

ISSN 2949-5873 (print)
ISSN 2949-5881 (online)

Реабилитология

2025 | Том 3 | № 3

<https://rehabilitology.com>



2025 | Vol 3 | No 3

Journal of Medical
Rehabilitation



Прогнозирование эффективности реабилитационных мероприятий у больных туберкулезом легких с помощью нейронных сетей

М.А. Алыменко¹, И.Э. Гарбузова², В.А. Липатов³, И.Ю. Кобелев⁴,
В.А. Рагулина³, Р.Ш. Валиев¹, Н.В. Турсунова⁵

¹ Казанская государственная медицинская академия – филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Муштары, д. 11, Казань 420012, Российская Федерация)

² Автономная некоммерческая организация высшего образования «Московский университет «Синергия» (ул. Мещанская, д. 9/14, стр. 1, Москва 129090, Российская Федерация)

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. К. Маркса, д. 3, Курск 305041, Российская Федерация)

⁴ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет) (ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2, Москва 119048, Российская Федерация)

⁵ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Новосибирский научно-исследовательский институт туберкулеза» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Охотская, д. 81А, Новосибирск 630040, Российская Федерация)

Для контактов: Максим Алексеевич Алыменко, e-mail: taxim.alymenko@gmail.com

РЕЗЮМЕ

Цель: обоснование включения входных параметров для нейронной сети, позволяющей осуществлять прогнозирование эффективности реабилитационных мероприятий с учетом утраты стойкой трудоспособности у больных туберкулезом легких.

Материал и методы. В исследование включены 335 пациентов с туберкулезом легких, из них 212 – с впервые выявленным заболеванием, 123 – с хроническими формами. Для прогнозирования эффективности реабилитационных мероприятий была разработана нейронная сеть на языке программирования Python 3.14. Архитектура сети базируется на многослойном персептроне с прямыми связями между нейронами и применением алгоритмов обратного распространения ошибки. В рамках данного исследования было признано целесообразным обеспечить прогнозирование утраты стойкой трудоспособности у пациентов с туберкулезом легких с помощью нейронной сети.

Результаты. В качестве входных параметров нейросети были интегрированы следующие: генотип DD гена *GSTM1*, генотип EE гена *GSTT1*, генотип TC гена *ABCB1* и полиморфные варианты генов цитокинов – фактора некроза опухоли альфа (–308G>A (rs1800629)), интерлейкина (ИЛ) 1-бета (–31C>T (rs1143627)), ИЛ-4 (–589C>T (rs2243250)), ИЛ-10 (–592C>A (rs1800872)), ИЛ-10 (–1082A>G (rs1800896)), а также неблагоприятное рецидивирующее течение, множественная и широкая лекарственная устойчивость, сохранение дыхательной и легочно-сердечной недостаточности после курса реабилитации. Регрессионный анализ показал статистическую значимость всех входных параметров в отношении моделирования зависимой переменной. В результате тестирования нейронной сети точность прогноза («эффективность реабилитации») составила 88,3%.

Заключение. Применение нейронной сети для прогнозирования эффективности реабилитации пациентов с легочным туберкулезом обеспечивает высокую точность предсказания. Данный метод может быть внедрен в практическую деятельность врачей-фтизиатров для оценки степени развития стойкой утраты трудоспособности у таких больных. Предполагается, что представленная модель станет основой для комплексной программы реабилитации, охватывающей врачебные, профессиональные и социальные аспекты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

туберкулез легких, реабилитация, остаточные посттуберкулезные изменения, нейронная сеть, язык программирования Python

Для цитирования

Алыменко М.А., Гарбузова И.Э., Липатов В.А., Кобелев И.Ю., Рагулина В.А., Валиев Р.Ш., Турсунова Н.В. Прогнозирование эффективности реабилитационных мероприятий у больных туберкулезом легких с помощью нейронных сетей. *Реабилитология*. 2025; 3 (3): 165–173. <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.61>.

Predicting the effectiveness of rehabilitation measures in patients with pulmonary tuberculosis using neural networks

M.A. Alymenko¹, I.E. Garbuzova², V.A. Lipatov³, I.Yu. Kobelev⁴, V.A. Ragulina³, R.Sh. Valiev¹, N.V. Tursunova⁵

¹ Kazan State Medical Academy – branch of Russian Medical Academy of Continuing Professional Education (11 Mushtari Str., Kazan 420012, Russian Federation)

² Moscow University “Synergy” (9/14 bldg 1 Meshchanskaya Str., Moscow 129090, Russian Federation)

³ Kursk State Medical University (3 K. Marx Str., Kursk 305041, Russian Federation)

⁴ Sechenov University (8 bldg 2 Trubetskaya Str., Moscow 119048, Russian Federation)

⁵ Novosibirsk Research Institute of Tuberculosis (81A Okhotskaya Str., Novosibirsk 630040, Russian Federation)

Corresponding author: Maxim A. Alymenko, e-mail: maxim.alymenko@gmail.com

ABSTRACT

Objective: To justify the inclusion of input parameters in a neural network designed to predict rehabilitation measures for patients with pulmonary tuberculosis who have lost their permanent work capacity.

Material and methods. The study included 335 patients with pulmonary tuberculosis, 212 with a newly diagnosed case and 123 with a chronic form. To predict the effectiveness of rehabilitation measures, a neural network was developed in the Python 3.14 programming language. Its architecture incorporates a multilayer perceptron with direct connections between neurons and backpropagation algorithms. In the context of this study, it was advisable to use a neural network for predicting permanent disability in patients with pulmonary tuberculosis.

