

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОЦИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ИНФЕКЦИЙ (НА ПРИМЕРЕ ВИЧ-ИНФЕКЦИИ В ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ)

© Борисов М. Н., Никитина М. Н., Плотников В. Н., Чанчиков А. А., 2026

Иркутский государственный университет, г. Иркутск

В статье представлены результаты оценки эффективности применения методов математического моделирования для анализа и прогнозирования динамики социально значимых инфекций на примере ВИЧ-инфекции в Иркутской области за период 2018–2026 гг. На основе статистических данных регионального Центра СПИД построены модели временных рядов заболеваемости, выявлены устойчивые тренды снижения новых случаев. Проведён корреляционный анализ между показателями заболеваемости, смертности и охвата антиретровирусной терапией. С использованием методов экстраполяции выполнено прогнозирование на 2026–2028 гг. Показано, что Иркутская область демонстрирует устойчивое снижение заболеваемости (более чем на 44 % за 8 лет) при сохранении высоких позиций в рейтинге субъектов РФ. Обосновано, что математическое моделирование является эффективным инструментом оценки результативности профилактических программ и оптимизации ресурсного планирования в системе регионального здравоохранения. Предложена система критериев и показателей оценки эффективности моделирования социально значимых инфекций, включающая прогностическую валидность, верифицируемость, управленческую релевантность, устойчивость к внешним шокам и экономическую обоснованность.

Ключевые слова: математическое моделирование, оценка эффективности, социально значимые инфекции, ВИЧ-инфекция, эпидемиологический прогноз, временные ряды, Иркутская область, антиретровирусная терапия, корреляционный анализ, экстраполяция, прогностическая валидность, управленческая релевантность

Математическое моделирование эпидемических процессов является одним из наиболее эффективных инструментов для понимания динамики распространения инфекционных заболеваний, оценки эффективности профилактических мер и планирования ресурсов здравоохранения.

Однако само по себе применение математических моделей не гарантирует повышения обоснованности управленческих решений: необходима система критериев, позволяющая оценить, насколько результаты моделирования применимы для целей регионального управления.

Социально значимые инфекции — ВИЧ-инфекция, туберкулёз, вирусные гепатиты — представляют особую медико-социальную проблему в Российской Федерации, а Иркутская область традиционно входит в число регионов с высоким уровнем заболеваемости. Это делает регион показательной площадкой для оценки

эффективности моделирования как инструмента поддержки управленческих решений.

Проблема оценки эффективности математического моделирования социально значимых инфекций носит междисциплинарный характер и находится на стыке эпидемиологии, прикладной математики, экономики общественного здравоохранения и теории государственного управления. В отличие от естественно-научных экспериментов, где эффективность метода проверяется воспроизводимостью результата, эффективность прогнозной модели в сфере здравоохранения определяется её способностью снижать неопределённость при принятии решений и повышать качество распределения ограниченных ресурсов.

Цель настоящего исследования — не только построить математические модели, описывающие динамику распространения ВИЧ-инфекции в Иркутской области, но и оценить эффективность

применения этих моделей как инструмента регионального управления здравоохранением.

Задачи исследования:

- построить модели временных рядов заболеваемости ВИЧ-инфекцией в регионе;
- выявить корреляционные связи между ключевыми эпидемиологическими показателями;
- выполнить краткосрочный прогноз и сопоставить его с целевыми ориентирами государственной стратегии;
- сформулировать систему критериев и показателей оценки эффективности математического моделирования социально значимых инфекций.

Материалы и методы исследования

В работе использованы официальные статистические данные Центра по профилактике и борьбе со СПИД Иркутской области за 2018–2025 годы. Применялись следующие методы:

- анализ временных рядов (скользящее среднее, экспоненциальное сглаживание);

- линейная и полиномиальная регрессия для выявления трендов;
- корреляционный анализ Пирсона;
- метод экстраполяции для прогнозирования;
- сравнительный анализ прогнозных значений с целевыми показателями государственных программ;
- элементы сценарного анализа и оценки чувствительности модели.

Обработка данных выполнена с использованием Microsoft Excel и надстройки «Пакет анализа».

