

# ЭКОНОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФЕКЦИОННЫМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ В КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМАХ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ СТРАН АФРИКИ

Костырин Е.В., Луа М.П., Давыдова А.Д.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

mauntain76@mail.ru, moussapascalloua@gmail.com, alise.davydova@yandex.ru

*Аннотация. В исследовании разработана система принятия управленческих решений, направленная на снижение смертности от малярии, вируса иммунодефицита человека (ВИЧ) и туберкулёза, которые являются основными причинами смертности от инфекционных заболеваний в странах Африки и приводят к значительной нагрузке на крупномасштабные системы здравоохранения африканских стран.*

*Ключевые слова: малярия, ВИЧ, туберкулёз, линейная регрессия, смертность.*

## Введение

На протяжении всей истории человеческой цивилизации эпидемии представляли собой значимую угрозу глобальной безопасности, оказывая деструктивное воздействие на общественное благополучие. Помимо прямого влияния в виде катастрофической утраты человеческих жизней, эпидемиологические вспышки способствуют дестабилизации политического и социального порядка, а также оказывают негативное воздействие на экономическую активность, выражающееся в сокращении трудовых ресурсов, снижении производительности и введении ограничений на мобильность населения и товарооборот. Особую уязвимость проявляют государства с низким уровнем экономического развития и недостаточно развитой системой здравоохранения, где эпидемии способны нивелировать с трудом достигнутые результаты в социально-экономической сфере. В условиях прогрессирующей глобальной взаимосвязанности риск трансграничного распространения инфекционных заболеваний значительно возрастает [1], что подтверждает актуальность настоящего исследования.

Африканский континент, в частности, характеризуется перманентной борьбой с рядом эпидемиологических угроз, что обуславливает необходимость проведения углублённого анализа детерминирующих факторов, лежащих в основе их возникновения, распространения и последствий для африканского общества. Малярия, вирус иммунодефицита человека (ВИЧ) и туберкулёз остаются одними из основных причин смертности в регионе, формируя значительную нагрузку на системы здравоохранения и препятствуя устойчивому развитию [2]. Несмотря на предпринимаемые международные усилия по борьбе с этими заболеваниями, их распространённость остается высокой, что указывает на необходимость более детального изучения социально-экономических и институциональных факторов, способствующих их персистенции.

В данной работе проведён анализ влияния экономических, социальных факторов и уровня развития крупномасштабных систем здравоохранения на смертность от малярии, ВИЧ и туберкулёза с использованием методов эконометрического моделирования и уравнений множественной регрессии. Подобный подход позволил количественно оценить вклад различных детерминант, выявить ключевые точки воздействия и предложить рекомендации для оптимизации политики в области общественного здоровья.

В современном мире инфекционные заболевания остаются одной из основных угроз для здоровья населения, особенно в развивающихся странах. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [1], от ВИЧ/СПИД, малярии и туберкулёза ежегодно умирают сотни тысяч человек, причем наибольшее бремя приходится на страны Африки к югу от Сахары. Несмотря на значительный прогресс в борьбе с этими заболеваниями, достигнутый в рамках Целей устойчивого развития ООН, многие регионы сталкиваются с замедлением темпов снижения заболеваемости, что требует пересмотра существующих стратегий и разработки новых.

Особую актуальность данное исследование приобретает в контексте пандемии COVID-19, которая продемонстрировала хрупкость крупномасштабных систем здравоохранения и усугубила проблему доступа к медицинской помощи для пациентов с малярией, ВИЧ и туберкулёзом [3]. Экономические последствия пандемии, включая рост бедности и сокращение финансирования программ здравоохранения, привели к долгосрочному ухудшению эпидемиологической ситуации. В этой связи понимание взаимосвязей между социально-экономическими показателями и динамикой инфекционных заболеваний становится критически важным для разработки эффективных мер противодействия.

Анализ данных в крупномасштабных системах здравоохранения играет ключевую роль в выявлении факторов, влияющих на распространение инфекционных заболеваний, таких как малярия, туберкулёз и ВИЧ, которые остаются серьёзной проблемой в странах Африки, характеризующихся высоким уровнем заболеваемости [4]. Исследование данных в этой области требует комплексного подхода, учитывающего как медицинские, так и социально-экономические аспекты, определяющие уровень смертности и заболеваемости [5].

В условиях ограниченных ресурсов африканских стран особенно важно определить ключевые детерминанты динамики смертности, чтобы разработать целенаправленные и эффективные меры профилактики и лечения. Данные о численности населения, доступности медицинских ресурсов, уровне расходов на здравоохранение, уровне бедности и других социально-экономических индикаторах служат основой для проведения таких исследований [6].

Современные подходы к анализу данных, включая корреляционно-регрессионные методы, позволяют выявить взаимосвязи между указанными факторами и смертностью, а также оценить их относительную значимость [7]. Полученные результаты могут стать основой для разработки управленческих решений, направленных на совершенствование систем здравоохранения, и реализации программ по снижению смертности от инфекционных заболеваний в африканских странах [8].