Results. The following were integrated as input parameters of the neural network: genotype DD of the *GSTM1* gene, genotype EE of the *GSTT1* gene, genotype TC of the *ABCB1* gene and polymorphic variants of cytokine genes, including tumor necrosis factor alpha (–308G>A (rs1800629)), interleukin (IL) 1-beta (–31C>T (rs1143627)), IL-4 (–589C>T) (rs2243250)), IL-10 (–592C>A (rs1800872)), and IL-10 (–1082A>G (rs1800896)). Additionally, an adverse recurrent course, multiple and extensive drug resistance, and persistent respiratory and cardiopulmonary failure following a course of rehabilitation were incorporated. Regression analysis showed the statistical significance of all input parameters with respect to the modeling of the dependent variable. As a result of testing the neural network, the prediction accuracy (rehabilitation efficiency) was 88,3%.

Conclusion. The use of a neural network provides highly accurate predictions regarding the effectiveness of rehabilitation of patients with pulmonary tuberculosis. This method can be incorporated into clinical pulmonology practice to evaluate persistent disability in such patients. The presented predictive model is expected to form the basis of a comprehensive rehabilitation program that addresses medical, professional and social aspects.

KEYWORDS

pulmonary tuberculosis, rehabilitation, residual post-tuberculosis changes, neural network, Python programming language

For citation

Alymenko M.A., Garbuzova I.E., Lipatov V.A., Kobelev I.Yu., Ragulina V.A., Valiev R.Sh., Tursunova N.V. Predicting the effectiveness of rehabilitation measures in patients with pulmonary tuberculosis using neural networks. *Reabilitologia / Journal of Medical Rehabilitation*. 2025; 3 (3): 165–173 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.61>.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Туберкулез – это хроническое инфекционное заболевание бактериальной природы, вызываемое микобактериями туберкулеза. Оно представляет серьезную проблему для российской системы здравоохранения, решение кото-

рой требует комплексного подхода. Среди инфекционных заболеваний туберкулез занимает лидирующую позицию по числу летальных исходов. Наиболее распространенной формой является туберкулез легких [1].

Согласно определению Всемирной организации здравоохранения реабилитация представляет собой скоор-

динированное применение комплекса медицинских, социальных, педагогических и профессиональных мер. Цель данной практики заключается в подготовке (или переподготовке) пациента к достижению максимальной трудоспособности [2, 3].

Корректная реализация медицинской реабилитации создает благоприятные условия для успешной профессиональной и социальной интеграции пациента. Она может включать обучение больных новым профессиям, соответствующим их состоянию здоровья, а также рациональное трудоустройство [4–6]. В результате такого подхода 92% пациентов получают возможность вернуться к трудовой деятельности [7].

Изучение сложного процесса биотрансформации и его генетического регулирования связано с уточнением их роли в поддержании гомеостаза организма в сочетании с другими защитными механизмами. Разнообразные токсические вещества и продукты биотрансформации оказывают влияние на различные звенья иммунной системы, поэтому активно исследуются иммуотропные свойства чужеродных химических соединений (ксенобиотиков) и защитная роль компонентов иммунитета в реализации их токсических воздействий [9].

Некоторые ученые придерживаются концепции взаимосвязи иммунных и химических путей поддержания гомеостаза, которая объединяет функции печени и иных барьерных органов в единую систему регуляции внутренней среды организма [10]. В ходе обеспечения иммунной защиты организма от ксенобиотиков запускаются два взаимосвязанных процесса:

- синтез микросомальных монооксигеназ печени (ферментная система, которая осуществляет окислительное превращение ксенобиотиков, делая их полярными и способными к выведению из организма);
- синтез специфических антител (иммунный ответ, направленный на связывание и нейтрализацию ксенобиотиков).

Таким образом, реализуется комплексный подход к защите от ксенобиотиков с использованием как ферментативных механизмов детоксикации, так и специфических иммунных реакций [11]. Влияние ксенобиотиков приводит к нарушениям и специфического, и неспецифического иммунитета. Наблюдения на отдельных предприятиях показали, что фактически все работники испытывают сенсибилизацию к производственным аллергенам, и это проявляется в виде гиперчувствительности замедленного, немедленного или комбинированного типа [10].

Ксенобиотики и их метаболиты, образующиеся в результате биологического преобразования в разных органах (печень, легкие, кожа, лимфоциты), оказывают прямое механическое воздействие на клетки иммунной системы, включая стволовые клетки кроветворения. Некоторые ксенобиотики обладают аллергенными свойствами, т.к. могут связываться с белками крови и иными тканями, образуя комплексы, которые активируют иммунные клетки и иные компоненты иммунного ответа [11]. Таким образом, полиморфизмы генов ферментов биотрансформации ксенобиотиков влияют на предрасположенность

к туберкулезу легких и на особенности клинического течения заболевания.

В последнее время в клинической иммунологии наблюдается растущий интерес к цитокинам – медиаторам межклеточного взаимодействия, продуцируемым клетками иммунной системы. Цитокины играют ключевую роль во всех стадиях формирования адекватного иммунного ответа на проникновение патогена: от локализации и ликвидации угрозы до восстановления поврежденных тканей. В случае неэффективности локальных защитных механизмов прогрессирует воспалительная реакция, сопровождающаяся усилением синтеза цитокинов. Попадая в кровоток, эти молекулы оказывают воздействие на весь организм [12–15].

В современном мире информационные технологии, включая компьютерные, широко применяются во всех сферах медицины [16, 17]. Нейронные сети представляют собой мощный инструмент для решения сложных задач в области диагностики и моделирования [18, 19]. Функционирование нейронных сетей основано на алгоритмах, моделирующих работу биологических нейронных структур. Входные сигналы, поступающие в искусственные нейроны, подвергаются суммированию и реформированию, что приводит к формированию желаемого результата. Процесс обучения нейронной сети осуществляется посредством подбора обобщающих параметров для обучающей выборки, что гарантирует точность и корректность получаемых данных [20].

