

УДК 616.981.21/.958.7:616-036.22

<http://dx.doi.org/10.22328/2077-9828-2026-18-1-94-103>

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВИЧ-ИНФЕКЦИИ В УРАЛЬСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ

Я. В. Маковская*, М. В. Питерский, А. О. Иванова, Ю. А. Михайленко, А. Е. Панова, А. В. Семенов

Научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром», Екатеринбург, Россия

Цель: создание математической модели для прогнозирования развития эпидемического процесса ВИЧ-инфекции в Уральском федеральном округе РФ (УФО) с учетом социально-экономического показателя и показателя заболеваемости ВИЧ-инфекцией.

Материалы и методы. В исследовании использована динамика показателя заболеваемости ВИЧ-инфекцией в УФО за период с 1998 по 2023 г. В качестве предиктора использовался экономический показатель — безработица за период 1991–2024 гг. С целью учета временной зависимости и возможных отложенных эффектов влияния доходов на заболеваемость был сформирован лаговый набор показателя со сдвигом до 6 лет. Для построения прогностической модели применялись искусственные нейронные сети (ИНС). В качестве базовой архитектуры ИНС использовалась радиально-базисная функция (РБФ). Обучение проводилось с помощью модуля SANN программного пакета STATISTICA 12. Данные были разделены на обучающую и тестовую выборки (85/15), для валидации применялась кросс-проверка на скрытом периоде 2021–2023 гг. Для оценки точности прогноза использовались коэффициент детерминации, а также средняя абсолютная ошибка и средняя абсолютная процентная ошибка. Эти показатели рассчитывались как на обучающей и тестовой выборках, так и в ходе кросс-проверки и экстраполяции прогнозных значений.

Результаты и их обсуждение. Для прогнозирования заболеваемости ВИЧ-инфекцией в УФО построены и протестированы 1000 моделей ИНС РБФ, из которых 20 с наилучшими метриками были отобраны для прогнозирования. Лучшая модель (РБФ 3–16–1) продемонстрировала высокую точность: коэффициент детерминации $R^2=0,9$, средняя абсолютная ошибка $MAD=6,8$. Сформирован прогноз заболеваемости ВИЧ-инфекцией до 2028 года, который составит 81,4‰. С учетом других обученных ИНС РБФ с метриками качества, превышающих 0,9 уровень заболеваемости, в 2028 году ожидается в диапазоне от 45,9‰ до 112‰.

Заключение. Прогноз заболеваемости ВИЧ-инфекции в УФО, опирающийся на экономический предиктор, показал высокую точность на основании метрик качества. Учет безработицы с лагом 6 лет позволил учесть социально-экономические факторы. Использование прикладного ПО со встроенными функциями прогнозирования с помощью ИНС делает методику доступной специалистам и создает основу для профилактических стратегий и управленческих решений в сфере здравоохранения.

Ключевые слова: ВИЧ, заболеваемость, машинное обучение (machine learning), радиально-базисная функциональная нейронная сеть (РБФ), прогнозирование, безработица

* Контакт: Маковская Яна Валерьевна, takovskaia_iv@niivrom.ru

FORECAST OF THE HIV EPIDEMIC PROGRESSION IN THE URAL FEDERAL DISTRICT

I. V. Makovskaya*, M. V. Piterkiy, Ya. A. Mikhailenko, A. E. Panova, A. V. Semenov

Scientific Research Institute of Viral Infections «Virome», Ekaterinburg, Russia

The aim of the study. Development of a mathematical model for forecasting the progression of the HIV epidemic in the Ural Federal District of the Russian Federation (hereinafter referred to as the UFD), taking into account socio economic indicators and HIV incidence rates.

Materials and methods. The study used HIV incidence rates in the Ural Federal District (UFD) for 1998–2023. An economic indicator — unemployment for the period 1991–2024 — was used as a predictor. To account for time dependence and possible delayed effects of income on incidence, a lagged set of indicators with a shift of up to 6 years was formed. Artificial neural networks

(ANN) were used to build a predictive model. The radial basis function (RBF) was used as the basic ANN architecture. Training was performed using the SANN module of the STATISTICA 12 software package. The data were divided into training and test sets (85/15), and cross-validation was used on the latent period 2021–2023 for validation. The coefficient of determination, as well as the mean absolute error and the mean absolute percentage error, were used to assess the forecast accuracy. These indicators were calculated both on the training and test samples, and during cross-validation and extrapolation of predicted values.

Result and discussion. To forecast HIV incidence in the Ural Federal District, 1,000 RBF ANN models were built and tested, of which 20 with the best metrics were selected for forecasting. The best model (RBF 3–16–1) demonstrated high accuracy: the determination coefficient $R^2=0.9$, the mean absolute error $MAD=6.8$. A forecast of HIV incidence through 2028 was generated, which will amount to 81.4‰. Taking into account other trained RBF ANNs with quality metrics exceeding 0.9, the incidence rate in 2028 is expected to range from 45.9‰ to 112‰.

Conclusion. A forecast of HIV incidence in the Ural Federal District, based on an economic predictor, demonstrated high accuracy based on quality metrics. Accounting for unemployment with a six-year lag allowed for socioeconomic factors to be taken into account. The use of application software with built-in ANN forecasting functions makes the methodology accessible to specialists and provides a basis for preventive strategies and management decisions in healthcare.

