъекта с множеством муниципальных образований с построением математических моделей и применением искусственно-го интеллекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Необходимость научно-обоснованного прогноза эпидемической ситуации по туберкулезу в Свердловской области до 2030 г. привела к разработке авторского проекта. Модель эпидемического процесса была построена на основании данных государственной статистической отчетности (форма № 8 «Сведения о заболеваниях активным туберкулезом»⁵, форма № 33 «Сведения о больных туберкулезом»⁶, форма 089-у/туб⁷, данные Федерального регистра больных туберкулезом⁸, полицейские регистры учета больных туберкулезом учреждений здравоохранения Свердловской области) за период 2007–2012 гг.

² Шилова М. В. Методика анализа эпидемической ситуации по туберкулезу: метод. рекомендации / НИИ фтизиопульмонологии ММА им. И. М. Сеченова; М., 2007. - 56 с. (утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека Г.Г.Онищенко от 11 июня 2007 г. № 0100/5973-07-34.

³ Оценка эпидемической ситуации по туберкулезу и анализ деятельности противотуберкулезных учреждений (Пособие для врачей) Москва: ЦНИИОИЗ, - 2009. - 56 с.

⁴ Нечаева О.Б., Сон И.М., Гордина А.В. Индикативное сопровождение организации противотуберкулезной помощи населению Российской Федерации. М.: РИО ЦНИИОИЗ МЗ РФ, 2014 г. 32 с.

⁵ Утверждена приказом Росстата от 31 декабря 2010 г. № 483.

⁶ Утверждена приказом Росстата от 28.01.2009 № 12 (ред. от 20.01.2017).

⁷ Утверждена приказом Министерства здравоохранения Российской Федерации от 13 августа 2003 г. № 410.

⁸ Утвержден Постановлением Правительства Российской Федерации от 08.04.2017. № 426.

На основании полученной информации с применением MS Excel составлены комплексные аналитические таблицы абсолютных значений и эпидемиологических коэффициентов по переменным в разрезе 63 муниципальных образований Свердловской области и региона в целом. Для повышения точности прогноза учитывали дополнительные управляемые параметры, а работу с моделью управления параметрами осуществляли через определение абсолютных темпов их прироста к уровню предыдущего к последующему году (цепной темп прироста), что было правомерным, так как формирование темпов изменения параметров имеет долгосрочный характер и формируется комплексом мероприятий, проводимых на протяжении многих лет.

Основные управляемые параметры модели включали: долю лиц с клиническим излечением, количество и долю больных активным туберкулезом бактериовыделителей в контингентах, долю впервые выявленных больных (в/в) с МБТ+, количество больных туберкулезом бактериовыделителей (ТБ МБТ+), количество больных туберкулезом без бактериовыделения (ТБ МБТ-), коэффициент контактности с больными ТБ МБТ+; коэффициент контактности с больными ТБ МБТ – долю впервые выявленных больных с МБТ, коэффициенты смертности и летальности. Дополнительные управляемые параметры модели включали: число рецидивов, число лиц заболевших туберкулезом из состоящих в контакте с больными туберкулезом бактериовыделителями (ТБ МБТ+), количество заболевших ТБ из числа лиц, состоящих в контакте с больными туберкулезом без бактериовыделения (ТБ МБТ-), смертность и летальность больных туберкулезом от других причин и прочее. Дополнительные параметры являлись условно постоянными величинами для каждого муниципального образования, оказывали слабое влияние на тенденции в целом и в математической записи они объединены как единая переменная.

В модели использованы семь качественных показателей, от значений которых зависело, увеличится или нет количество активных больных в следующем периоде по сравнению с предыдущим. Для оценки ситуации в целом было целесообразно иметь единый коэффициент, совокупно оценивающий качественные изменения, он был введен под условным наименованием коэффициент общей динамики (КОД). Например, если КОД принимал значение менее 1, то количество больных активным туберкулезом уменьшается, если более 1 – увеличивается. Каждый из качественных параметров влияет на развитие эпидемической ситуации и позволяет вычислить, каким должно быть значение каждого из них при фиксации других, чтобы значение КОД было менее единицы. В данном виде модель описывает развитие ситуации. Результаты прогноза, сделанные с применением системы глубокого обучения искусственного интеллекта, содержательно интерпретируемы и вполне подходят для приблизительных вычислений.