В настоящий момент нейросетевые технологии активно внедряются в различные сферы медицины, в т.ч. для прогнозирования исходов излечения пациентов с легочным туберкулезом [21]. Но, несмотря на существующее разнообразие способов прогнозирования, на сегодняшний день не существует единой автоматизированной системы, способной обеспечить высокоэффективное и оперативное решение данной задачи.

Цель – обоснование включения входных параметров для нейронной сети, позволяющей осуществлять прогнозирование эффективности реабилитационных мероприятий с учетом утраты стойкой трудоспособности у больных туберкулезом легких.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ / MATERIAL AND METHODS

В исследование включены 335 пациентов с туберкулезом легких, находившихся на стационарном лечении в ОБУЗ «Областной противотуберкулезный диспансер» (г. Курск), из них у 212 человек был диагностирован впервые выявленный туберкулез легких, а у 123 – хронический. Все больные получали специфическую химиотерапию согласно действующим клиническим рекомендациям.

Критерии включения и исключения / Inclusion and exclusion criteria

Критерии включения пациентов в исследование:

- возраст от 18 до 65 лет;
- наиболее частые формы туберкулеза органов дыхания (очаговый, инфильтративный, фиброзно-кавернозный, диссеминированный);

– подписание добровольного информированного согласия.

Критерии исключения:

- тяжелые сопутствующие заболевания (злокачественные новообразования, системные болезни кровеносной системы, сердечно-легочная и почечная недостаточность в стадии декомпенсации, анемия, тиреотоксикоз, психические заболевания);
- отсутствие подписанного добровольного информированного согласия.

Лабораторные исследования / Laboratory tests

Для проведения молекулярно-генетического анализа пациенты предоставили образцы венозной крови. Извлечение геномной ДНК из цельной крови осуществлялось с использованием наборов реагентов Arrow Blood DNA 500 (DiaSorin, США) на автоматизированной станции NorDiag Arrow (Promega, США). Процедуры генотипирования больных выполнялись в лаборатории ООО «Томограф» (г. Курск).

В проведенных нами ранее исследованиях показано, что предрасположенность к заболеванию туберкулезом легких связана с генотипами DD гена *GSTM1* (55,5%), EE гена *GSTT1* (89,0%) и TC гена *ABCB1* (48,8%), а также с полиморфизмами генов цитокинов: фактора некроза опухоли альфа (–308G>A (rs1800629)), интерлейкина (ИЛ) 1-бета (–31C>T (rs1143627)), ИЛ-4 (–589C>T (rs2243250)), ИЛ-10 (–592C>A (rs1800872)), ИЛ-10 (–1082A>G (rs1800896)) [9].

Нейронная сеть / Neural network

Для прогнозирования эффективности реабилитационных мероприятий у пациентов с туберкулезом легких была разработана нейронная сеть на языке программирования Python 3.14 с помощью редактора кода Visual Studio Code (рис. 1). Архитектура сети базируется на многослойном персептроне с прямыми связями между нейронами и применением алгоритмов обратного распространения ошибки.

В модель интегрирована крутизна дискриминантной функции, что позволяет регулировать скорость изучения сети. Функционирование нейронной сети соответствует общепринятым основам: подготовка и ввод входных параметров, обучение сети, формирование выходных классов и тестирование системы. Оптимальное обучение достигается соответствующими параметрами модели:

- погрешность вычислений $\leq 0,001$;
- значение коэффициента крутизны дискриминантной функции 3,0.

Метод моделирования с использованием нейронной сети реализован следующим образом:

- в качестве входных параметров использовались нормализованные отчеты, характеризующиеся средним значением выборки временных значений входных примеров и их исправленной дисперсией;
- выходными данными считались соответствующие значения функции, описывающей пик;
- по достижении требуемого яруса ошибки в процессе обучения на вход сети подавалось значение времени