Keywords: HIV, incidence, machine learning, radial basis function neural network (RBF), forecasting, unemployment

* Contact: *Makovskaya Iana Valerievna, makovskaia_iv@niiviom.ru*

© Маковская Я.В. и соавт., 2026 г.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Маковская Я.В., Питерский М.В., Иванова А.О., Михайленко Ю.А., Панова А.Е., Семенов А.В. Прогноз развития эпидемического процесса ВИЧ-инфекции в Уральском федеральном округе // *ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии*. 2026. Т. 18, № 1. С. 94–103, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2077-9828-2026-18-1-94-103>.

Conflict of interest: the authors stated that there is no potential of interest.

For citation: Makovskaya I.V., Piterskiy M.V., Mikhailenko Ya.A., Panova A.E., Semenov A.V. Forecast of the HIV epidemic progression in the Ural federal district // *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*. 2026. Vol. 18, No. 1. P. 94–103, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2077-9828-2026-18-1-94-103>.

Введение. Прогноз заболеваемости ВИЧ-инфекции — трудоемкая аналитическая задача, предполагающая обработку обширного массива разнородных данных: от социально-экономических предикторов и демографических параметров до сведений о доступности медицинской помощи и эпидемиологической обстановки. Существующая практика отечественных исследователей опирается преимущественно на линейную регрессию, однако этот метод не всегда способен отразить специфику динамики заболеваемости, с разнонаправленными трендами.

Анализ больших данных в современной научной практике все чаще опирается на искусственные нейронные сети (ИНС). Такой подход имеет важное преимущество, заключающееся в обнаружении и математическом закреплении сложных, неочевидных зависимостей между параметрами, что существенно повышает качество прогноза [1]. Особенно ценно то, что ИНС обнаруживают скрытые тенденции изменения временных рядов, неочевидные при рутинном анализе [2].

Ранее для прогноза заболеваемости ВИЧ-инфекцией успешно использовали такой стандартный метод анализа временных рядов, как интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего [3, 4]. Однако дальнейшие исследования показали, что ИНС с нелинейным обратным распространением имеет значительные преимущества, поскольку эффекты подгонки и прогнозирования нейронной сети более точно адаптируются к временному ряду [5].

Еще одно исследование продемонстрировало перспективность комбинации нескольких методик для прогноза распространения вирусного гепатита С. При объединении многослойного персептрона, графовой вероятностной модели (байесова сеть) и метода бинарной классификации для построения деревьев решений была достигнута точность 95,9%, что выше каждого из методов по отдельности [6]. Использование методов машинного обучения и ИНС для предсказания динамики заболеваемости ВИЧ демонстрирует значительный потенциал: такие подходы обеспечивают более

высокую точность, оперативность и результативность прогнозов [7].

Ограниченный размер доступного временного ряда и его вариабельность не позволяют при использовании классических математических моделей получить удовлетворительные метрики качества как при кросс-проверке, так и при тестировании на основной части временного ряда [8]. С учетом этого использование нейронных сетей выглядит обоснованным: их адаптивность к изменениям структуры и динамики временных рядов позволяет добиться большей гибкости и устойчивости прогнозов.

Разработка соответствующих прогностических инструментов — актуальное научное направление, открывающее возможности для усиления контроля над распространением инфекции и внедрения целенаправленных профилактических стратегий. Утвержденная в 2020 г. Государственная стратегия противодействия распространению ВИЧ-инфекции в РФ до 2030 года¹, охватывает ключевые направления: профилактику, диагностику и лечение инфекции. Ее выполнение потребует дополнительных средств на приобретение антиретровирусных препаратов, развитие диагностических технологий и реализацию профилактических мероприятий. Основой для прогнозирования эпидемиологической ситуации по ВИЧ должны стать принципы доказательной медицины в сочетании с применением инновационных цифровых технологий. Для здравоохранения принципиально важно иметь точные прогнозы: они помогают оптимально планировать ресурсы и разрабатывать профилактические меры. Существенное затруднение возникает при необходимости учитывать сезонные и циклические особенности эпидемий, но это не отменяет необходимости подобных прогнозов [9].

Такие показатели, как охват населения скринингом на ВИЧ, доля пациентов на АРТ и с вирусной супрессией, могли бы выступать как предикторы заболеваемости ВИЧ инфекции, однако сбор соответствующих статистических данных по современной методологии был организован только после

1999 года^{2,3} (охват скринингом и АРТ) и после 2015 года⁴ (доля с вирусной супрессией), что недостаточно для построения предиктивной модели, опирающейся на весь период эпидемии ВИЧ-инфекции в России.

Социально-экономические факторы в России во многом определяют вариативность уровня заболеваемости и смертности от инфекционных заболеваний по регионам [10]. Экономическая нестабильность и бедность усиливают уязвимость населения к инфекционным заболеваниям, что требует комплексного подхода к снижению социального неравенства и корректировки ресурсов здравоохранения на региональном уровне [11].

Одним из ключевых социально-экономических факторов, влияющих на уровень заболеваемости населения, является показатель безработицы. Известно, что безработица существенно ухудшает как физическое, так и психическое здоровье людей. Повышение безработицы сопряжено с ростом числа случаев хронических заболеваний, стрессовых состояний, ухудшением общего качества жизни и повышением смертности, в том числе вследствие сердечно-сосудистых заболеваний и психических расстройств [12].

Статистические методы — главный инструмент моделирования временных рядов. Однако возникающая нелинейность математических моделей осложняет прогнозирование сложных явлений, и именно нейронные сети помогают справиться с этой задачей [13]. Преимущество нейронной сети с радиально базисной функцией заключается в отсутствии необходимости формулировать строгие предположения о характеристиках эпидемического процесса распространения ВИЧ-инфекции — достаточно использовать предикторы, имеющие причинно-следственную связь с изменением динамики заболеваемости. При этом ИНС демонстрируют способность обнаруживать скрытые закономерности в развитии эпидемии. По сравнению с классическими методами анализа временных рядов для ИНС не обязательно использовать чрез-

¹ Распоряжение Правительства РФ от 21 декабря 2020 г. № 3468-р О Государственной стратегии противодействия распространению ВИЧ-инфекции в РФ на период до 2030 г.