Малярия детерминируется сложным комплексом взаимосвязанных факторов, которые могут быть классифицированы по нескольким ключевым категориям. Согласно данным ВОЗ [1], в 2023 году во всём мире было зарегистрировано около 263 миллионов случаев заболевания и 597 000 случаев смерти от малярии. Это примерно на 11 миллионов случаев больше в 2023 году по сравнению с 2022 годом и почти такое же количество смертей. Примерно 95% смертей произошло в Африканском регионе ВОЗ, где многие из тех, кто подвержен риску, по-прежнему не имеют доступа к услугам, необходимым для профилактики, выявления и лечения заболевания. Во-первых, климатические условия оказывают существенное влияние на эпидемиологическую ситуацию. Эпидемические вспышки часто возникают в высокогорных и полусухих регионах, где аномальные метеорологические явления, такие как температурные флуктуации в горных местностях и атипичные осадки в засушливых зонах, создают благоприятную среду для размножения комаров-переносчиков, являющихся векторами заболевания. Во-вторых, результативность мер по борьбе с малярией в значительной степени зависит от эффективности государственной политики. При этом, как отмечают исследователи [9], часто наблюдается недостаточное финансирование профилактических и лечебных программ, а также развитие резистентности комаров к используемым инсектицидам. Кроме того, важной проблемой является обеспечение доступа к профилактическим мероприятиям для уязвимых групп населения, проживающих в отдалённых и труднодоступных районах Африки. В-третьих, социально-экономические детерминанты оказывают существенное воздействие на распространение малярии. Низкий уровень доходов жителей африканского региона ограничивает доступ к профилактическим мероприятиям, таким как использование инсектицидно обработанных противомоскитных сеток, и своевременному оказанию медицинской помощи. Неудовлетворительные жилищные условия не обеспечивают защиту от контакта с комарами-переносчиками. Наряду с этим, санитарно-гигиенические условия проживания и доступ к безопасным источникам водоснабжения также являются важными факторами риска.

Распространение ВИЧ-инфекции в странах Африки к югу от Сахары обусловлено сложным взаимодействием социальных, экономических и культурных факторов. По данным ВОЗ [1] с начала эпидемии 88,4 миллиона человек были инфицированы ВИЧ и около 42,3 миллиона человек умерли от вируса. Во всём мире по состоянию на конец 2023 года 39,9 миллиона человек жили с ВИЧ. По оценкам экспертов [10], 0,6% взрослых в возрасте 15-49 лет во всём мире живут с ВИЧ, хотя бремя эпидемии продолжает значительно различаться между странами и регионами. Африканский регион ВОЗ остаётся наиболее пострадавшим, где один из каждых 30 взрослых (3,4%) живет с ВИЧ, и на него приходится более двух третей людей, живущих с ВИЧ во всём мире. Во-первых, социально-экономические изменения, включая подчинённое положение женщин, бедность и упадок социальных служб, способствовали широкому распространению вируса. Женщины часто сталкиваются с дискриминационными ограничениями в доступе к образованию, информации, земле, капиталу и трудоустройству, что повышает их уязвимость. Ухудшение предоставления социальных услуг, включая образование и здравоохранение, привело к снижению возможностей для профилактики ВИЧ. Во-вторых, одним из важных факторов является стремительная урбанизация и связанные с ней изменения в образе жизни. Быстрый рост городского населения в развивающихся странах, обусловленный как естественным приростом, так и миграцией из сельских районов, способствовал распространению ВИЧ. Высокая распространённость ВИЧ среди городского населения, по сравнению

с сельским, связана с миграцией молодых людей, не состоящих в браке, из консервативных сельских районов в более либеральные городские центры, что способствует росту рискованного сексуального поведения. Кроме того, утрата традиционных ценностей и разрушение социальных связей в городских условиях также способствуют распространению инфекции, в частности, через рост таких социальных проблем, как наркомания, которая поощряет рискованное поведение. В-третьих, особую роль играет миграция. Переносчиками инфекции часто являются мужчины-рабочие, мигрирующие из региона в регион, что способствует дальнейшему распространению вируса.

