

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса
Лумумбы»

На правах рукописи

БАХАРАНЕ ВАЛЕРИЕН

**ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА
ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА В СТРАНАХ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ**

1.5.15. Экология

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук, доцент Шаталов А. Б.

Москва – 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Обзор Литературы	12
1.1 ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА.....	12
1.2 МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА	13
1.3 ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА НА ЗДОРОВЬЕ	15
1.4 ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В СТРАНАХ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ.....	20
1.5 КРИТЕРИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ	30
1.6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПЕРВОЙ ГЛАВЫ.....	38
Глава 2 Материал и методы исследования	39
2.1 ОПИСАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	39
2.2 ИСТОЧНИКИ ДАННЫХ.....	40
2.3 МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИЗА ДАННЫХ.....	48
2.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ВТОРОЙ ГЛАВЫ.....	49
Глава 3 Оценка техногенных и антропогенных факторов и структуры загрязнения воздуха в их развитии	51
3.1 ВЫБРОСЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В РЕГИОНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ	51
3.1.1 Пространственная изменчивость выбросов загрязнителей воздуха	53
3.1.2 Сезонная изменчивость выбросов загрязнителей воздуха	55
3.1.3 Анализ тенденций антропогенных выбросов.....	60
3.2 УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В РЕГИОНЕ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ	65
3.2.1 Уровень воздействия загрязнения воздуха по странам	66
3.2.2 Временная изменчивость загрязнения воздуха	69
3.2.3 Уровень загрязнения воздуха в городах	71
3.3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЫ.....	73

Глава 4 Оценка влияния загрязнения воздуха на здоровье человека	74
4.1 ВРЕД ДЛЯ ЗДОРОВЬЯ, СВЯЗАННЫЙ С ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ВОЗДУХА В СТРАНАХ Восточной Африки	74
4.2 ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ВОЗДУХА, ПОВЕРХНОСТНЫМ РАСТИТЕЛЬНЫМ ПОКРОВОМ И РАСПРОСТРАНЁННОСТЬЮ ИНСУЛЬТА В Восточной Африке.....	79
4.3 СОКРАЩЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНИ ИЗ-ЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА	88
4.3.1 Стандартные функции таблицы смертности	88
4.3.2 Оценка ожидаемой продолжительности жизни при рождении с учётом причин смертности	91
4.3.3 Зависимость продолжительности жизни от различных причинно- следственных связей. Роль загрязнения воздуха.....	95
4.4 ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА И УРОВЕНЬ СМЕРТНОСТИ ВЗРОСЛОГО НАСЕЛЕНИЯ В СТРАНАХ Восточной Африки.....	106
4.5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЫ	115
Общее заключение	117
Основные результаты диссертационной работы	121
Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.....	122
Список сокращений и условных обозначений.....	123
Список литературы	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), загрязнение воздуха является одним из важнейших экологических рисков при заболевании человека (World Health Organization, 2024) и в ряде заболеваний это является один из основных факторов опасности, приводящим к смертности (Кислицына и др., 2023). Население, в странах с низким и средним уровнем дохода, составляющее 55% от всего человечества, более уязвимо к загрязнению воздуха (Al-Kindi и др., 2020). В докладе «Состояние воздуха в мире в 2024 году» загрязнение воздуха занимает второе место среди факторов риска смерти, а наибольшее бремя заболеваний приходится на Африку и Южную Азию (State of Global Air Report, HEI, IHME, 2024). После освобождения от колониальной зависимости население Африки характеризуется увеличением продолжительности жизни и снижением инфекционных заболеваний. Быстрый рост населения и стремление найти альтернативную работу, отличную от сельского хозяйства, подтолкнули молодёжь к миграции в города. Кроме того, быстрый рост населения, промышленная революция и ускоренная урбанизация, превышающая возможности существующей инфраструктуры, привели к деградации окружающей среды, особенно в городских районах. К списку связанных с технологией источников загрязнения воздуха добавляются сжигание биомассы в сельской местности и широкое использование твёрдого топлива для отопления и приготовления пищи в городах (Agbo и др., 2021). Исследования, проведённые на Африканском континенте, за последние 20-25 лет, показали, что выбросы загрязняющих веществ в воздух в атмосферу на континенте, как ожидается, будут продолжать увеличиваться в будущем (Liousse и др., 2014), что ускорит ухудшение качества воздуха не только на африканском континенте, но и в глобальном масштабе.