² Постановление Госкомстата РФ от 5 мая 1999 г. № 30 «Об утверждении форм федерального государственного статистического наблюдения за заболеваемостью населения инфекционными и паразитарными болезнями, профилактическими прививками».

³ Постановление от 29 июня 1999 г. № 49 «Об утверждении годовых форм федерального государственного статистического наблюдения за заболеваемостью населения, профилактическими прививками и медицинской помощью женщинам и детям».

⁴ Приказ от 30 декабря 2015 г. № 672 «Об утверждении статистического инструментария для организации министерством здравоохранения Российской Федерации федерального статистического наблюдения в сфере здравоохранения».

вычайно длинный временной ряд, обучение ИНС успешно проходит при использовании самых разных структурированных данных, в том числе из смежных отраслей [14]. Благодаря описанным свойствам нейронная сеть предоставляет исследователям инновационный механизм для анализа и предсказания эпидемиологической ситуации по ВИЧ-инфекции. В современной медицине все шире распространяется использование ИИ технологий для прогнозирования развития эпидемий.

Цель: создание математической модели для прогнозирования развития эпидемического процесса ВИЧ-инфекции в Уральском федеральном округе (УФО) с учетом социально-экономического показателя и динамики заболеваемости ВИЧ-инфекцией.

Материалы и методы. Для обучения ИНС был использован временной ряд заболеваемости ВИЧ-инфекцией, регистрировавшейся в Уральском федеральном округе, за 26 лет, начиная с 1998 года. В качестве основного предиктора использовался экономический показатель — уровень безработицы населения за период с 1991 по 2024 год, рассчитанный как доля числа безработных от всего населения Уральского федерального округа. Данные о заболеваемости ВИЧ-инфекцией получены из информационных бюллетеней Специализированного научно-исследовательского отдела по профилактике и борьбе со СПИДом ФБУН ЦНИИ эпидемиологии Роспотребнадзора [15–32], данные о числе безработных и численности населения получены из Единой межведомственной информационной статистической системы.

С помощью Microsoft Excel 2019 было сформировано пространство лагов уровня безработицы в федеральном округе, в котором выбран временной ряд с лагом в 6 лет, имеющий наиболее тесную корреляцию с заболеваемостью ВИЧ-инфекцией.

В процессе создания прогнозно моделирующей системы применена радиально базисная нейронная сеть. Ее разработка и обучение выполнялись с помощью программного комплекса STATISTICA (data analysis software system), версия 12 (StatSoft Inc). Разработка нейронной сети осуществлялась поэтапно: сначала строился график временного ряда, затем выполнялась настройка параметров радиально базисной функции, после чего проводилось обучение тысячи нейросетей. Далее осуществлялся отбор моделей на основе минимальной средней абсолютной и абсолютной процентной ошибок предсказания, а в завершение — построение графиков временных рядов

с использованием оптимальной нейросети для формирования краткосрочного прогноза.

При кросс валидации (2021–2023 гг.) и экстраполяции на весь временной ряд, а также для обучающей и тестовой выборки проводились расчеты метрик качества модели, что позволило оценить надежность моделей при ограниченной выборке. Основу оценки составили: коэффициент детерминации, фиксирующий степень соответствия прогнозов реальным значениям; средняя абсолютная ошибка, демонстрирующая отклонение в абсолютных единицах; и средняя абсолютная процентная ошибка, выражающая погрешность в процентах.

Результаты и их обсуждение. На протяжении всего периода эпидемии ВИЧ-инфекции в России Уральский федеральный округ являлся одним из наиболее неблагоприятных регионов по ВИЧ-инфекции с высокой интенсивностью эпидемического процесса [33–35]. В 2023 году заболеваемость ВИЧ-инфекцией в УФО составляла 73,23‰, на 30,0% превышая заболеваемость в Российской Федерации (56,23‰). Среднегодовое количество случаев за 1998–2023 гг. в УФО составляло 88,28‰, превышая аналогичный показатель по России в 2 раза (РФ: 43,93‰). Благодаря успехам в профилактике ВИЧ-инфекции (охват выявляемости антиретровирусной терапией) с 2015 года сформировался локальный тренд к снижению уровня заболеваемости с темпом снижения 6,1% (тест Манна–Кендалла подтвердил статистическую значимость тренда: $S = -148$, $p < 0,02$), но несмотря на это сохраняется общая тенденция к росту ($S = 95$, $p = 0,038$) с многолетним темпом прироста за 26 лет 14,8% (рис. 1).

Для обучения ИНС с радиально-базисной функцией использовали шестой лаг показателя уровня безработицы как предиктор и временной ряд заболеваемости ВИЧ-инфекцией в Уральском федеральном округе как отклик.

Данные о заболеваемости случайным образом разделили на две группы: обучающую (85%) и тестовую (15%). Число скрытых нейронов варьировалось от 10 до 15 штук (табл. 1). Минимальное количество в 10 нейронов позволило достичь высокой гибкости обучения, ограничение в 15 нейронов продиктовано размером временного ряда. Функции активации нейронов для каждого слоя ИНС последовательно перебирали, ориентируясь на оптимальность обученных ИНС. Оптимальность обученных ИНС оценивали по контрольной ошибке, которая рассчитывалась как разница между прогнозируемыми значениями

и реальными данными временного ряда, не задействованными в обучении.