На основании имеющихся данных были рассчитаны 16 параметров развития эпидемической ситуации по туберкулезу до 2030 г. для всех районов области и региона в целом. Для проверки релевантности модели в 2022 г. авторы сопоставили расчетные значения модели (прогноз) с фактическими значениями для периода 2018–2021 гг., зарегистрированными в отчетных формах государственного статистического наблюдения, упомянутых в начале данного раздела.

Для определения статистической достоверности различий рассчитывали коэффициент Стьюдента [11]. Точность прогноза способна оказывать влияние на качество принятых решений [12]. Проверен уровень достоверности модели для каждого прогнозируемого периода путем расчета показателя наглядности, то есть соотношения фактических значений с прогнозируемыми, определены показатели точности прогноза, рассчитана средняя абсолютная процентная ошибка (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) по формуле (1) [13]

$$MAPE = \frac{1}{h} * \sum_{j=1}^h \frac{|e_{T+j}|}{y_{T+j}} \quad (1)$$

Оценена достоверность через коэффициент симметричной средней абсолютной процентной ошибки (Symmetric MAPE – SMAPE) по формуле,

предложенной S. Makridakis и M. Hibon [14] с учетом возможностей и ограничений метода [15]. Применена оценка через среднее квадратичное отклонение (SD) по формуле (2) [16, 17]:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{t=1}^N (y(t) - ME)^2} \quad (2)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты оценки качества прогноза с применением метода приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценки качества прогноза

Наименование	Прогноз			Общий показатель за 2019–2021 гг.
	2019	2020	2021	
MAPE, %	13,14	15,14	14,87	14,38
SMAPE, %	13,54	15,24	15,68	14,82
SD, %	16,08	17,76	20,52	18,12

При графическом сравнительном анализе результатов имитационной динамической модели эпидемического процесса отчетливо различимо незначительное расхождение прогнозируемой тенденции со значениями, фактически зарегистрированными в период 2017–2021 гг. (рис. 1).



Рис. 1. Численность больных туберкулезом: сопоставление прогнозируемой тенденции, полученными в имитационной динамической модели со значениями, фактически зарегистрированными в период 2017–2021 гг., абсолютные значения

ОБСУЖДЕНИЕ

Активное применение математического моделирования эпидемических процессов инфекционных заболеваний относится к началу XX века [18, 19], в том числе в отечественной практике математическое моделирование процессов инфекционной патологии с использованием ЭВМ применяется с начала 1970-х гг. [20]. Большинство моделей распространения инфекционных заболеваний, вызванных бактериями и вирусами, выстраивались на феноменологическом описании эпидемического процесса типа SEIRF (S – восприимчивые, E – индивидуумы, находящиеся в инкубации, I – индивидуумы с клиническими проявлениями инфекционной болезни, R – выздоровевшие, F – умершие) [18]. Эпидемическая

ситуация в данных моделях описывалась системой дифференциальных уравнений, которая определяла динамику перехода индивидуумов из одной вышеуказанной группы в другую. Основными параметрами, входящими в данные уравнения и определяющими развитие, являлись частота контактов в популяции и коэффициент выздоровления, в некоторых моделях учитывались также скорость потери иммунитета и ряд других параметров. Например, зависимость эпидемической ситуации от внешних факторов, а также возможность управления развитием эпидемий путем влияния на данные факторы описана работах Ю.Б. Гришуниной с соавт. [21, 22]. Математические модели распространения туберкулеза имеют уже более чем полувековую историю.