Туберкулёз тесно связан с социально-экономическими условиями и затрагивает, прежде всего, наиболее уязвимые группы населения в странах с низким уровнем дохода. Плохие жилищные условия, отсутствие продовольственной безопасности, финансовые трудности, низкий уровень грамотности и неблагоприятные психосоциальные факторы способствуют распространению туберкулёза и одновременно ограничивают доступ больных к необходимым медицинским услугам. Социальная маргинализация, характеризующаяся ограничением доступа к медицинским услугам, приводит к поздней диагностике, прогрессированию заболевания и низкой приверженности к лечению, что в итоге ухудшает прогноз. Важным фактором, препятствующим обращению за медицинской помощью, является стигматизация, связанная с туберкулёзом, которая также негативно влияет на приверженность к лечению. При этом, согласно данным ВОЗ за 2024 год [1], достигнут существенный прогресс в борьбе с заболеванием. Так, смертность от туберкулёза в Африке снизилась на 42%, а количество случаев заболевания за тот же период сократилось на 24%. В 2023 году было выявлено около 1,9 миллиона случаев по сравнению с 1,4 миллиона в 2020 году. За тот же период охват лечением вырос с 55% до 74% по всему региону. Южная Африка достигла 50% снижения заболеваемости туберкулёзом в период с 2015 по 2023 год, став первой страной в регионе, которая превзошла рубеж 2025 года раньше запланированного срока. Мозамбик, Танзания, Того и Замбия также уже достигли цели 2025 года по сокращению смертности от туберкулёза на 75%. Другие страны, включая Кению, Малави, Руанду, Сьерра-Леоне и Уганду, не отстают, имея показатели снижения смертности от туберкулёза на 66% и более. На субрегиональном уровне Восточная и Южная Африка стали основным драйвером сокращения заболеваемости туберкулёзом, сократив заболеваемость с 466 до 266 на 100 000 в период с 2000 по 2023 год. Вместе с тем прогресс был более медленным в Центральной и Западной Африке, где заболеваемость туберкулёзом и смертность от него по-прежнему вызывают обеспокоенность.

Таким образом, целью настоящего исследования выступает проведение корреляционно-регрессионного анализа детерминант смертности от инфекционных заболеваний в африканских странах и разработка эконометрических моделей управления инфекционными заболеваниями в крупномасштабных системах здравоохранения стран Африки, позволяющих обеспечить научно обоснованную практическую реализацию мероприятий, направленных на снижение смертности и совершенствование методов борьбы с распространением инфекционных заболеваний с использованием ограниченных ресурсов крупномасштабных систем здравоохранения стран Африки.

Объектом исследования является смертность от инфекционных заболеваний: малярии, туберкулёза, ВИЧ, в странах Африки.

Предмет исследования – факторы, влияющие на динамику смертности от указанных заболеваний, и эконометрические модели управления инфекционными заболеваниями в крупномасштабных системах здравоохранения стран Африки.

## 1. Материалы и методы

В ходе исследования для выявления ключевых факторов смертности от малярии, ВИЧ и туберкулёза в странах Африки был применён комплексный эконометрический анализ. Все расчёты выполнялись в среде Jupyter Notebook с использованием стандартных библиотек Python для анализа данных (pandas, numpy), статистического моделирования (statsmodels, scipy) и визуализации (matplotlib, seaborn).

На первом этапе проведён корреляционный анализ для предварительного отбора значимых переменных, которые представлены в табл. 1. Рассчитывались коэффициенты корреляции Пирсона между потенциальными предикторами (социально-экономические, демографические показатели, параметры системы здравоохранения) и уровнями смертности от каждого заболевания. В модель включались только переменные, демонстрирующие статистически значимую связь с умеренной или сильной корреляцией ( $\geq 0,3$ ), а также имеющие теоретическое обоснование на основе анализа научной литературы.

Таблица 1. Предварительно отобранные значимые переменные

№ п/п	Категория переменных	Переменные	Метод измерения
1	География	Нигерия, Эфиопия, Египет, Конго, Танзания, ЮАР, Кения, Уганда, Алжир, Ангола, Гана, Мозамбик, Мадагаскар, Кот-д'Ивуар, Камерун, Нигер, Мали, Буркина-Фасо, Малави, Замбия, Чад, Сенегал, Зимбабве, Гвинея, Бенин, Руанда, Бурунди, Южный Судан, Того, Сьерра-Леоне, Конго, Либерия, ЦАР, Мавритания, Намибия, Гамбия, Ботсвана, Габон, Лесото, Гвинея-Бисау, Маврикий, Эсватини, Кабо-Верде (всего 43 страны)	Категориальная переменная
2	Демография и урбанизация	Городское население	на 1000 чел.
3		Плотность населения	чел. на кв. км
4		Миграция	на 1000 чел.
5		Население в трущобах	на 1000 чел.
6	Санитария, здоровье населения и базовые условия жизни	Население с базовыми санитарными условиями	на 1000 чел.
7		Население с доступом к чистой воде	на 1000 чел.
8		Доля недоедающего населения	%
9	Здравоохранение	Финансовый доступ к медицинским сервисам	Балльная система ВОЗ от 1 до 100
10		Физический доступ к медицинским сервисам	Балльная система ВОЗ от 1 до 100
11		Государственные расходы на здравоохранение	В долларах США на 1000 чел.
12		Индекс безопасности пациентов	Балльная система ВОЗ от 1 до 100
13		Оценка национальной лабораторной системы	Балльная система ВОЗ от 1 до 100
14		Эффективность оказания медицинской помощи	Балльная система ВОЗ от 1 до 100
15	Социально-экономические	Социально-культурный доступ к медицинским сервисам	Балльная система ВОЗ от 1 до 100
16		Доля женщин без базового образования в рабочей силе	%
17		Доля мужчин без базового образования в рабочей силе	%
18		Численность занятых женщин с образованием ниже базового	на 1000 чел.
19		Численность занятых мужчин с образованием ниже базового	на 1000 чел.
20	Зависимые переменные	Количество смертей от малярии	на 1000 чел.
21		Количество смертей от ВИЧ	на 1000 чел.
22		Количество смертей от туберкулёза	на 1000 чел.