и 15% тестовая подвыборка, для различных комбинаций функций активации провели обучение по тысяче

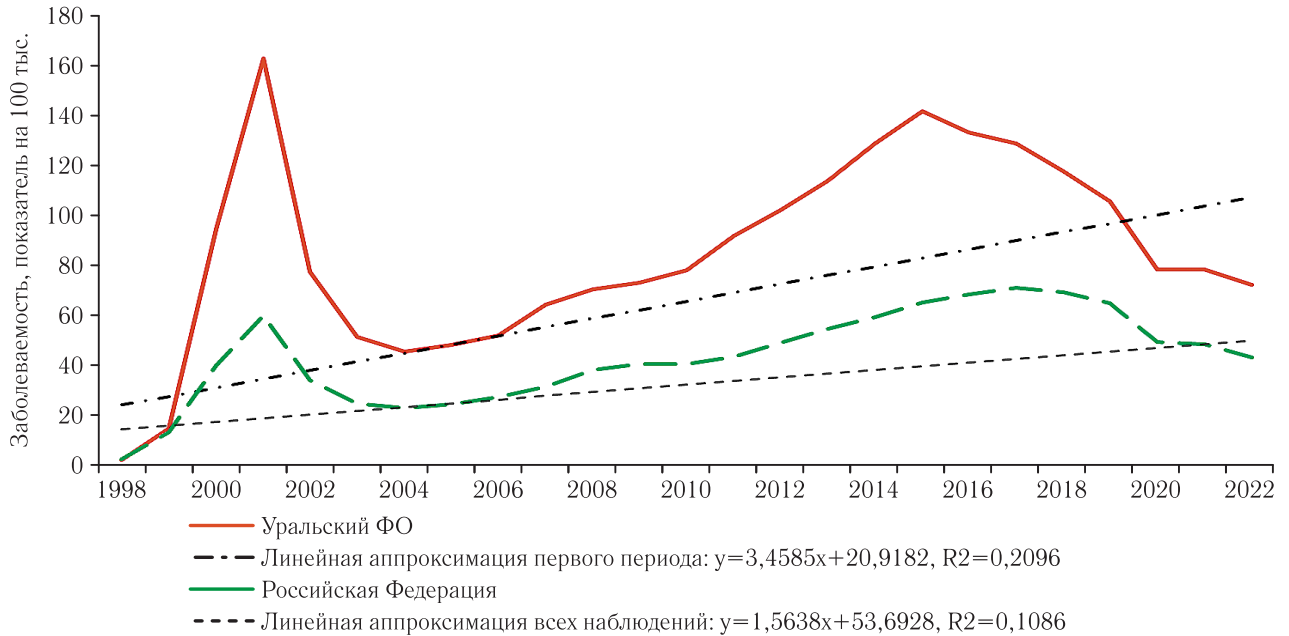


Рис. 1. Регистрируемая заболеваемость ВИЧ-инфекцией в Уральском федеральном округе и Российской Федерации за 1998–2023 гг.

Fig. 1. Reported HIV incidence in the Ural Federal District and the Russian Federation for the period 1998–2023

Параметры для обучения ИНС РБФ

Таблица 1

Parameters for RBF training

Table 1

Вид статистического анализа	Регрессия временного ряда
Начальное значение для генерации случайных выборок	1000
Число входных нейронов	3
Число выходных нейронов	1
Число внутренних нейронов для ИНС радиально-базисной функции	Мин. 10 Макс. 15
Число обучаемых ИНС	1000
Функция активации внутренних нейронов	Функция активации Гаусса
Функция активации выходных нейронов	Тождественная

В процессе обучения нейронной сети для оптимизации весовых коэффициентов использовали квазиньютоновский алгоритм оптимизации (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). Постепенное увеличение весовых коэффициентов в ходе оптимизации последовательно наращивало нелинейность системы, обеспечивая тем самым плавное и стабильное обучение без потери устойчивости. Чтобы минимизировать суммарную ошибку, алгоритм обучения был запущен с предельным числом итераций (эпох), равным 1000.

При выявлении оптимальных ИНС с помощью случайных подвыборок временного ряда, сформированных в пропорции 85% обучающая подвыборка

РБФ-сетей. На этапе первичной оценки ключевым критерием выступил коэффициент корреляции между предсказанными значениями и тестовой подвыборки. По результатам анализа выделены пять наиболее эффективных искусственных нейронных сетей.

Следующим этапом была кросс-проверка на независимом временном отрезке 2021–2023 гг., затем производилась оценка с использованием трех взаимодополняющих метрик, таких как среднее абсолютное отклонение и средняя процентная ошибка, а также коэффициент детерминации. Для объективности прогностической способности модели эти годы не применялись в тестировании и не включались в обучение. С целью анализа поведе-

ния сгенерированных искусственных нейронных сетей на полном временном интервале прогнозные показатели были экстраполированы на весь диапазон данных — с 1998 по 2023 г. и также подверглись тем же критериям оценки (табл. 2).

Несмотря на идеально низкие значения MAPE в одном из периодов, модель № 5 РБФ 3–18–1 характеризуется повышенным уровнем средней абсолютной ошибки, что может указывать на переобучение или недостаточную устойчивость.