В начале 60-х годов прошлого века Н. Waaler с соавт. предложили для анализа эпидемиологической ситуации использовать математическую модель на основе разностных уравнений [5]. В последующие годы математическое моделирование активно использовалось в работах S. Brogger [6], K. Styblo [7], E. Vynnycky [8], S. Blower с соавт. [23], C. Dye [24] и ряда других авторов. В вышеуказанные математические модели долгосрочного прогноза, основанные на популяционных данных больших регионов с исследовательской целью, заложена существенная погрешность в случае их применения для краткосрочного прогнозирования в реальных региональных условиях. Интересен ряд работ Е.Л. Овчинниковой [25], О.В. Чижовой [26], Н.Г. Хубаевой [27], посвященных краткосрочному прогнозированию эпидемиологических показателей по туберкулезу методом регрессионного анализа, в которых прогноз представлялся в формате нескольких сценариев развития ситуации при изменении его параметров в одном временном интервале. В зарубежной литературе встречаются работы с описанием результатов математического моделирования эпидемической ситуации по туберкулезу с учетом экономических факторов, способствующих развитию и распространению заболевания. Эти исследования, в большинстве, опирались на данные литературных источников, результаты выборочных исследований по сбору данных о заболевании и медико-социальных характеристиках населения на уровне страны, макрорегиона, а также на информации из баз данных общего доступа. Достаточно подробный обзор вышеуказанных моделей содержится в работах К.К. Авилова, А.А. Романюхи и Л.Е. Паролиной [10, 28]. По методологии построения, условиям и объемам исследования наиболее близкой была математическая модель О.В. Чижовой с соавт., использующая в качестве исходных данные государственной статистической отчетности с целью мониторинга значений показателей и прогнозирования эпидемической ситуации по туберкулезу на ближайшие 1–4 года, учитывающая изменения влияющих факторов [26]. Особого внимания заслуживает модель А.А. Авилова, А.А. Романюхи, С.Е. Борисова [10, 29], позволяющая оценить количественные характеристики эпидемического процесса по туберкулезу и качественные показатели выявления случаев заболевания на популяционном уровне в масштабах страны. Более поздняя модифицированная модель А.А. Романюхи и О.А. Мельниченко также учитывала различия социально-экономических характеристик между регионами страны и качество работы противотуберкулезных учреждений, симулируя динамику движения основных эпидемиологических показателей [30]. Из наиболее поздних работ интересна математическая регрессионная модель Е.В. Елтошкиной, Т.В. Бодякиной, построенная в виде полинома второй степени, учитывающая взаимосвязи трех факторов показателя заболеваемости туберкулезом: уровня безработицы, среднедушевого денеж-

ного дохода и количества врачебных амбулаторно-поликлинических учреждений, выполненная на примере Иркутской области [21]. Все вышеуказанные модели отличались ограничениями по числу изучаемых параметров в связи с трудоемкостью обработки и анализа. При создании модели была использована модифицированная авторами эпидемиологическая модель К. Styblo [7], включающая систему разностных уравнений Г. Ваалера с учетом ограничений и рекомендаций, указанных в работах К.К. Авилова с соавт., в том числе особенностей последовательной и параллельной схем моделирования течения туберкулеза [10, 32].

Принципиальные отличия нашей модели состояли в том, что разработку проводили с учетом реальных социально-экономических характеристик и особенностей региона, а в качестве исходных параметров использовали данные сплошного статистического исследования всех случаев туберкулеза, выявленных в Свердловской области, прошедших проверку и внесенных в систему государственной статистической отчетности. Главное отличие нашей модели от ранее описанных заключается в применении технологии искусственного интеллекта. Это позволило избавиться от ограничения числа учитываемых параметров (дополнительный параметр может быть оцифрован и введен в модель) и получить гибкую имитационную математическую модель эпидемической ситуации, позволяющую испытывать *in silico* различные сценарии управляющих воздействий с определением количественных и качественных характеристик их предполагаемых последствий [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная динамическая модель математического моделирования, основанная на использовании искусственного интеллекта, позволила выявить, рассчитать и графически отобразить тенденции изменения характеристик эпидемического процесса туберкулеза с вероятностью безошибочного прогноза до 85 % в каждом из 63 муниципальных образований Свердловской области и в регионе в целом. Сравнение расчетных значений (прогноза) модели, сделанных в 2018 г., с фактическими значениями 2019–2021 гг. выявило достоверное совпадение тенденции движения исследуемых параметров в регионе. Если предположить, что качественные показатели останутся на уровне 2021 г., то в ближайшие 20 лет эпидемиологическая ситуация по туберкулезу в регионе будет развиваться согласно установленной тенденции к снижению значений основных эпидемиологических показателей. Результаты прогноза, полученные с помощью имитационной модели, потенциально пригодны для практического использования при оперативном планировании ресурсов для реализации мероприятий по противодействию распространению туберкулеза на региональном уровне.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Источник финансирования

Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Funding source

This study was not supported by any external sources of funding.

Этическая экспертиза не требуется.