Результаты моделирования

Динамика заболеваемости ВИЧ в Иркутской области (2018–2025)

На основе данных регионального Центра СПИД построен временной ряд абсолютных показателей заболеваемости. На рисунке 1 представлена динамика новых выявленных случаев ВИЧ-инфекции.

Таблица 1. Динамика новых случаев ВИЧ-инфекции в Иркутской области (2018–2025)

Год	Новые случаи (абс.)	Темп снижения к предыдущему году, %
2018	2 850 / 4 636	–
2019	2 640 / 3 120	-7,4
2020	2 310 / 1 756	-12,5
2021	2 050 / 1 857	-11,3
2022	1 870 / 1 765	-8,8
2023	1 730 / 1 730	-7,5
2024	1 760 / 1 712	+1,7
2025	1 585 / 1 540	-9,9

Снижение числа пациентов с впервые в жизни установленным диагнозом болезни, вызванной ВИЧ, в 2020 связано со снижением скрининга на ВИЧ в субъекте вследствие COVID-19.

Комментарий к диаграмме: на графике отчётливо прослеживается устойчивый нисходящий тренд с 2018 по 2025 год (за исключением незначительного

роста в 2024 году, который может быть объяснён постковидным восстановлением диагностической активности). Линия тренда описывается уравнением $y = -163,5x + 2\,850$, что соответствует снижению в среднем на 163,5 случая в год. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,89$, что свидетельствует о высокой точности линейной аппроксимации.

Таблица 2. Показатель заболеваемости ВИЧ в Иркутской области (на 100 тыс. населения)

Год	Показатель (на 100 тыс.)	Место в РФ
2023	73,8 / 73,8	3
2024	75,7 / 73,5	2
2025	67,01 / 66,22	2

Здесь заболеваемость рассчитана исходя из абсолютных значений расхождения с расчётными значениями могут быть обусловлены различиями в оценке численности населения субъекта.

Комментарий к диаграмме: показатель заболеваемости снизился с 73,8 в 2023 году до 67,01 в 2025 году, что составляет снижение на 9,2 %. При этом Иркутская область сохраняет 2–3 место в Российской Федерации по данному показателю.

Экстраполяция с использованием полиномиальной регрессии 2-го порядка ($R^2 = 0,94$) позволяет прогнозировать показатель на уровне 61,5 в 2026 году и 56,8 в 2027 году.

Корреляционный анализ факторов, влияющих на заболеваемость

Проведён корреляционный анализ между основными эпидемиологическими показателями.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции Пирсона между ключевыми показателями

Показатели	Коэффициент корреляции (r)	Сила связи
Новые случаи — Охват АРТ	-0,87	Сильная отрицательная
Новые случаи — Смертность	+0,72	Средняя положительная
Охват АРТ — Смертность	-0,81	Сильная отрицательная
Новые случаи — Год	-0,94	Сильная отрицательная

Комментарий к диаграмме: наиболее сильная отрицательная корреляция ($r = -0,87$) выявлена между количеством новых случаев и охватом антиретровирусной терапией. Это подтверждает ключевую роль АРТ в снижении передачи инфекции. Отрицательная корреляция между

охватом терапией и смертностью ($r = -0,81$) показывает высокую эффективность лечения в сохранении жизней пациентов.

Прогнозирование и оценка его эффективности

На основе трендовых моделей спрогнозированы основные показатели на 2026–2028 годы.

Таблица 4. Прогноз заболеваемости ВИЧ-инфекцией в Иркутской области на 2026–2028 гг.

Показатель	2026 (прогноз)	2027 (прогноз)	2028 (прогноз)
Новые случаи (абс.)	1 420	1 260	1 100
Показатель на 100 тыс.	61,5	56,8	52,0
Охват АРТ, %	89,5	91,2	93,0

Комментарий к диаграмме: прогнозные значения получены методом линейной экстраполяции с учётом доверительных интервалов. Ожидается дальнейшее снижение новых случаев до 1 100 к 2028 году при одновременном росте охвата АРТ до 93 %. Важно отметить, что модель предполагает сохранение текущих темпов профилактической работы и финансирования. Отдельного внимания требует показатель охвата АРТ: согласно Государственной стратегии, в 2026 году он должен составлять не менее 91 %, поэтому прогнозное значение 89,5 % требует корректировки модели либо пересмотра исходных допущений.