Источник: составлено авторами по данным [11, 12]

Для количественной оценки влияния отобранных факторов использовался метод множественной линейной регрессии. Построение моделей осуществлялось с применением пошаговой процедуры, при которой на каждом этапе исключался наименее значимый предиктор (с наибольшим  $p$ -value  $> 0,05$ ), после чего проверялось изменение качества модели по скорректированному коэффициенту детерминации и результатам F-теста. Процесс продолжался до достижения оптимальной спецификации, когда все оставшиеся переменные были статистически значимы.

В результате построены эконометрические модели управления инфекционными заболеваниями в крупномасштабных системах здравоохранения стран Африки, которые представлены в табл. 2.

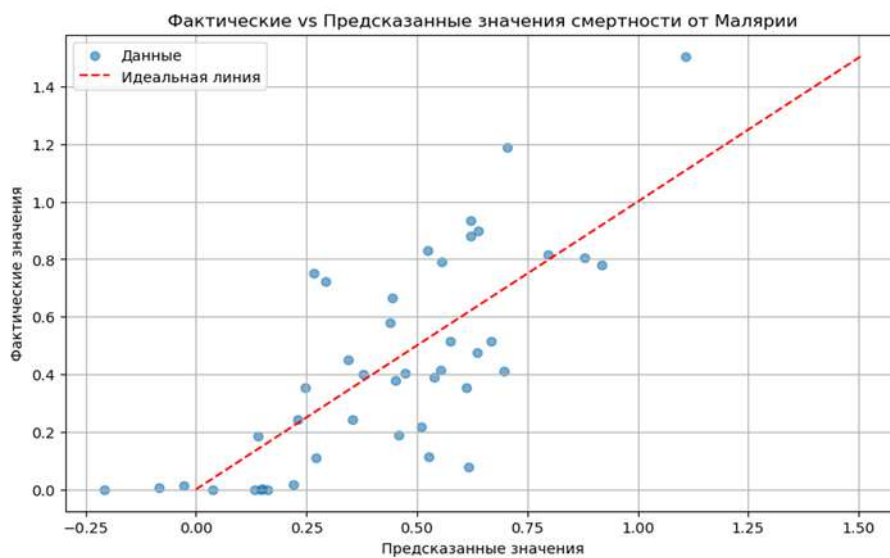
Таблица 2. Эконометрические модели управления инфекционными заболеваниями в крупномасштабных системах здравоохранения стран Африки

№ п/п	Зависимая переменная	Эконометрическая модель	Факторы	Показатели качества модели
1	Смертность от малярии	$\hat{Y} = 0,4333 - 0,2055 \cdot X_{11} - 0,1278 \cdot X_{12} - 0,0869 \cdot X_{13}$	$X_{11}$ – доступ населения к чистой воде, $X_{12}$ – эффективность оказания медицинской помощи, $X_{13}$ – оценка национальной лабораторной системы	Коэффициент детерминации $R^2 = 0,571$ . Средняя относительная ошибка аппроксимации 1,04%.
2	Смертность от ВИЧ	$\hat{Y} = 0,6262 + 0,3041 \cdot X_{21} - 0,2361 \cdot X_{22} - 0,1624 \cdot X_{23}$	$X_{21}$ – финансовый доступ к медицинским сервисам, $X_{22}$ – эффективность оказания медицинской помощи, $X_{23}$ – доля мужчин без базового образования в рабочей силе	Коэффициент детерминации $R^2 = 0,478$ . Средняя относительная ошибка аппроксимации 2,06%.
3	Смертность от туберкулёза	$\hat{Y} = 0,3156 + 0,1082 \cdot X_{31} + 0,1027 \cdot X_{32} - 0,0708 \cdot X_{33} + 0,0580 \cdot X_{34}$	$X_{31}$ – доля городского населения, $X_{32}$ – доля недоедающего населения, $X_{33}$ – социально-культурный доступ к медицинским сервисам, $X_{34}$ – численность занятых женщин с образованием ниже базового	Коэффициент детерминации $R^2 = 0,563$ . Средняя относительная ошибка аппроксимации 0,94%.