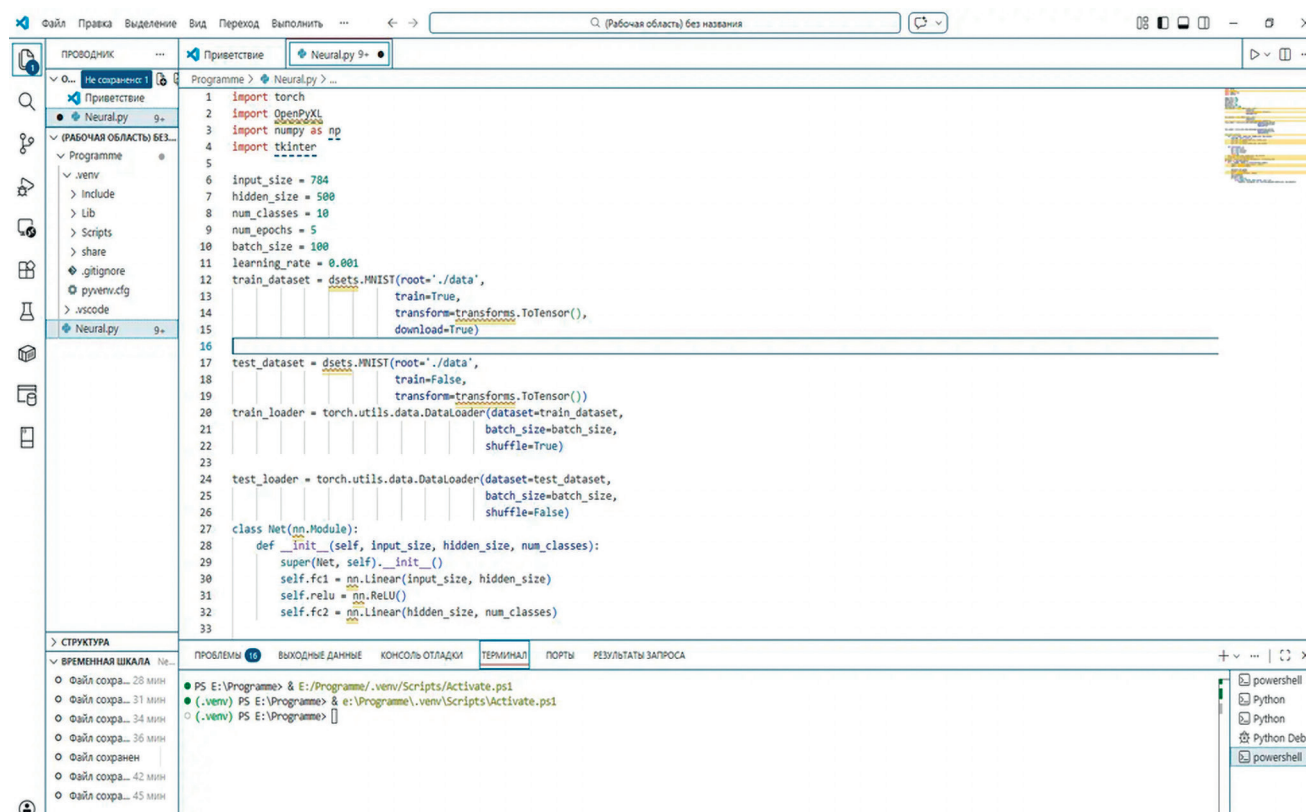


Рисунок 1. Пример написания кода в Python 3.14 для создания нейронной сети

Figure 1. Python 3.14 code example for a neural network

с целью определения значения функции, и полученное значение переменной при прямом прохождении через сеть рассматривалось как прогнозируемая исходная точка и включалось в обучающую выборку.

Алгоритм написания нейронной сети был следующим: создано и активировано виртуальное окружение в терминале Visual Studio Code с помощью команд «python-m venv» и «venv/Scripts/activate», далее установлены и импортированы библиотеки Phyton – PyTorch (для построения нейросетевой модели), OpenPyXL (для считывания базы данных в таблице Excel), Numpy (для статистического анализа данных), Tkinter (для создания визуального интерфейса программы).

В рамках данного исследования было признано целесообразным разработать метод прогнозирования стойкой утраты трудоспособности у пациентов с туберкулезом легких посредством нейронной сети.

Шкала оценки состояния здоровья / Health assessment scale

Разработанная шкала оценки состояния здоровья учитывает критерии, дополненные наличием или отсутствием определенных генотипов полиморфизмов генов ферментов биотрансформации ксенобиотиков и цитокинов.

Максимальное количество баллов по шкале составляет 14, минимальное – 0. Для установления третьей группы инвалидности необходимо набрать 7–8 баллов, второй группы – 9–10 баллов. Первая группа инвалидности устанавливается при оценке 10–14 баллов в сочетании с декомпенсацией хронических сопутствующих заболеваний и потребностью пациента в постороннем уходе. Группа инвалидности не устанавливается при оценке 0–6 баллов.

Данная шкала направлена на повышение объективности критериев стойкой утраты трудоспособности и сортировки пациентов по перспективности реабилитационного прогноза.

РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

Входные параметры сети / Network input parameters

На основании проведенных ранее исследований в нейронную сеть были включены следующие входные параметры:

- генотип DD гена *GSTM1*;
- генотип EE гена *GSTT1*;
- генотип TC гена *ABCB1*;
- полиморфизм гена фактора некроза опухоли альфа (–308G>A (rs1800629));
- полиморфизм гена ИЛ 1-бета (–31C>T (rs1143627));
- полиморфизм гена ИЛ-4 (–589C>T (rs2243250));
- полиморфизм гена ИЛ-10 (–592C>A (rs1800872));
- полиморфизм гена ИЛ-10 (–1082A>G (rs1800896)).

Кроме того, в качестве входных параметров в нейронную сеть были включены:

- неблагоприятное рецидивирующее течение;
- множественная и широкая лекарственная устойчивость;
- сохранение дыхательной и легочно-сердечной недостаточности после курса реабилитации.

В **таблице 1** представлены входные параметры нейросети для прогнозирования стойкой утраты трудоспособности у больных туберкулезом легких с баллами по шкале оценки состояния здоровья.

Корреляционно-регрессионная модель / Correlation-regression model

Для обоснования включения входных параметров нейросети проведен множественный корреляционный анализ (**табл. 2**). Коэффициент корреляции R, равный 0,817, свидетельствует о сильной линейной взаимосвязи между зависимой переменной («эффективность реабилитации») и совокупностью входных переменных. Коэффициент детерминации R^2 составляет 0,619, что означает, что 61,9% вариации «эффективности реабилитации» объясняется влиянием факторов модели. Результат теста Дарбина–Уотсона 1,850 пребывает в допустимом диапазоне (1,5<1,850<2,5), что указывает на отсутствие автокорреляции остатков.

Регрессионный анализ продемонстрировал статистическую значимость всех входных параметров нейронной сети в отношении моделирования зависимой переменной. В связи с этим все указанные в таблице 1 параметры могут быть интегрированы в архитектуру нейронной сети.

Обучение и тестирование нейронной сети / Network training and testing

Далее проводились обучение и тестирование нейронной сети. Для обучающей выборки понадобились данные 70% включенных в исследование пациентов, для тестирующей – 30%.

В результате тестирования (**рис. 2**) точность прогноза («эффективность реабилитации») составила 88,3%.