Как и в большинстве развивающихся стран, в Африке прилагаются значительные усилия для снижения уровня загрязнения воздуха в домашних хозяйствах, поскольку оно способствует сокращению продолжительности жизни

(Okello и др., 2023) и его неблагоприятному воздействию на социально незащищённые группы населения, особенно детей и пожилых людей, которые проводят больше времени в одном и том же месте, особенно в помещении. Отсутствие должного внимания к проблеме загрязнения воздуха вне домов, привело к увеличению загрязнения наружного воздуха по всему континенту, особенно в городских районах (Health Effects Institute, 2022). Кроме того, было отмечено, что концентрация загрязняющих веществ в атмосферном воздухе на Африканском континенте являются одними из самых высоких в мире (Makoni, 2020). По оценкам ВОЗ, воздействие загрязнения воздуха является гораздо более высоким фактором риска развития основных неинфекционных заболеваний, чем считалось ранее (World Health Organization, 2017).

В настоящее время Восточная Африка лидирует по темпам экономического роста в Африке (African Development Bank, African Economic Outlook, 2023). Однако этот рост также сопровождается ухудшением качества воздуха, при этом плохое качество воздуха, особенно твёрдые частицы диаметром менее или равным 2,5 микрометра ($ТЧ_{2,5}$) и твёрдые частицы диаметром менее или равным 10 микрометрам ($ТЧ_{10}$), способствуют увеличению заболеваемости и смертности людей в регионе (Clarke и др., 2022b). Отсутствие данных о загрязнении атмосферного воздуха по большинству загрязняющих веществ ограничивает существующие исследования $ТЧ_{2,5}$ и $ТЧ_{10}$, и большинство из них были сосредоточены на городских районах, где были созданы сети мониторинга. Тем не менее, современная глобальная тенденция эпидемиологических исследований заключается в использовании очень больших популяций с достаточной статистической мощностью для определения загрязнения воздуха при низких концентрациях, когда контрасты невелики. Таким образом, необходимы оценки уровня загрязнения воздуха, охватывающие большие географические территории, такие как континент, с достаточно тонким пространственным разрешением. Исследования показали, что социально-пространственное распределение показателей окружающей среды, в частности показателей загрязнения воздуха,

может быть важным фактором географического неравенства в состоянии здоровья людей (Ye, Tao, Wei, 2024). Несмотря на то, что страны Восточной Африки имеют общие границы, культурное наследие и основные источники загрязнения воздуха, необходимо провести сравнительное исследование воздействия загрязнения воздуха и последствий для здоровья в этих странах, чтобы оценить уровень борьбы с загрязнением воздуха в каждой отдельно взятой стране и таким образом, оценить эффективность общих мер по борьбе с загрязнением воздуха, разработанных странами-участницами.

Цель работы. Целью данного исследования является оценка уровня загрязнения воздуха и его влияния на заболеваемость и смертность людей, вызванные этим воздействием в странах Восточной Африки (Бурунди, Кения, Руанда, Танзания и Уганда).

Задачи исследования:

- 1) Определить и оценить потенциальные источники и уровни загрязнения атмосферного воздуха в странах Восточной Африки;
- 2) Проанализировать показатели заболеваемости и смертности, связанные с загрязнением воздуха в регионе;
- 3) Установить степень зависимости между загрязнением воздуха, развитостью растительного покрова и уровнем смертности в данном регионе;
- 4) Исследовать влияние загрязнения воздуха на сокращение продолжительности жизни в регионе в сравнении с другими экологическими стрессорами и поведенческими факторами риска.