Ethics approval is not required.

Информированное согласие не требуется.

Informed consent is not required.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Сюнякова Д.А. Особенности эпидемиологии туберкулеза в мире и в России в период 2015–2020 гг. Аналитический обзор. *Социальные аспекты здоровья населения*. 2021;67(3):11. <https://doi.org/10.21045/2071-5021-2021-67-3-11>.
Syunyakova DA. Features of the epidemiology of tuberculosis in the world and in Russia in the period 2015-2020. Analytical survey. *Social Aspects of Population Health*. 2021;67(3):11. (In Russ.). <https://doi.org/10.21045/2071-5021-2021-67-3-11>.
2. Нечаева О.Б., Подымова А.С. Влияние ВИЧ-инфекции на демографическую ситуацию в России. *Медицинский альянс*. 2018;1:6–15.
Nechaeva OB, Podymova AS. Impact of HIV infection on the demographic situation in Russia. *Medical Alliance*. 2018;1:6–15. (In Russ.).
3. Астрелин А.М. Тенденции заболеваемости, распространенности и смертности от ВИЧ-инфекции и туберкулеза в регионах России в XXI веке. *Демографическое обозрение*. 2020;7(4):82–107.
Astrelin AM. Trends in incidence, prevalence and mortality from HIV infection and tuberculosis in Russian regions in the 21st century. *Demographic Overview*. 2020;7(4):82–107. (In Russ.).
4. Стародубов В.И., Кадыров Ф.Н., Обухова О.В. с соавт. Аналитический доклад: Влияние коронавируса COVID-19 на ситуацию в российском здравоохранении. Центральный научно-исследовательский институт организации и информатизации здравоохранения Министерства здравоохранения Российской Федерации. М : 2020. 45 с.
Starodubov VI, Kadyrov FN, Obuxova OV et al. Analytical report: Impact of the COVID-19 coronavirus on the situation in Russian healthcare. Central Research Institute for Health Organization and Informatization of the Ministry of Health of the Russian Federation. Moscow : 2020. 45 p. (In Russ.).
URL: https://mednet.ru/images/materials/news/doklad_cniioiz_po_COVID-19-2020_04_26.pdf
5. Waaler HT, Geser A, Andersen S. The use of mathematical models in the study of the epidemiology of tuberculosis. *Am J Public Health Nations Health*. 1962;52(6):1002–1013. <https://doi.org/10.2105/ajph.52.6.1002>.
6. Brogger S. Systems analysis in tuberculosis control: a model. *Am Rev Respir Dis*. 1967;95(3):419–434. <https://doi.org/10.1164/arrd.1967.95.3.419>.
7. Styblo K, Bumgarner JR. Tuberculosis can be controlled with existing technologies: evidence. The Hague: Tuberculosis Surveillance Research Unit Progress Report. 1991. pp. 60–72
8. Vynnycky E, Fine PE. The natural history of tuberculosis: the implications of age dependent risks of disease and the role of reinfection. *Epidemiol Infect*. 1997;119(2):183–201. <https://doi.org/10.1017/s0950268897007917>.
9. Сазыкин В.Л. Анализ противотуберкулезной работы в Оренбургской области с помощью метода интегральной оценки и компьютерной программы Rang. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2004;10:127–131.
Sazykin VL. Analysis of anti-tuberculosis work in the Orenburg region using the integrated assessment method and the Rang computer program. *Bulletin of the Orenburg State University*. 2004;10:127–131. (In Russ.).
10. Авилов К.К., Романюха А.А. Математические модели распространения и контроля туберкулеза. *Математическая биология и биоинформатика*. 2007;2(2):188–318.
Avilov KK, Romanyukha AA. Mathematical models of the spread and control of tuberculosis. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 2007;2(2):188–318. (In Russ.).
URL: [http://www.matbio.org/downloads/Avilov2007\(2_188\).pdf](http://www.matbio.org/downloads/Avilov2007(2_188).pdf)
11. Гланц С. Медико-биологическая статистика. Пер. с англ. М : Практика ; 1998. С. 81–96.
Glantz S. Medical and biological statistics. Moscow : Practice ; 1998. pp. 81–96. (In Russ.).
12. Ansari A. Forecast error calculation with mean squared error (MSE) and mean absolute percentage error (MAPE). *JINAV*. 2020;1(2). <https://doi.org/10.35877/454RI.jinav303>.