ОБСУЖДЕНИЕ / DISCUSSION

В литературных источниках представлено значительное количество данных, касающихся механизмов гранулемы при туберкулезной инфекции, характеристик функционирования ее клеточных компонентов и взаимосвязей гранулематозного процесса с нервной и эндокринной системами [22, 23]. Тем не менее информация о масштабах применения реабилитационных методик во фтизиатрической практике для достижения оптимальной адаптации организма к различным вариантам течения процесса и восстановления трудоспособности остается ограниченной и фрагментарной. Это свидетельствует о необходимости углубленного научного исследования данной проблемы.

Гены ферментов биотрансформации ксенобиотиков, подобно всем другим генам человека, демонстрируют значительный полиморфизм первичной структуры ДНК. Данный полиморфизм обуславливает межиндивидуальные различия в активности ферментных систем, отвечающих за детоксикацию ксенобиотиков [24].

Обширные научные исследования генов, участвующих в метаболизме ксенобиотиков, выявили корреляцию между их вариациями и развитием разнообразных заболеваний [25–28]. Среди них сердечно-сосудистые

Таблица 1. Входные параметры нейросети для прогнозирования стойкой утраты трудоспособности у больных туберкулезом легких
Table 1. Input parameters of a neural network for predicting permanent disability in patients with pulmonary tuberculosis

Входной параметр / Input parameter	0 баллов / 0 points	1 балл / 1 point	2 балла / 2 points
Наличие генотипа DD полиморфизма гена <i>GSTM1</i> (E/D) / Presence of the DD genotype of the <i>GSTM1</i> gene polymorphism (E/D)	Нет / No	Да / Yes	–
Наличие генотипа EE полиморфизма гена <i>GSTT1</i> (E/D) / Presence of the EE genotype of the <i>GSTT1</i> gene polymorphism (E/D)	Нет / No	Да / Yes	–
Наличие генотипа TC полиморфизма гена <i>ABCB1</i> (3435T>C (rs1045642)) / Presence of the TS genotype of the <i>ABCB1</i> gene polymorphism (3435T>C (rs1045642))	Нет / No	Да / Yes	–
Неблагоприятное рецидивирующее течение / Adverse recurrent course	Нет / No	Да / Yes	–
Наличие генотипа CT полиморфизма гена ИЛ-1-бета (–31C>T (rs1143627)) / Presence of the CT genotype of the IL-1-beta gene polymorphism (–31C>T (rs1143627))	Нет / No	Да / Yes	–
Наличие генотипа CC полиморфизма гена ИЛ-10 (–592C>A (rs1800872)) / Presence of the CC genotype of the IL-10 gene polymorphism (–592C>A (rs1800872))	Нет / No	Да / Yes	–
Наличие генотипа AG полиморфизма гена ИЛ-10 (–1082A>G (rs1800896)) / Presence of the AG genotype of the IL-10 gene polymorphism (–1082A>G (rs1800896))	Нет / No	Да / Yes	–
Наличие генотипа GG полиморфизма гена ФНО-альфа (308G>A (rs1800629)) / Presence of the GG genotype of the TNF-alpha gene polymorphism (308G>A (rs1800629))	Нет / No	Да / Yes	–
Наличие генотипа CT полиморфизма гена ИЛ-4 (–589C>T (rs2243250)) / Presence of the CT genotype of the IL-4 gene polymorphism (–589C>T (rs2243250))	Нет / No	Да / Yes	–
Множественная или широкая лекарственная устойчивость / Multiple or extensive drug resistance	Нет / No	Да / Yes	–
Сохранение дыхательной недостаточности после курса реабилитации / Persistent respiratory failure following a course of rehabilitation	Нет / No	1–2-я степень / Stage 1–2	3-я степень / Stage 3
Сохранение легочно-сердечной недостаточности после курса реабилитации / Persistent cardiopulmonary failure following a course of rehabilitation	Нет / No	Да, в фазе компенсации / Yes, in the compensation phase	Да, в фазе декомпенсации / Yes, in the decompensation phase

Примечание. ИЛ – интерлейкин; ФНО-альфа – фактор некроза опухоли альфа.
Note. IL – interleukin; TNF-alpha – tumor necrosis factor alpha.

Таблица 2. Сводные данные по полученной корреляционно-регрессионной модели

Table 2. Summary for the obtained correlation-regression model

R	R ²	Стандартная ошибка оценки / Standard error of the estimate	Тест Дарбина-Уотсона / Durbin-Watson test
0,817	0,619	0,392	1,850

Примечание. R – коэффициент множественной корреляции; R² – коэффициент детерминации; тест Дарбина-Уотсона – тест для обнаружения автокорреляции.
Note. R – multiple correlation coefficient; R² – coefficient of determination; Darbin-Watson test – autocorrelation detection test.

Epoch [1/5], Step [100/600], Loss: 0.3398
Epoch [1/5], Step [200/600], Loss: 0.4684
Epoch [1/5], Step [300/600], Loss: 0.2309
Epoch [1/5], Step [400/600], Loss: 0.2741
Epoch [1/5], Step [500/600], Loss: 0.2412
Epoch [1/5], Step [600/600], Loss: 0.0925
Epoch [2/5], Step [100/600], Loss: 0.0504
Epoch [2/5], Step [200/600], Loss: 0.1099
Epoch [2/5], Step [300/600], Loss: 0.1431
Epoch [2/5], Step [400/600], Loss: 0.1107
Epoch [2/5], Step [500/600], Loss: 0.0786
Epoch [2/5], Step [600/600], Loss: 0.1334
Epoch [3/5], Step [100/600], Loss: 0.0888
Epoch [3/5], Step [200/600], Loss: 0.0623
Epoch [3/5], Step [300/600], Loss: 0.1323

Рисунок 2. Тестирование нейронной сети
Figure 2. Neural network testing

патологии, atopические нарушения (аллергии), хронические неспецифические заболевания легких, в т.ч. туберкулез [29–31].