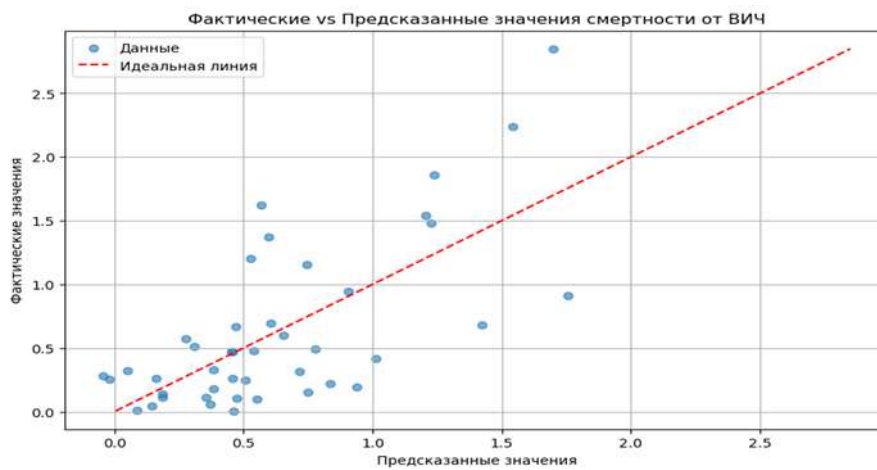
Источник: рассчитано авторами по данным табл. 1 с использованием программного продукта Python

## 2. Результаты

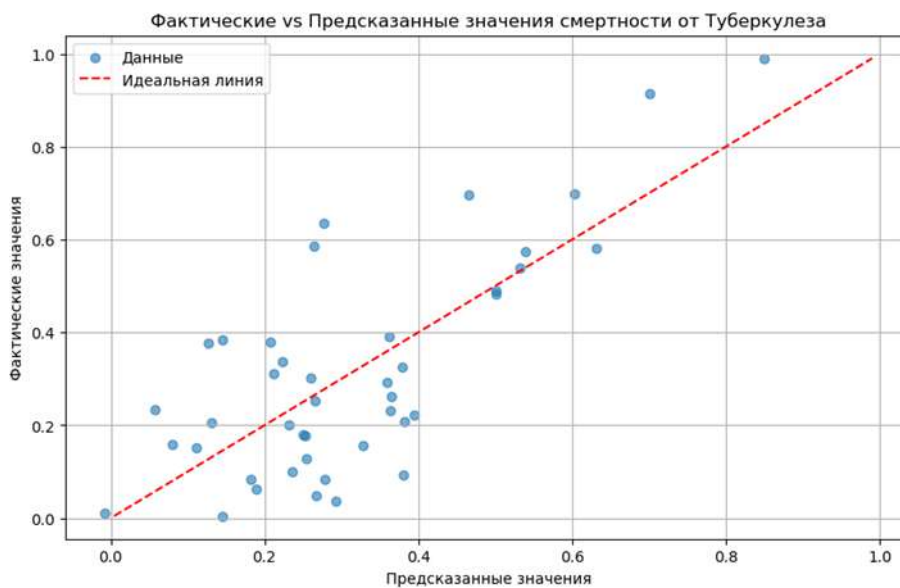
Результаты, полученные с использованием разработанных авторами и представленных в табл. 2 эконометрических моделей управления инфекционными заболеваниями в крупномасштабных системах здравоохранения стран Африки, показаны на рис. 1 и 2.



а)



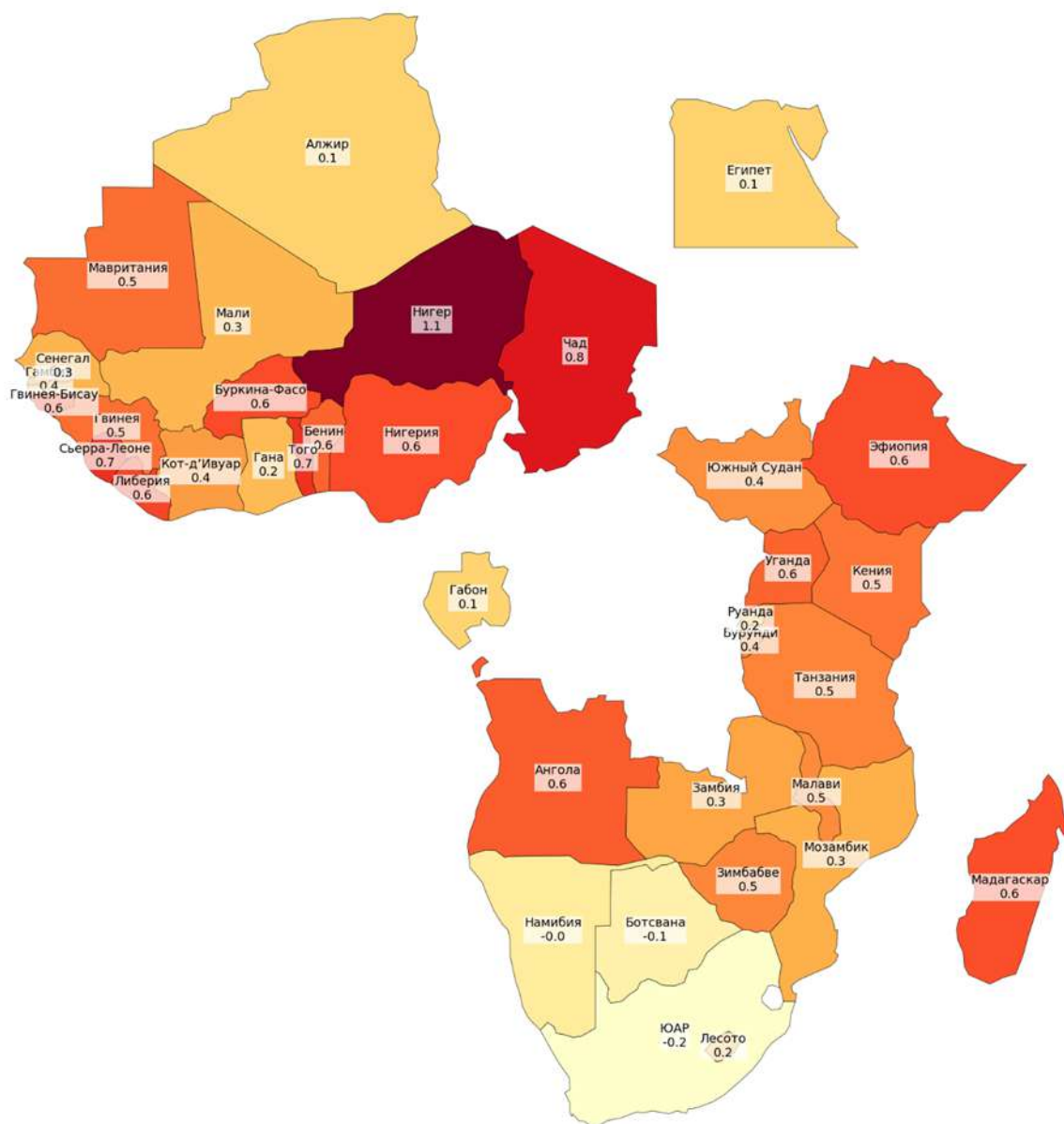
б)