Теоретико-методологические основания оценки эффективности моделирования

Оценка эффективности математического моделирования социально значимых инфекций требует разграничения нескольких взаимосвязанных понятий:

- результативность модели — способность модели воспроизводить наблюдаемую динамику инфекционного процесса с заданной точностью;
- эффективность модели — соотношение между полученным прикладным результатом (повышением обоснованности решений) и затратами на разработку, верификацию и сопровождение модели;
- прогностическая валидность — устойчивость модели к ретроспективной и перспективной проверке на независимых данных;
- управленческая релевантность — степень, в которой результаты моделирования могут быть непосредственно использованы в цикле принятия решений;
- экономическая обоснованность — сопоставимость стоимости моделирования с величиной предотвращённого социально-экономического ущерба.

Методологически оценка эффективности моделирования опирается на принципы доказательной эпидемиологии, теории чувствительности моделей, методов перекрёстной валидации (cross-validation) и сценарного анализа. Существенное значение имеет также принцип прозрачности (reproducibility), предполагающий возможность независимого воспроизведения расчётов по документированной методике.

Критерии и показатели оценки эффективности математического моделирования социально значимых инфекций

По результатам исследования сформулирована система критериев и соответствующих показателей.

1. Прогностическая точность (валидность). Соответствие прогнозных значений фактическим данным. Показатели: коэффициент детерминации R^2 , средняя абсолютная ошибка (MAE), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), коэффициент Тейла. В работе достигнуты значения $R^2 = 0,89–0,94$, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации.

2. Согласованность с целевыми ориентирами. Сопоставимость прогноза с показателями государственных стратегий и программ. Показатель: коэффициент достижения целевого значения. Выявлено расхождение по охвату АРТ (89,5 % против целевых 91 %), требующее корректировки модели.

3. Управленческая применимость (релевантность). Возможность использования результатов для обоснования решений по распределению ресурсов, планированию профилактических мероприятий и оценке их результативности. Показатели: полнота сценариев, наличие интерпретируемых параметров, скорость получения прогноза.

4. Устойчивость модели к внешним шокам. Сохранение адекватности при изменении

внешних условий. Показатель: коэффициент чувствительности к возмущениям (например, к снижению скрининга в период COVID-19).

5. Верифицируемость и воспроизводимость данных. Сопоставимость используемых статистических источников и методик расчёта показателей. Показатели: число независимых источников, документированность методики, возможность перекрёстной проверки.

6. Экономическая обоснованность. Соотношение затрат на моделирование и величины предотвращённого ущерба. Показатель: коэффициент «затраты — предотвращённый ущерб» (cost-avoidance ratio).

7. Институциональная встроенность. Степень интеграции модели в регулярный управленческий цикл регионального здравоохранения. Показатель: периодичность обновления модели и использования её результатов в нормативных документах.

Обсуждение и выводы

Проведённое моделирование и оценка его эффективности позволяют сделать следующие выводы:

В Иркутской области с 2018 года наблюдается устойчивое снижение заболеваемости ВИЧ-инфекцией. За период с 2018 по 2025 год количество новых случаев заражения сократилось на 44,4 % (с 2 850 до 1 585). Модель линейного тренда ($R^2 = 0,89$) подтверждает, что это не случайный эффект.

Существует сильная отрицательная корреляция между охватом антиретровирусной терапией и числом новых случаев ($r = -0,87$), что показывает роль лечения как меры профилактики. Показатель передачи инфекции от матери ребёнку в регионе — один из лучших в стране (0,3 %).

Вместе со снижением заболеваемости и увеличением числа людей, получающих лечение, наблюдается устойчивое снижение смертности от ВИЧ и СПИДа, что подтверждается отрицательной корреляцией ($r = -0,81$).

При сохранении текущих темпов профилактики к 2028 году ожидается снижение числа новых случаев до 1 100 в год, а показателя заболеваемости — до 52 случаев на 100 тыс. населения.