В современном мире информационные технологии, включая компьютерные, нашли широкое применение во всех сферах медицины, в т.ч. в реабилитационной практике [17, 32–34]. Нейронные сети представляют собой мощный инструмент для решения сложных задач в области диагностики и прогнозирования течения ряда заболеваний, эффективности реабилитационных мероприятий [35–39].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Прогнозирование эффективности реабилитации больных туберкулезом легких с помощью нейронной сети позволяет получить прогноз с точностью 88,3%. Использование нейронной сети необходимо внедрять в практическую работу врачей-фтизиатров с целью предсказания стойкой утраты трудоспособности. Предполагается, что эта модель станет основой для комплексной программы реабилитации, охватывающей врачебные, профессиональные и социальные аспекты.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ARTICLE INFORMATION
Поступила: 04.07.2025 В доработанном виде: 11.08.2025 Принята к печати: 06.09.2025 Опубликована: 30.09.2025	Received: 04.07.2025 Revision received: 11.08.2025 Accepted: 06.09.2025 Published: 30.09.2025
Вклад авторов	Authors' contribution
Все авторы принимали равное участие в сборе, анализе и интерпретации данных. Все авторы прочитали и утвердили окончательный вариант рукописи	All authors participated equally in the collection, analysis and interpretation of the data. All authors have read and approved the final version of the manuscript
Конфликт интересов	Conflict of interests
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	The authors declare no conflict of interests
Финансирование	Funding
Авторы заявляют об отсутствии финансовой поддержки	The authors declare no funding
Согласие пациентов	Patient consent
Все участники исследования подписали информированное согласие на обследование и лечение	All study participants signed informed consent for examination and treatment
Этические аспекты	Ethics declarations
Исследование проводилось в полном соответствии с принципами надлежащей клинической практики и этическими нормами Хельсинкской декларации. Протокол исследования одобрен этическим комитетом Казанской государственной медицинской академии – филиала ФГБОУ ДПО «Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования» Минздрава России (протокол № 04/05 от 27 мая 2021 г.)	The study was conducted in full compliance with Good Clinical Practice principles and the ethical standards of the Declaration of Helsinki. The study protocol was approved by the Ethics Committee of the Kazan State Medical Academy – branch of Russian Medical Academy of Continuous Professional Education (Protocol No. 04/05 dated May 27, 2021)
Раскрытие данных	Data sharing
Первичные данные могут быть предоставлены по обоснованному запросу автору, отвечающему за корреспонденцию	Raw data could be provided upon reasonable request to the corresponding author
Комментарий издателя	Publisher's note
Содержащиеся в этой публикации утверждения, мнения и данные были созданы ее авторами, а не издательством ИРБИС (ООО «ИРБИС»). Издательство снимает с себя ответственность за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или препаратов, упомянутых в публикации	The statements, opinions, and data contained in this publication were generated by the authors and not by IRBIS Publishing (IRBIS LLC). IRBIS LLC disclaims any responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred in the content
Права и полномочия	Rights and permissions
© 2025 Авторы; ООО «ИРБИС» Статья в открытом доступе по лицензии CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)	© 2025 The Authors. Publishing services by IRBIS LLC This is an open access article undermCC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Grace A., Mittal A., Jain S. et al. Shortened treatment regimens versus the standard regimen for drug-sensitive pulmonary tuberculosis. *Cochrane Database Syst Rev.* 2019;12 (12): CD012918. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD012918.pub2>.

2. Dodd P., Yuen C., Jayasooriya S., et al. Quantifying the global number of tuberculosis survivors: a modelling study. *Lancet Infect Dis.* 2021; 21 (7): 984–92. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30919-1](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30919-1).

3. Salhi B., Troosters T., Behaegel M., et al. Effects of pulmonary rehabilitation in patients with restrictive lung diseases. *Chest.* 2010; 137 (2): 273–9. <https://doi.org/10.1378/chest.09-0241>.

4. Troosters T., Janssens W., Demeyer H., Rabinovich R.A. Pulmonary rehabilitation and physical interventions. *Eur Respir Rev.* 2023; 32 (168): 220222. <https://doi.org/10.1183/16000617.0222-2022>.

5. Гусева В.А., Рублева Н.В., Коломиец В.М. Факторы эффективности реабилитации больных туберкулезом. В кн.: Актуальные вопросы