13. Myttenaere A, Golden B, Le Grand B et al. Mean absolute percentage error for regression models. *Neurocomp*. 2016;192:38–48. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>.
14. Makridakis S, Michele H. Accuracy of forecasting: an empirical investigation. *J R Statist Soc A*. 1979;142(2):97–145. <https://doi.org/10.2307/2345077>.
15. Goodwin P, Lawton R. On the asymmetry of the symmetric MAPE. *Int J Forecast*. 1999;15(4):405–408. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(99\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(99)00007-2).
16. Patrignani C. Review of particle physics. *Chin Phys C*. 2016;40:100001. <https://doi.org/10.1088/1674-1137/40/10/100001>.
17. Светуных И. Оценка качества прогнозных моделей [электронный источник]. Svetunkov I. Assessment of the quality of predictive models [Internet]. (In Russ.). URL: https://forecasting.svetunkov.ru/etextbook/forecasting_toolbox/models_quality
18. Кондратьев М.А. Методы прогнозирования и модели распространения заболеваний. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2013;5(5):863–882. Kondratyev MA. Forecasting methods and models of disease spread. *Computer Research and Modeling*. 2013;5(5):863–882. (In Russ.).
19. Лопатин А.А., Сафронов В.А., Раздорский А.С., Куклев Е.В. Современное состояние проблемы математического моделирования и прогнозирования эпидемического процесса. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2010;3:28–30. Lopatin AA, Safronov VA, Razdorsky AS, Kuklev EV. The current state of the problem of mathematical modeling and forecasting of the epidemic process. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2010;3(105):28–30. (In Russ.).
20. Бароян О.В., Рвачев Л.А. Математика и эпидемиология. М : Знание ; 1977. С. 28 [Электронный ресурс]. Baroyan OV, Rvachev LA. Mathematics and epidemiology. Moscow : Znanie ; 1977. pp. 28 [Internet]. (In Russ.). URL: https://www.mathedu.ru/text/baroyan_rvachev_matematika_i_epidemiologiya_1977/p28
21. Гришунина Ю.Б., Контаров Н.А., Архарова Г.В., Юминова Н.В.. Моделирование эпидемической ситуации с учетом внешних рисков. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2014;5(78):61–66. Grishunina YuB, Kontarov NA, Arkharova GV, Yuminova NV. Modeling of epidemic situation taking into account external risks. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2014;5(78):61–66. (In Russ.).
22. Гришунина Ю.Б., Контаров Н.А., Архарова Г.В., Юминова Н.В. Статистический анализ параметров модели эпидемической ситуации. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2015;14(5–84):13–20. Grishunina YuB, Kontarov NA, Arkharova GV, Yuminova NV. Statistical analysis of the model parameters of the epidemic situation. *Epidemiology and Vaccinal Prevention*. 2015;14(5–84):13–20. (In Russ.).
23. Blower SM, McLean AR, Porco TC et al. The intrinsic transmission dynamics of tuberculosis epidemics. *Nat Med*. 1995;1(8):815–821. <https://doi.org/10.1038/nm0895-815>.
24. Williams BG, Granich R, Chauhan LS et al. The impact of HIV/AIDS on the control of tuberculosis in India. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2005;102(27):9619–9624. <https://doi.org/10.1073/pnas.0501615102>.
25. Овчинникова Е.Л. Факторный анализ развития эпидемиологического и инфекционного процессов туберкулеза у детей в условиях крупного промышленного центра Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. мед. наук. – Омск. 1999. Ovchinnikova EL. Factor analysis of development of epidemiological and infectious processes of tuberculosis in children in the conditions of a large industrial center of Western Siberia : author's abstract of the diss. ... PhD in Medical Sciences. – Omsk. 1999. (In Russ.). URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_000224243
26. Чижова О.В. Исследование и прогнозирование эпидемиологических показателей туберкулезного процесса: автореф. дис. ... канд. мед. наук. – Москва, 2004. Chizhova OV. Research and forecasting of epidemiological indicators of the tuberculosis process: author's abstract of the diss. ... PhD in Medical Sciences. – Moscow. 2004. (In Russ.). URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002768770/
27. Khubaeva NG. Methods of analysis and prognostication of a number of indicators in tuberculosis. *Probl Tuberk*. 2001;(6):30–33. (In Russ.).
28. Паролина Л.Е., Докторова Н.П., Отпущенникова О.Н. Социально-экономические детерминанты и математическое моделирование в эпидемиологии туберкулеза (обзор литературы). *Современные проблемы науки и образования*. 2020;6. Parolina LE, Doktorova NP, Otpuschennikova ON. Socio-economic determinants and mathematical modeling in the epidemiology of tuberculosis (literature review). *Modern Problems of Science and Education*. 2020;6. (In Russ.). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=30333>
29. Авилов К.К., Романюха А.А. Математическое моделирование процессов распространения туберкулеза и выявления больных. *Автоматика и телемеханика*. 2007;9:145–160. Avilov KK, Romanyukha AA. Mathematical modeling of tuberculosis propagation and patient detection. *Automation and Telemechanics*. 2007;9:145–160. (In Russ.).