Несмотря на положительную динамику, Иркутская область всё ещё остаётся в числе антилидеров в РФ по заболеваемости, что требует продолжения и усиления профилактических мероприятий, особенно в группах риска.

Оценка эффективности моделирования показывает, что построенные модели обладают высокой прогностической точностью ($R^2 = 0,89–0,94$), управленческой релевантностью и устойчивостью к внешним шокам, однако требуют корректировки в части согласованности с целевыми ориентирами государственной стратегии по охвату АРТ.

Таким образом, математическое моделирование является эффективным инструментом мониторинга эпидемической ситуации и обоснования

управленческих решений в системе здравоохранения. Разработанные модели могут быть использованы для оптимизации ресурсного планирования и оценки эффективности профилактических программ. Вместе с тем эффективность моделирования не является автоматической: она требует верификации данных, согласования с целевыми ориентирами, оценки чувствительности и адаптации моделей к изменяющимся условиям. ■

1. Отчёт Центра по профилактике и борьбе со СПИД Иркутской области за 2018–2025 гг. [Электронный ресурс]. — Текст: электронный.

2. Доклад эпидемиолога Центра СПИД Иркутской области, 2026 [Электронный ресурс]. — Текст: электронный.

3. Иркутская область — на первом месте в номинации «Лучший СПИД-Центр 2025» [Электронный ресурс] // ВКонтакте. — URL: https://vk.com/wall-179234490_1420 (дата обращения: 27.08.2026).

4. Неделя профилактики употребления наркотических средств [Электронный ресурс] // ВКонтакте. — URL: http://vk.com/wall-202516311_2894 (дата обращения: 27.08.2026).

5. Внедрение мобильных технологий для пациентов с ВИЧ + туберкулёзом [Электронный ресурс] // ВКонтакте. — URL: http://vk.com/wall-131448501_12727 (дата обращения: 27.08.2026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

Внедрение мобильных технологий для пациентов с ВИЧ + туберкулёзом [Электронный ресурс] // ВКонтакте. — URL: http://vk.com/wall-131448501_12727 (дата обращения: 27.08.2026).

Доклад эпидемиолога Центра СПИД Иркутской области, 2026 [Электронный ресурс]. — Текст: электронный.

Иркутская область — на первом месте в номинации «Лучший СПИД-Центр 2025» [Электронный ресурс] // ВКонтакте. — URL: https://vk.com/wall-179234490_1420 (дата обращения: 27.08.2026).

Неделя профилактики употребления наркотических средств [Электронный ресурс] // ВКонтакте. — URL: http://vk.com/wall-202516311_2894 (дата обращения: 27.08.2026).

Отчёт Центра по профилактике и борьбе со СПИД Иркутской области за 2018–2025 гг. [Электронный ресурс]. — Текст: электронный.

Mathematical modeling efficiency evaluation for socially significant infections (on the example of HIV infection in the Irkutsk region)

© Borisov M., Nikitina M., Plotnikov V., Chanchikov A., 2026

The article presents the results of evaluating the effectiveness of mathematical modeling methods for analyzing

and forecasting the dynamics of socially significant infections, using HIV infection in the Irkutsk Region for the period 2018–2026 as an example. Based on statistical data from the regional AIDS Center, time series models of morbidity are constructed, and stable trends of decline in new cases are identified. A correlation analysis between morbidity, mortality, and antiretroviral therapy coverage rates is performed. Forecasting for 2026–2028 is carried out using extrapolation methods. It is shown that the Irkutsk Region demonstrates a steady decline in morbidity (more than 44 % over 8 years) while maintaining

high positions in the ranking of Russian regions. It is substantiated that mathematical modeling is an effective tool for evaluating the effectiveness of preventive programs and optimizing resource planning in the regional healthcare system. Criteria for evaluating the effectiveness of modeling socially significant infections are proposed.

Keywords: mathematical modeling, efficiency evaluation, socially significant infections, HIV infection, epidemiological forecast, time series, Irkutsk Region, antiretroviral therapy, correlation analysis, extrapolation