в)

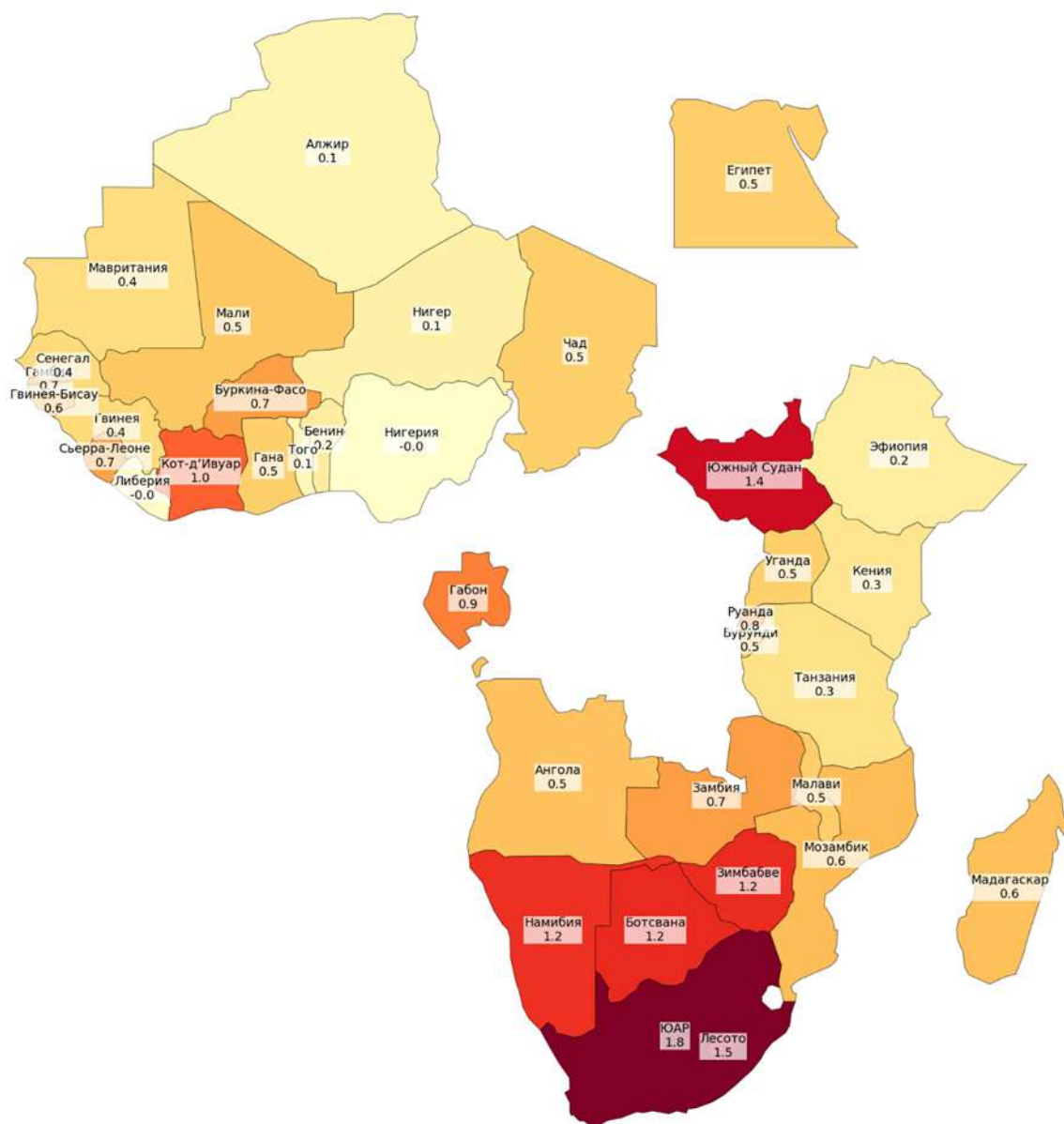
Рис. 1. Результаты верификации эконометрических моделей: а) смертность от малярии; б) смертность от ВИЧ; в) смертность от туберкулёза