30. Melnichenko O, Romanyukha A. A model of tuberculosis epidemiology: Estimation of parameters and analysis of factors influencing the dynamics of an epidemic process. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 2008;23(1):63–75. <https://doi.org/10.1515/rnam.2008.004>.
31. Елтошкина Е.В., Бодякина Т.В. Построение модели влияния социальных факторов на динамику заболевания туберкулезом. Проблемы и перспективы формирования здорового образа жизни в информационном обществе : сборник статей междунар. науч.-практ. конф. Иркутск : Мегаринт ; 2017. С. 30–37.
Eltoshkina EV, Bodyakina TV. Building a model of the influence of social factors on the dynamics of tuberculosis. Problems and prospects for the formation of a healthy lifestyle in the information society : a collection of articles of the Intern. scientific-practical. conf. Irkutsk : Megaprint ; 2017. pp. 30–37. (In Russ.).
URL: http://195.206.39.221/fulltext/i_002993.pdf#page=30.
32. Авилов К.К., Романюха А.А., Белиловский Е.М., Борисов С.Е. Сравнение схем моделирования естественного течения туберкулеза органов дыхания. *Математическая биология и биоинформатика*. 2019;14(2):570–587. <https://doi.org/10.17537/2019.14.570>.
Avilov KK, Romanyukha AA, Belilovsky EM, Borisov SE. Comparison of modeling schemes for natural course of pulmonary tuberculosis. *Math Biol Bioinf*. 2019;14(2):570–587. (In Russ.). <https://doi.org/10.17537/2019.14.570>.
33. Cherniaev IA, Chernavin PF, Tsvetkov AI et al. Forecasting trends in the tuberculosis epidemic situation in the region of the Russian Federation by dynamic simulation model. *Stud Health Technol Inform*. 2022;299:235–241. <https://doi.org/10.3233/SHTI220990>.

Сведения об авторах

И. А. Черняев

старший преподаватель кафедры общественного здоровья и здравоохранения,
obltuborg@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-2439-7087>

А. И. Цветков

доктор медицинских наук, заведующий кафедрой общественного здоровья и здравоохранения,
cp-gendir@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8751-6872>

Ю. П. Чугаев

доктор медицинских наук, профессор кафедры фтизиатрии и пульмонологии,
doctorchygaev@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0030-674X>

П. Ф. Чернавин

кандидат экономических наук, доцент кафедры «Аналитика больших данных и методы видеоанализа»,
chernavin.p.f@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-3214-3906>

Статья поступила в редакцию 15.11.2022;
одобрена после рецензирования 28.07.2023;
принята к публикации 08.09.2023.

Information about the authors

I. A. Cherniaev

Senior Lecturer of the Department of Public Health and Health Care,
obltuborg@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-2439-7087>

A. I. Tsvetkov

PhD (Medicine), Head of the Department of Public Health and Public Health Care
cp-gendir@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8751-6872>

Yu. P. Chugaev

Doctor of Science (Medicine), Professor of the Department of Phthisiology and Pulmonology,
doctorchygaev@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-0030-674X>

P. F. Chernavin

PhD (Economics), Associate Professor of the Department of Big Data Analytics and Video Analytics Methods,
chernavin.p.f@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0003-3214-3906>

The article was submitted 15.11.2022;
approved after reviewing 28.07.2023;
accepted for publication 08.09.2023.