Таблица 2

Экстраполированные прогнозы и результаты кросс-проверки РБФ-сетей

Table 2

Extrapolated forecasts and cross-validation results of RBF networks

№ ИНС	Имя ИНС	Кросс-проверка: 2021–2023 гг.			Экстраполяция прогноза на весь временной ряд		
		RI	MAD	MAPE	RI	MAD	MAPE
1	РБФ 3–16–1	0,9	6,8	0,08%	0,9	7,7	8,9%
2	РБФ 3–15–1	0,9	6,53	0,86%	0,8	7,4	8,3%
3	РБФ 3–17–1	0,8	11,9	2,91%	0,9	9,4	4,4%
4	РБФ 3–18–1	0,4	18,2	3,75%	0,8	11,3	7,0%
5	РБФ 3–18–1	1,0	8,6	0,05%	0,9	13,6	6,2%

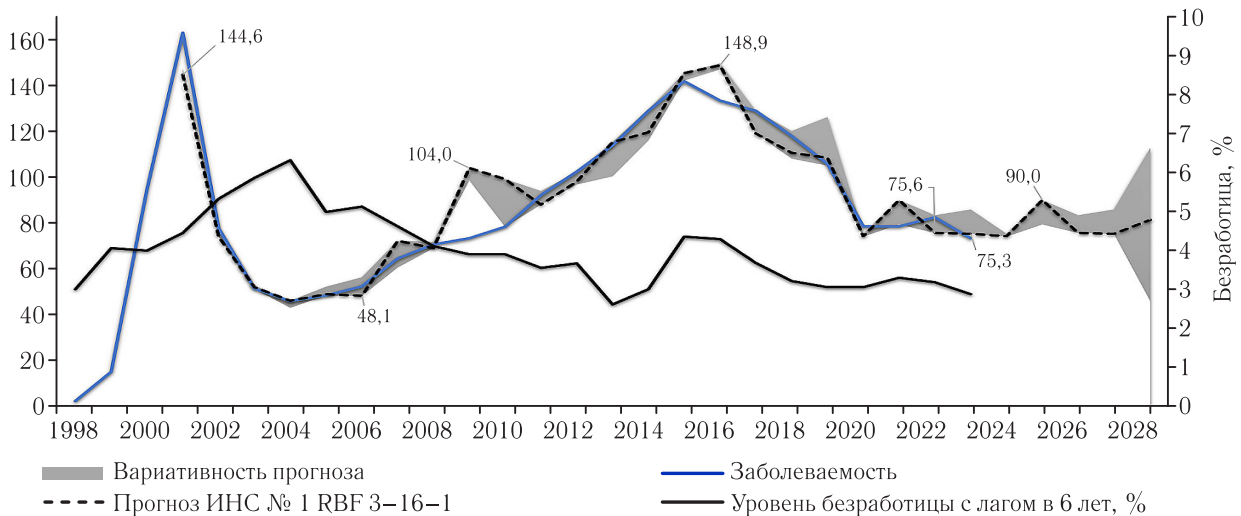


Рис. 2. Заболеваемость, рассчитанная на основе РБФ-сети № 1 (3–16–1) с 2001 по 2028 г. с вариативностью прогноза и предикторами (показатели из расчета на 100 тыс. человек)

Fig. 2. Incidence calculated based on RBF network No. 1 (3–16–1) from 2001 to 2028 with forecast variability and predictors (indicators per 100,000 people)

Анализ результатов показал, что среди пяти исследованных моделей оптимальными являются две: № 1 — РБФ 3–16–1 и № 2 — РБФ 3–15–1. Эти модели демонстрируют высокую точность прогнозов: коэффициенты детерминации R^2 превышают 0,97, а показатели MAPE ниже 7%, что свидетельствует о высоком качестве моделирования динамики исследуемых показателей.

№ 1 — РБФ 3–16–1 показала результаты лучше по совокупности метрик: R^2 до 0,999, минимальные значения MAD и MAPE. Такая стабильность и точность прогнозов позволяют рекомендовать данную модель в качестве основной для построения долгосрочных предсказаний заболеваемости на период 2024–2028 гг.

Модель № 4 показала худшие результаты и была исключена из дальнейшей работы.

Используя РБФ-сеть № 1 конфигурации 3 16 1, благодаря лагу предиктора безработица рассчитаны прогнозные значения на 5 лет вперед с уровнем заболеваемости ВИЧ-инфекцией к 2028 году $81,4\text{‰}$. Для проверки устойчивости прогноза и определения диапазона возможных значений были задействованы ИНС №№ 2 и 3, обладающие различной архитектурой и уровнем аппроксимации. Принимая во внимание вариативность модели возможный разброс значений на 2028 год составляет $45,9\text{–}112,7\text{‰}$, при этом пик придется на 2025 год с вариативностью $79,4\text{–}90,0\text{‰}$ (рис. 2).

По данным региональных исследований в России увеличение безработицы связано с ростом показателей заболеваемости [36]. В нашем исследовании было установлено, что незначительные подъемы уровня безработицы в последние годы будут коррелировать с аналогичным ростом заболеваемости ВИЧ-инфекцией.

Искусственные нейронные сети, способные в условиях ограниченного количества надежных предикторов и коротких временных рядов рассчитать адекватный прогноз, являются незаменимым инструментом анализа заболеваемости ВИЧ-инфекцией. Дальнейшим перспективным направлением является интеграция моделей нейросетей с дополнительными социально-демографическими и медицинскими показателями для повышения прогностической точности.

Результаты аналогичных исследований демонстрируют высокую эффективность применения моделей глубокого обучения, в частности сети с долгой краткосрочной памятью (LSTM), для прогнозирования заболеваемости ВИЧ на основе временных рядов [37]. Модель LSTM показала лучшие показатели точности по сравнению с традиционными методами, что подтверждает потенциал нейросетевых алгоритмов в математическом моделировании эпидемических процессов. Данная модель позволила включить отложенные эффекты влияния экономических факторов, так же как и в нашем исследовании. При этом подчеркивается важность выбора оптимального временного лага для учета зависимостей.