Смертность от малярии в странах Африки, предсказанное значение на 1000 человек

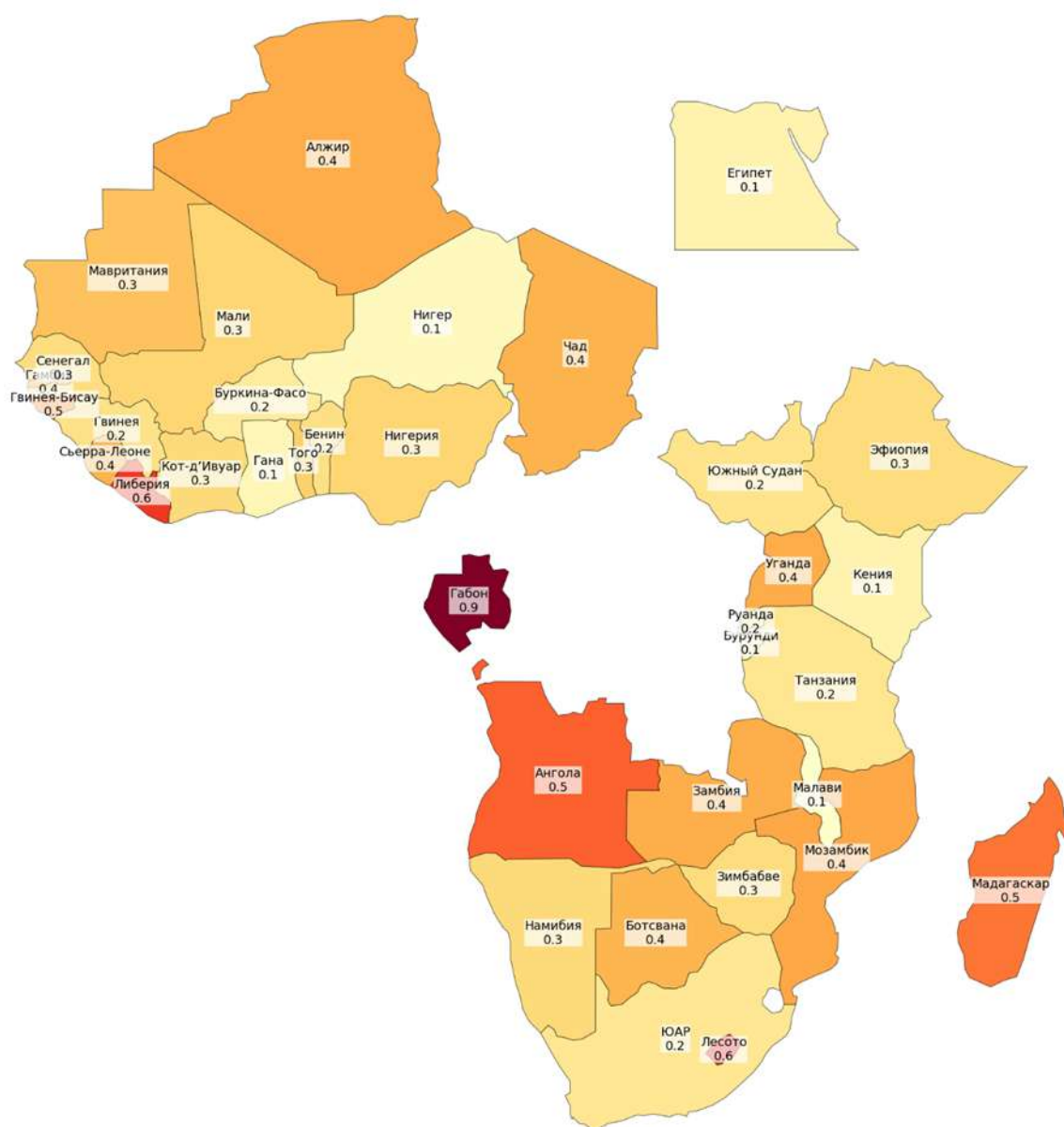


a)

Смертность от ВИЧ в странах Африки, предсказанное значение на 1000 человек



б)



в)

Рис. 2. Прогнозирование заболеваемости: а) малярией; б) ВИЧ; в) туберкулёзом – в странах Африки с использованием разработанных эконометрических моделей

### 3. Заключение

1. Анализ результатов, представленных в табл. 3, показывает, что наиболее точные результаты даёт линейная регрессионная модель для прогнозирования смертности от туберкулёза. Средняя относительная ошибка аппроксимации такой модели равна 0,94% при коэффициенте детерминации 0,563, при этом аналогичные показатели для других регрессионных моделей, рассмотренных в данном исследовании, равны: 1,04% и 0,571 для прогнозирования смертности от малярии и 2,06% и 0,478 для прогнозирования смертности от ВИЧ соответственно.