- борьбы с туберкулезом: материалы юбилейной сессии, посвященной 90-летию ЦНИИТ РАМН. 2011: 59–60.
- Guseva V.A., Rubleva N.V., Kolomiets V.M. Factors of effectiveness of rehabilitation of tuberculosis patients. In: Topical issues in the fight against tuberculosis: materials of the jubilee session dedicated to the 90th anniversary of TsNIIT RAMS. 2011: 59–60 (in Russ.).
6. Жук Н.А. Принципы лечения и реабилитация больных активным туберкулезом. *Проблемы туберкулеза и болезней легких*. 2005; 8: 26–29.
 - Zhuk N.A. Principles of treatment and rehabilitation of patients with active tuberculosis. *Problems of Tuberculosis and Lung Disease*. 2005; 8: 26–29 (in Russ.).
 7. Подгаева В.А., Голубев Д.Н. Влияние уровня жизни на показатели, отражающие эпидемическую ситуацию по туберкулезу на Урале. *Туберкулез и болезни легких*. 2011; 8: 8–10.
 - Podgaeva V.A., Golubev D.N. The impact of living standards on indicators reflecting the epidemic situation of tuberculosis in the Urals. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2011; 8: 8–10. (in Russ.).
 8. Gerke A. Morbidity and mortality in sarcoidosis. *Curr Opin Pulm Med*. 2014; 20 (5): 472–8.
 9. Алыменко М.А., Валиев Р.Ш., Валиев Н.Р. и др. Ассоциация генотипов ферментов биотрансформации ксенобиотиков с чувствительностью к торпидно-текущему туберкулезу легких. *Consilium Medicum*. 2024; 26 (3): 193–8. <https://doi.org/10.26442/20751753.2024.3.202659>.
 - Alymenko M.A., Valiev R.Sh., Valiev N.R., et al. Association of genotypes of biotransformation enzymes with susceptibility to chronic pulmonary tuberculosis. *Consilium Medicum*. 2024; 26 (3): 193–8 (in Russ.). <https://doi.org/10.26442/20751753.2024.3.202659>.
 10. Рембовский В.Р., Могиленкова Л.А. Процессы детоксикации при воздействии химических препаратов на организм. СПб.: Издательство Политехнического университета; 2017: 383 с.
 - Rembovsky V.R., Mogilenkova L.A. Detoxification processes when the body is exposed to chemicals. Saint Petersburg: Polytechnic University Publishing House; 2017: 383 pp. (in Russ.).
 11. Щербо С.Н., Щербо Д.С., Соколова Н.А. и др. Генетическая склонность и устойчивость к некоторым инфекционным заболеваниям. IV. Туберкулез. *Медицинский алфавит*. 2022; 1 (6): 7–10. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2022-6-7-10>.
 - Shcherbo S.N., Shcherbo D.S., Sokolova N.A., et al. Genetic predisposition and resistance to certain infectious diseases. IV. Tuberculosis. *Medical Alphabet*. 2022; 1 (6): 7–10 (in Russ.). <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2022-6-7-10> (in Russ.).
 12. Ан А.Р., Рудко А.А., Брагина Е.Ю. и др. Исследование ассоциации полиморфных разновидностей генов цитокиновых сигналов с туберкулезом легких. *Туберкулез и болезни легких*. 2013; 90 (8): 34–9.
 - An A.R., Rudko A.A., Bragina E.Yu., et al. Study of the association of polymorphic variants of cytokine signaling genes with pulmonary tuberculosis. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2013; 90 (8): 34–9 (in Russ.).
 13. Демьянов А.В., Котов А.Ю., Симбирцев А.С. Диагностическая ценность исследования уровней цитокинов в клинической практике. *Цитокины и воспаление*. 2003; 2 (3): 20–35.
 - Demyanov A.V., Kotov A.Yu., Simbirtsev A.S. Diagnostic value of the study of cytokine levels in clinical practice. *Cytokines and Inflammation*. 2003; 2 (3): 20–35 (in Russ.).
 14. Симбирцев А.С. Цитокины – система регуляции защитных реакций организма. *Цитокины и воспаление*. 2002; 1 (1): 9–16.
 - Simbirtsev A.S. Cytokines as a new system, regulating body defence reactions. *Cytokines and Inflammation*. 2002; 1 (1): 9–16 (in Russ.).
 15. Baggiotini M., Dewald B., Moser B. Human chemokines: an update. *Annu Rev Immunol*. 1997; 15: 675–705.
 16. Мордык А.В., Цыганкова Е.А., Пузырева Л.В., Турица А.А. Противотуберкулезный иммунитет и механизмы его формирования (обзор литературы). *Дальневосточный медицинский журнал*. 2014; 1: 126–30.
 - Mordyk A.V., Tsygankova E.A., Puzyreva L.V., Turitsa A.A. Antitubercular immunity and mechanisms of its formation (literature review). *Far Eastern Medical Journal*. 2014; 1: 126–30 (in Russ.).
 17. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. М.: Вильямс; 2020: 1104 с.
 - Haykin S.S. Neural networks: a comprehensive foundation. Macmillan; 1994: 696 pp. (in Russ.).
 18. Kriegeskorte N., Golan T. Neural network models and deep learning. *Curr Biol*. 2019; 29 (7): 231–6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.02.034>.
 19. Pérez J., Cabrera J.A., Castillo J.J., Velasco J.M. Bioinspired spiking neural network for nonlinear systems control. *Neural Netw*. 2018; 104: 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2018.04.002>.
 20. Фаустова К.И. Нейронные сети: применение сегодня и перспективы развития. *Территория науки*. 2017; 4: 83–7.
 - Faustova K.I. Neural networks: application today and development prospects. *Territory of Science*. 2017; 4: 83–7 (in Russ.).
 21. Хасанов А.Г., Шайбаков Д.Г., Жернаков С.В. и др. Нейронные сети для прогнозирования динамики развития заболеваний. *Креативная хирургия и онкология*. 2020; 10 (3): 198–204. <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2020-10-3-198-204>.
 - Hasanov A.G., Shaybakov D.G., Zhernakov S.V., et al. Neural networks in forecasting disease dynamics. *Creative Surgery and Oncology*. 2020; 10 (3): 198–204 (in Russ.). <https://doi.org/10.24060/2076-3093-2020-10-3-198-204>.
 22. Стрельцов В.А., Баранова В.Г., Столбун Ю.В. Необходимость оценки психологического статуса больных туберкулезом легких. *Туберкулез и болезни легких*. 2011; 5: 176–77.
 - Streltsov V.A., Baranova V.G., Stolbun Yu.V. The need to assess the psychological status of patients with pulmonary tuberculosis. *Tuberculosis and Lung Diseases*. 2011; 5: 176–77 (in Russ.).
 23. Adams D. The biology of the granulomas. Pathology of granulomas. New York. 1983: 1–19.
 24. Кантемирова Б.И., Сычев Д.А., Карпищенко В.Н. Исследование глутатиона как маркера второй фазы биотрансформации ксенобиотиков у детей с различной соматической патологией на фоне проводимого лечения. *Биомедицина*. 2013; 1 (2): 103–7.
 - Kantemirova B.I., Sychev D.A., Karpishchenko V.N. Study of glutathione as a marker of the second phase of xenobiotic biotransformation in children with various somatic pathologies against the background of the treatment. *Biomedicine*. 2013; 1 (2): 103–7 (in Russ.).
 25. Kaur M., Shahil Rahman T.K., Dolma S., et al. Xenobiotic metabolizing gene variants and the risk of male infertility – a systematic review, meta-analysis and in silico analysis. *Toxicol Rep*. 2025; 14: 102019. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.102019>.
 26. Bleasby K., Castle J.C., Roberts C.J., et al. Expression profiles of 50 xenobiotic transporter genes in humans and pre-clinical species: a resource for investigations into drug disposition. *Xenobiotica*. 2006; 36 (10–11): 963–88. <https://doi.org/10.1080/00498250600861751>.
 27. Maurice C.F., Haiser H.J., Turnbaugh P.J. Xenobiotics shape the physiology and gene expression of the active human gut microbiome. *Cell*. 2013; 152 (1–2): 39–50. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2012.10.052>.
 28. Rendina M., Turnbaugh P.J., Bradley P.H. Human xenobiotic metabolism proteins have full-length and split homologs in the gut microbiome. *G3*. 2025; 15 (9): jkaf131. <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkaf131>.
 29. Лакин К.М., Крылов Ю.Ф. Биотрансформация лекарственных веществ. М.: Медицина; 1981: 344 с.
 - Lakin K.M., Krylov Yu.F. Biotransformation of medicinal substances. Moscow: Meditsina; 1981: 344 pp. (in Russ.).
 30. Singh V., Dziwornu G.A., Chibale K. The implication of Mycobacterium tuberculosis-mediated metabolism of targeted xenobiotics. *Nat Rev Chem*. 2023; 7 (5): 340–54. <https://doi.org/10.1038/s41570-023-00472-3>.
 31. Liu Y., Li H., Dai D., et al. Gene regulatory mechanism of mycobacterium tuberculosis during dormancy. *Curr Issues Mol Biol*. 2024; 46 (6): 5825–44. <https://doi.org/10.3390/cimb46060348>.
 32. Mehta V.K., Deb P.S., Rao D.S. Application of computer techniques in medicine. *Med J Armed Forces India*. 2017; 50 (3): 215–8. [https://doi.org/10.1016/S0377-1237\(17\)31065-1](https://doi.org/10.1016/S0377-1237(17)31065-1).
 33. Thacharodi A., Singh P., Meenatchi R., et al. Revolutionizing healthcare and medicine: the impact of modern technologies for a healthier future – a comprehensive review. *Health Care Sci*. 2024; 3 (5): 329–49. <https://doi.org/10.1002/hcs2.115>.