Прогнозирование индивидуального риска заражения ВИЧ с использованием обработки данных по методу случайного леса (Random forest) [38], а также использование архитектур GRU (Gated Recurrent Unit) с оптимизацией гиперпараметров для прогнозирования заболеваемости [39] тоже показали высокую эффективность машинного обучения в задачах прогнозирования. Однако примененный нами подход, основанный на РБФ, отличается более простым устройством и меньшей требовательностью к вычислительным ресурсам, что

делает его удобным для практического применения в условиях ограниченного объема данных.

Заключение. В Уральском федеральном округе применение ИНС с радиально-базисной функцией при прогнозировании заболеваемости ВИЧ-инфекцией продемонстрировало значительную результативность и надежность построенных прогнозных моделей на основании коэффициента детерминации (R^2 до 0,999) и низких уровней средней абсолютной ошибки и средней абсолютной процентной ошибки. Использование в качестве предиктора экономического показателя — уровня безработицы с лагом 6 лет, позволило учесть социально-экономические факторы, влияющие на распространение заболевания, а также выявить отложенные эффекты их воздействия.

Несмотря на снижение заболеваемости ВИЧ-инфекцией в последние годы, наиболее вероятный прогноз к 2028 году показывает небольшой рост (до 81,4‰) относительно текущих уровней, однако неопределенность, связанная с прогнозами менее точных ИНС, предусматривает рост заболеваемости до 112‰.

Прикладное ПО со встроенными функциями прогнозирования с помощью ИНС продемонстрировало удобство в практическом применении: работа с ним не требует специальных навыков программирования, что делает методику доступной для широкого круга специалистов в области эпидемиологии и медицинской статистики. Это обеспечивает возможность использования предложенного подхода не только исследователями, но и практическими врачами-эпидемиологами при планировании профилактических мероприятий. Таким образом, использование РБФ-сетей в сочетании с доступным аналитическим инструментарием, открывает перспективы для разработки надежных прогностических моделей в условиях ограниченного объема данных. Полученные результаты могут служить научной и практической основой для принятия управленческих решений в сфере здравоохранения и формирования профилактических стратегий.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Abdolrasol M.G.M., Hussain S.M.S., Ustun T.S., Sarker M.R., Hannan M.A., Mohamed R., Ali J.A., Mekhilef S., Milad A. Artificial Neural Networks Based Optimization Techniques: A Review // *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 21. P. 2689. doi: 10.3390/electronics10212689.
2. Niazkar H.R., Niazkar M. Application of artificial neural networks to predict the COVID-19 outbreak // *Global Health Research and Policy*. 2020. Vol. 5, No. 1. P. 50. doi: 10.1186/s41256-020-00175-y.
3. Мельникова Е.Н. Прогнозирование эпидемического процесса ВИЧ-инфекции инструментами ARIMA и Microsoft Excel // *Здоровье населения и среда обитания*. 2024. Т. 32, № 7. С. 68–75. [Melnikova E.N. Forecasting the Epidemic Process of HIV Infection using ARIMA and