2. Наибольшее влияние на управление инфекционными заболеваниями для крупномасштабных систем здравоохранения стран Африки оказывает:

2.1. при прогнозировании смертности от малярии фактор  $X_{11}$  – доступ населения к чистой питьевой воде. Так, при увеличении значения фактора на 1% смертность от малярии снижается на 0,2055%;

2.2. при прогнозировании смертности от ВИЧ фактор  $X_{21}$  – финансовый доступ к медицинским сервисам. При увеличении значения фактора на 1% смертность от ВИЧ увеличивается на 0,3041%. Такой, на первый взгляд, нелогичный результат, можно объяснить тем, что ВИЧ относится к болезни крупных городов и отчасти является следствием урбанизации, где финансовый доступ к медицинским сервисам выше априори;

2.3. при прогнозировании смертности от туберкулёза фактор  $X_{31}$  – доля городского населения. При росте значения фактора на 1% смертность от туберкулёза возрастает на 0,1082%.

3. Согласно данным, представленным на рис. 2, наибольшая смертность от малярии наблюдается в Нигере со значением 1,1 на 1000 человек, а наименьшая – в Намибии, в которой она практически отсутствует. Что касается смертности от ВИЧ, то, как показано на рис. 2б, наибольшее значение отмечается в ЮАР, а минимальная смертность среди стран Африки в Нигерии (практически нулевое значение). Лидерами по смертности от туберкулёза в странах Африки являются Египет, Нигер, Гана и Кения, у которых это значение равно 0,1 на 1000 человек, а наибольшая смертность от туберкулёза наблюдается в Габоне (антилидер со значением 0,9 на 1000 человек).

## Литература

1. Всемирная организация здравоохранения. <https://www.who.int> (дата обращения 30.07.2025).
2. The Sustainable Development Goals Report 2024. United Nations, 2024. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/> (дата обращения 30.07.2025).
3. The Global Fund. (2024). The impact of COVID-19 on HIV, TB and malaria services and systems for health: A snapshot from 502 health facilities across Africa and Asia. [Оценочный доклад]. [https://www.theglobalfund.org/media/10776/covid-19\\_2020-disruption-impact\\_report\\_en.pdf](https://www.theglobalfund.org/media/10776/covid-19_2020-disruption-impact_report_en.pdf) (дата обращения 30.07.2025).
4. Костырин Е.В., Луа М.П. Экономико-математическая модель управления системой здравоохранения республики Гвинея // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024): труды Семнадцатой международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 1295–1302.
5. Murray C.J.L., Lopez A.D. Measuring the Global Burden of Disease // *New England Journal of Medicine*. – 2013. – Vol. 369. – P. 448–457.
6. Sachs J.D. Ending Africa's Poverty Trap // *Brookings Papers on Economic Activity*. – 2004. – Vol. 1. – P. 117–240.
7. Костырин Е.В., Луа М.П. Эконометрическая модель управления инфекционными заболеваниями в странах Африки // *Экономика и управление: проблемы, решения*. – 2025. – Том 14, № 2. – С. 70–80.
8. Yang D., He Y., Wu B., Deng Y., Li M., Yang Q., Huang L., Cao Y., Liu Y. Drinking water and sanitation conditions are associated with the risk of malaria among children under five years old in sub-Saharan Africa: A logistic regression model analysis of national survey data // *Journal of African Economies*. – 2020. – Vol. 1, № 21. – P. 1–13. DOI:10.1016/j.jare.2019.09.001.
9. Nkumata I.N., O'Meara W.P., Osier F.H.A. Changes in Malaria Epidemiology in Africa and New Challenges for Elimination // *Trends in Parasitology*. – 2017. – Vol. 2, № 33. – P. 128–140. DOI: 10.1016/j.pt.2016.11.006.
10. Buvé A., Bishikwabo-Nsarhaza K., Mutangadura G. The spread and effect of HIV-1 infection in sub-Saharan Africa // *The Lancet*. – 2002 – Vol. 9322, № 359. – P. 2011–2017. DOI: 10.1016/S0140-6736(02)08823-2.
11. Всемирная организация здравоохранения. Африканское региональное отделение. <https://afro.who.int/> (дата обращения 30.07.2025).
12. Международная организация труда. <https://ilostat.ilo.org/data/> (дата обращения 30.07.2025).