Научная новизна. В данном исследовании проведена оценка последствий для здоровья, связанные с загрязнением воздуха на большой территории Восточно-Африканского региона. Данное исследование дополнило существующие исследования по воздействию загрязнения воздуха, приведены оценки комбинированного воздействия загрязняющих веществ, таких как бытовые загрязнители воздуха, образующиеся при сжигании твёрдого топлива (Household Air Pollution, HAP), мелкодисперсные частицы ($\text{TC}_{2.5}$), озон (O_3), диоксид серы

(SO₂) и оксид углерода (CO), на здоровье человека. Было показано, что НАР и твёрдые частицы представляют собой основной риск для здоровья, связанный с заболеваемостью в этом регионе. Кроме того, в этом исследовании впервые приведены оценки потенциальных источников загрязнения воздуха в регионах с использованием модели загрязнения воздуха, объединяющей существующие массивы данных кадастров загрязнения воздуха. Было показано, что основными источниками CO и оксиды азота (NO_x) являются сжигание биомассы, тогда как, SO₂ преобладают в выбросах вулканов и автомобильного транспорта. Показано, что доминирующими источниками роста загрязнения воздуха в регионе являются домохозяйства, производство энергии и автотранспорт. Используя данные, полученные из различных открытых источников и данные дистанционного зондирования, получена количественная оценка уровня и тенденция загрязнения воздуха в городах Восточной Африки.

Получены оценки вреда для здоровья человека, связанные с загрязнением воздуха, такие как, снижение ожидаемой продолжительности жизни при рождении в условиях загрязнённого воздуха и высокая корреляция между оценками загрязнения воздуха и уровнем смертности взрослого населения в регионах. Использование многоуровневого моделирования в данном исследовании, представляет собой инновационную методологию для понимания взаимосвязи между социально-экономическими факторами, загрязнением воздуха и последствиями для здоровья человека.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты данного исследования имеют важное научное и практическое значение для понимания оценок загрязнения воздуха и степени его воздействия на здоровье людей в Восточно-Африканском регионе. Знание потенциальных источников загрязнения воздуха поможет властям в выработке стратегии принятия мер по ограничению выбросов. Оценки уровней загрязнения воздуха во времени и пространстве, а также прогнозируемых показателей с учётом динамики развития и изменения регионов поможет в поисках путей снижения количества загрязняющих веществ,

вызывающих наибольшую озабоченность, а также адаптироваться к периодам с особо высокими уровнями загрязнения, их преодолению с минимальными потерями. Оценка пространственно-временной динамики загрязнителей и их влияния на смертность и ожидаемую продолжительность жизни позволяет обосновывать необходимость срочных мер, ориентированных на защиту здоровья населения. Публикация полученных данных и закономерностей в средствах информации о влиянии загрязнения воздуха в распространённости смертности среди взрослого населения и сокращении продолжительности жизни побудит правительства повысить осведомлённость общества о загрязнении воздуха и стимулировать инвестиции в эпидемиологические исследования загрязнения воздуха. И что очень важно, сравнение вреда от загрязнения воздуха в разных странах поможет выявить и устранить недостатки в работе государственных природоохранных органов и мобилизовать их на более решительные действия для борьбы с загрязнением воздуха в различных регионах Африки.

Методология и методы исследования. Это исследование сочетает в себе наземный мониторинг, дистанционное наблюдение и повторный анализ моделей концентраций загрязняющих веществ в воздухе, а также их воздействия на здоровье человека. Выбросы загрязняющих веществ были смоделированы с использованием пакета программ HEMCO (Harmonized Emissions Component) и проанализированы путем определения основных статистических тенденций. Анализ тенденций проводился с использованием теста тренда Манна-Кендалла с использованием пакета программ Python. Уровень загрязнения воздуха оценивался путем усреднения ежедневных проб по месячным и годовым значениям. Были проанализированы данные дистанционного зондирования и из открытых источников о $\text{TC}_{2.5}$, бытовом загрязнении воздуха (Household Air Pollution, HAP), O_3 , CO , SO_2 и NO_x . Данные наземного мониторинга качества воздуха были получены от различных государственных и частных экологических учреждений, действующих в Восточно-Африканском регионе, а данные о показателях, связанных со здоровьем, были собраны ВОЗ, Группой Всемирного банка (ГВБ),