- Microsoft Excel Tools. *Public Health and Life Environment — PH&LE*, 2024, Vol. 32, No. 7, pp. 68–75 (In Russ.). doi: 10.35627/2219-5238/2023-32-7-68-75.
4. Кондратова С.Е., Марченко А.Н., Мельникова Е.Н. Моделирование прогнозирования развития эпидемического процесса ВИЧ-инфекции в регионе с высоким уровнем пораженности ВИЧ как детерминанта направленности противоэпидемических мер // *ВИЧ-инфекция и иммуносупрессии*. 2021. Т. 13, № 2. С. 85–93. [Kondratova S.Ye., Marchenko A.N., Melnikova E.N. Modeling of forecasting the development of the HIV epidemic process in a region with a high level of HIV infection as a determinant of the direction of anti-epidemic measure. *HIV Infection and Immunosuppressive Disorders*, 2021, Vol. 13, No. 2, pp. 85–93 (In Russ.). doi: 10.22328/2077-9828-2021-13-2-85-93.
 5. Li Z., Li Y. A comparative study on the prediction of the BP artificial neural network model and the ARIMA model in the incidence of AIDS // *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2020. Vol. 20, No. 1. P. 143. doi: 10.1186/s12911-020-01157-3.
 6. Edeh M.O., Dalal S., Dhaou I.B., Agubosim C.C., Umoke C.C., Richard-Nnabu N.E., Dahiya N. Artificial Intelligence-Based Ensemble Learning Model for Prediction of Hepatitis C Disease // *Frontiers in Public Health*. 2022. Vol. 10. P. 892371. doi: 10.3389/fpubh.2022.892371.
 7. Котловский М.Ю., Цыбикова Э.Б., Лорсанов С.М., Фадеев П.А., Фадеева С.О., Гусев А.В. Разработка модели машинного обучения для прогнозирования числа впервые выявленных пациентов с ВИЧ инфекцией в субъектах Российской Федерации // *Врач и информационные технологии*. 2025. № 3. С. 16–29. [Kotlovsky M.Yu., Tsybikova E.B., Lorsanov S.M., Fadeev P.A., Fadeeva S.O., Gusev A.V. Development of a machine learning model predicting the incidence of newly diagnosed HIV infection in the subjects of the Russian Federation. *Medical doctor and information technology*, 2023, No. 3, pp. 16–29 (In Russ.). doi: 10.25881/18110193_2023_3_16.
 8. Онищенко Г.Г., Смоленский В.Ю. Роль приоритетного национального проекта в сфере здравоохранения в реализации стратегии борьбы с эпидемией ВИЧ-инфекции в Российской Федерации // *Гигиена и санитария*. 2011. № 2. С. 11–20. [Onishchenko G.G., Smolenskiy V.Yu. Role of the priority national health project in implementing HIV epidemic control strategy in the Russian Federation. *Hygiene and Sanitation*, 2011, No. 2, pp. 11–20 (In Russ.).]
 9. Косова А.А., Чалапа В.И., Ковтун О.П. Методы моделирования и прогнозирования динамики эпидемического процесса инфекционных болезней // *Уральский медицинский журнал*. 2023. Т. 22, № 4. С. 102–112. [Kosova A.A., Chalapa V.I., Kovtun O.P. Methods for modelling and forecasting dynamics of infectious diseases. *Ural Medical Journal*, 2023, Vol. 22, No. 4, pp. 102–112 (In Russ.). doi: 10.52420/2071-5943-2023-22-4-102-112.
 10. Колосницына М.Г., Чубаров М.Ю. Социально-экономические факторы смертности от инфекционных заболеваний в российских регионах // *Социальные аспекты здоровья населения*. 2021. Т. 67, № 5. С. 2. [Kolosnitsyna M.G., Chubarov M.Yu. Socio-economic factors of mortality from infectious diseases in the Russian regions. *Social aspects of population health*, 2021, Vol. 67, No. 5, p. 2 (In Russ.). doi: 10.21045/2071-5021-2021-67-5-2.
 11. Пастухова Е.Я., Морозова Е.А., Челомбитко А.Н. Взаимосвязь социально-экономических факторов и различных причин смертности населения региона // *Фундаментальные исследования*. 2019. № 6. С. 121–125. [Pastukhova E.Ya., Morozova E.A., Chelombitko A.N. The relationship of socio-economic factors and various causes of mortality in the population of the region. *Fundamental research*. 2019, No. 6, pp. 121–125 (In Russ.). doi: 10.17513/fr.42496.
 12. Sociological Institute of the Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Rusinova N.L., Safronov V.V., Sociological Institute of the Russian Academy of Sciences, St Petersburg. The Effects of Unemployment on Health in European Countries: The Role of Welfare State // *Sociological Journal*. 2017. Vol. 23, No. 2. P. 28–50. doi: 10.19181/socjour.2017.23.2.5158.
 13. Костина Л.Н., Гареева Г.А. Нейронные сети в задачах прогнозирования временных рядов // *Инновационная наука*. 2015. № 6–2. [Kostina L.N., Gareeva G.A. Neural networks in time series forecasting problems. *Innovative science*. 2015. Vol. 6–2 (In Russ.).]
 14. Kondratyev M.A. Forecasting methods and models of disease spread // *Computer Research and Modeling*. 2013. Vol. 5, No. 5. P. 863–882. doi: 10.20537/2076-7633-2013-5-5-863-882.
 15. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В., Кравченко А.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 30. 2007. 32 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V., Kravchenko A.V. HIV infection. Information Bulletin No. 30. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2007. 32 p. (In Russ.).]
 16. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 31. 2008. 82 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 31. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2008. 82 p. (In Russ.).]
 17. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 33. 2009. 24 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 33. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 82 p. (In Russ.).]

18. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 34. 2010. 52 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 34. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2010. 52 p. (In Russ.)].
19. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 35. 2011. 51 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 35. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2011. 51 p. (In Russ.)].
20. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В., ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 36. 2012. 53 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 36. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2012. 53 p. (In Russ.)].
21. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 38. 2013. 53 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 38. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2013. 53 p. (In Russ.)].
22. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В., Тушина О.И. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 39. 2014. 53 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V., Tushina O.I. HIV infection. Information Bulletin No. 39. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2014. 53 p. (In Russ.)].
23. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Тушина О.И., Буравцова Е.В., Кравченко А.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 40. 2015. 56 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Tushina O.I., Buravtsova E.V., Kravchenko A.V. HIV infection. Information Bulletin No. 40. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2015. 56 p. (In Russ.)].
24. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Симашев Т.И., Буравцова Е.В., Сирица А.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 41. 2016. 56 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Simashev T.I., Buravtsova E.V., Siritsa A.V. HIV infection. Information Bulletin No. 41. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2016. 56 p. (In Russ.)].
25. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 42. 2017. 56 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 42. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2017. 56 p. (In Russ.)].
26. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 43. 2018. 56 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 43. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2018. 56 p. (In Russ.)].
27. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В., Кравченко А.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 44. 2019. 58 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V., Kravchenko A.V. HIV infection. Information Bulletin No. 44. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2019. 58 p. (In Russ.)].
28. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В., Буравцова Е.В., Кравченко А.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 45. 2020. 58 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V., Buravtsova E.V., Kravchenko A.V. HIV infection. Information Bulletin No. 45. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2020. 58 p. (In Russ.)].
29. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 46. 2021. 83 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 46. Moscow: Federal Scientific and Methodological Center for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2021. 83 p. (In Russ.)].
30. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 47. 2023. 82 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 47. Moscow: Specialized Scientific Research Department for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2023. 82 p. (In Russ.)].
31. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 48. 2024. 82 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 48. Moscow: Specialized Scientific Research Department for Prevention and Control of AIDS, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2024. 82 p. (In Russ.)].
32. Покровский В.В., Ладная Н.Н., Соколова Е.В. ВИЧ-инфекция. Информационный бюллетень № 49. 2024. 80 с. [Pokrovsky V.V., Ladnaya N.N., Sokolova E.V. HIV infection. Information Bulletin No. 49. Moscow: Reference Center for Monitoring of HIV and HIV-associated Infections, FSBI Central Research Institute of Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2024. 80 p. (In Russ.)].