34. Junaid S.B., Imam A.A., Balogun A.O., et al. Recent advancements in emerging technologies for healthcare management systems: a survey. *Healthcare*. 2022; 10 (10): 1940. <https://doi.org/10.3390/healthcare10101940>.
35. Penny W., Frost D. Neural networks in clinical medicine. *Med Decis Making*. 1996; 16 (4): 386–98. <https://doi.org/10.1177/0272989X9601600409>.
36. Toma A., Diller G.P., Lawler P.R. Deep learning in medicine. *JACC Adv*. 2022; 1 (1): 100017. <https://doi.org/10.1016/j.jaccadv.2022.100017>.
37. Miotto R., Wang F., Wang S., et al. Deep learning for healthcare: review, opportunities and challenges. *Brief Bioinform*. 2017; 19 (6): 1236–46. <https://doi.org/10.1093/bib/bbx044>.
38. Arntz A., Weber F., Handgraaf M., et al. Technologies in home-based digital rehabilitation: scoping review. *JMIR Rehabil Assist Technol*. 2023; 10: e43615. <https://doi.org/10.2196/43615>.
39. Celian C., Redd H., Smaller K., et al. Use of technology in the rehabilitation setting: therapy observations, mixed methods analysis, and data visualization. *Arch Rehabil Res Clin Transl*. 2025; 7 (1): 100425. <https://doi.org/10.1016/j.arrct.2024.100425>.

Сведения об авторах / About the authors

Алыменко Максим Алексеевич, к.м.н. / **Maxim A. Alymenko**, PhD – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7341-3648>. Scopus Author ID: 57189520353. WoS ResearcherID: HGC-7298-2022. eLibrary SPIN-code: 7833-4640. E-mail: maxim.alymenko@gmail.com.

Гарбузова Ильмира Эмиргамзаевна / **Ilmira E. Garbuzova** – ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9460-4648>. WoS ResearcherID: KHY-0937-2024. eLibrary SPIN-code: 3786-2776.

Липатов Вячеслав Александрович, д.м.н., проф. / **Viacheslav A. Lipatov**, Dr. Sci. Med., Prof. – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6121-7412>. WoS ResearcherID: D-8788-2013. Scopus Author ID: 6603948707. eLibrary SPIN-code: 1170-1189.

Кобелев Илья Юрьевич / **Ilya Yu. Kobelev** – ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1703-2233>.

Рагулина Вера Алексеевна, к.б.н., доцент / **Vera A. Ragulina**, PhD, Assoc Prof. – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9461-9255>. WoS ResearcherID: G-2153-2016. Scopus Author ID: 7801673012. eLibrary SPIN-code: 7694-8632.

Валиев Равиль Шамилович, д.м.н., проф. / **Ravil Sh. Valiev**, Dr. Sci. Med., Prof. – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8353-8655>. Scopus Author ID: 7103235075. eLibrary SPIN-code: 4028-4329.

Турсунова Наталья Владимировна, к.б.н. / **Natalya V. Tursunova**, PhD – ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7796-6292>. eLibrary SPIN-code: 7897-4050.