33. Алимов А.В., Захарова Ю.А., Питерский М.В., Быков Р.О., Ладыгин О.В. ВИЧ-инфекция на территории Уральского федерального округа. Информационный бюллетень за 2019 г. 2020. 35 с. [Alimov A.V., Zakharova Yu.A., Piterisky M.V., Bykov R.O., Ladygin O.V. HIV Infection in the Urals Federal District: Information Bulletin for 2019. 2020. 35 p. (In Russ.).]
34. Захарова Ю.А., Питерский М.В. О.Я., Яранцева О.Я., Семенов А.В. ВИЧ-инфекция на территории Уральского федерального округа: информационный бюллетень за 2020 г. 2021. 30 с. [Zakharova Yu.A., Piterisky M.V., Yarantseva O.Ya., Semenov A.V. HIV Infection in the Urals Federal District: Information Bulletin for 2020. 2021. 30 p. (In Russ.).]
35. Питерский М.В., Маковская Я.В., Яранцева О.Я., Панова А.В., Семенов А.В. ВИЧ-инфекция на территории Уральского федерального округа: информационный бюллетень за 2023 год. 2025. 34 с. [Piterisky M.V., Makovskaya Ya.V., Yarantseva O.Ya., Panova A.V., Semenov A.V. HIV Infection in the Urals Federal District: Information Bulletin for 2023. 2025. 34 p. (In Russ.).]
36. Деркач А.Ю., Черняев И.А. Влияние уровней занятости и безработицы на заболеваемость и смертность населения от туберкулеза // *Вестник УГМУ*. 2023. № 1. С. 39–46. [Derkach A.Yu., Chernyaev I.A. The Impact of Employment and Unemployment Rates on Tuberculosis Incidence and Mortality. *Bulletin of USMU*, 2023, No. 1, pp. 39–46 (In Russ.).]
37. Wang G., Wei W., Jiang J., Ning C., Chen H., Huang J., Liang B., Zang N., Liao Y., Chen R., Lai J., Zhou O., Han J., Liang H., Ye L. Application of a long short-term memory neural network: a burgeoning method of deep learning in forecasting HIV incidence in Guangxi, China // *Epidemiology and Infection*. 2019. Vol. 147. P. e194. doi: 10.1017/S095026881900075X.
38. He J., Li J., Jiang S., Cheng W., Jiang J., Xu Y., Yang J., Zhou X., Chai C., Wu C. Application of machine learning algorithms in predicting HIV infection among men who have sex with men: Model development and validation // *Frontiers in Public Health*. 2022. Vol. 10. P. 967681. doi: 10.3389/fpubh.2022.967681.
39. Li X., Xu X., Wang J., Li J., Qin S., Yuan J. Study on Prediction Model of HIV Incidence Based on GRU Neural Network Optimized by MHP SO // *IEEE access: practical innovations, open solutions*. 2020. Vol. 8. P. 49574–49583. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2979859.

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 15.12.2025 г.

Авторство: вклад в концепцию и план исследования — М.В. Питерский. Вклад в сбор данных — Я.В. Маковская, М.В. Питерский. Вклад в анализ данных и выводы — Я.В. Маковская, М.В. Питерский. Вклад в подготовку рукописи — Я.В. Маковская, М.В. Питерский, А.В. Семенов, А.Е. Панова, Ю.А. Михаленко, А.О. Иванова.

Сведения об авторах:

Маковская Яна Валерьевна — врач-эпидемиолог отделения эпидемиологического надзора за ВИЧ-инфекцией Уральского окружного центра по профилактике и борьбе со СПИД федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 620030, Екатеринбург, Летняя ул., д. 23; e-mail: makovskaia_iv@niivrom.ru; ORCID 0009–0006–7541–9342;

Питерский Михаил Валерьевич — кандидат медицинских наук, и.о. руководителя Уральского окружного центра по профилактике и борьбе со СПИД федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 620030, Екатеринбург, Летняя ул., д. 23; 620030, Екатеринбург, Летняя ул., д. 23; e-mail: piteriskiy_mv@niivrom.ru; ORCID 0000–0001–5506–2389; SPIN-код 8756–9549;

Иванова Анастасия Олеговна — стажер-исследователь Уральского окружного центра по профилактике и борьбе со СПИД федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 620030, Екатеринбург, Летняя ул., д. 23; e-mail: ivanova_ao@niivrom.ru; ORCID 0009–0007–3464–0793;

Михайленко Юлия Александровна — научный сотрудник научно-методического отдела федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 620030, Екатеринбург, Летняя ул., д. 23; e-mail: mikhaylenko_ya@niivrom.ru; ORCID 0000–0003–2361–3734; SPIN-код 7263–2149;

Панова Анна Евгеньевна — кандидат медицинских наук, заместитель директора по научной работе федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 620030, Екатеринбург, Летняя ул., д. 23; e-mail: panova_ae@niivrom.ru; ORCID 0000–0001–9380–8727; SPIN-код 6242–5087;

Семенов Александр Владимирович — доктор биологических наук, директор федерального бюджетного учреждения науки «Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 620030, Екатеринбург, Летняя ул., д. 23; e-mail: alexvsemenov@gmail.com; ORCID 0000–0003–3223–8219; SPIN-код 2372–5134.