программе Медико-демографических исследований (МДИ) (Demographic and Health Surveys, DHS), Институтом показателей и оценки состояния здоровья (Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME). Последствие загрязнения воздуха для здоровья были оценены с использованием многоуровневых моделей линейной и логистической регрессии для учёта иерархической структуры риска. Для этого были построены модели множественной линейной регрессии (МЛР) и логистической регрессии (ЛР) для оценки воздействия загрязнения на здоровье человека и влияния загрязнения воздуха на развитие ребёнка. Влияние загрязнения воздуха на уровень смертности взрослого населения оценивалось с использованием подхода обобщенного метода моментов (ОММ). Статистический анализ и модели были выполнены с использованием программного обеспечения Python, R (версия 4.3.1) и операторов климатических данных (Climate Data Operators, CDO).

Положения, выносимые на защиту:

1) Загрязнение воздуха в исследуемых регионах демонстрирует трендовый рост. Основными источниками загрязнения воздуха являются сжигание биомассы, жилой сектор, автомобильный транспорт, а также промышленное производство и строительство.

2) Основными загрязнителями воздуха являются твёрдые частицы, образующиеся при сжигании биомассы, что вызывает высокую обеспокоенность в органах здравоохранения в регионах.

3) Загрязнение воздуха играет первостепенную роль в распространённости смертности взрослого населения в регионах Восточной Африки.

4) Загрязнение воздуха является основным экологическим фактором риска, способствующим снижению ожидаемой продолжительности жизни в странах Восточной Африки.

Личный вклад автора. Автор собрал и проанализировал данные по загрязнению воздуха и его влияния на заболеваемость, адаптировал модели к исходным данным и географической привязке, выстроил соответствующие модели

для прогнозирования воздействия загрязнения воздушной среды на здоровье человека в странах Восточной Африки.

Апробация работы. Результаты исследований доложены и обсуждены на: XXIV Ежегодная международная научно–практическая конференция «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (АПЭиП-2023), Москва (Россия), 22–24 апреля 2022 г; Молодёжный форум «Россия-Африка: Ядерное образование для устойчивого развития», Москва (Россия), 26.07.2023; Третья региональная конференция Восточно-Африканского сообщества по науке, технологиям и инновациям на тему- «Ускорение развития и распространения науки, технологий и инновационных решений для устойчивой Восточной Африки», Найроби (Кения), 6–8 марта 2024 г; Актуальные проблемы экологии и природопользования (АПЭиП-2024), «Международная научно-практическая конференция», Москва (Россия), 26–27 апреля 2024 г; Конференция «Экологический мониторинг и исследование антропогенных воздействий на окружающую среду», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва (Россия), 18–19 марта 2025.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 статей. Из них 4 статьи были опубликованы в научных журналах, индексируемых в базы данных Scopus и/или Web of Science, 1 статья в журнале, индексируемом в РИНЦ, 2 статьи в региональных изданиях материалов симпозиумов и конференций, и 2 статьи в журнальном, индексируемых в Google Академии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы. Основной текст работы составляет 122 страницы, в том числе 28 рисунков и 22 таблицы. Общий обзор литературы включает 229 источников. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста.

Благодарности. Диссертант выражает глубокую благодарность научному руководителю – к.т.н. доценту Шаталову А. Б. за руководство данной работой, и он также признателен сотрудникам Института экологии Российского университета

дружбы народов имени Патриса Лумумбы за доброжелательное сотрудничество на протяжении всего учебного пути. И последнее, но не менее важное, диссертант, безусловно, не добилаь бы успеха без поддержки Инезы Эллы Дарин, Бвизы Эллы Варды и её прекрасной матери Ньираманы Жаклин, которая поддерживала их в течение всего периода, когда он находилась вдали от них.

Глава 1 Обзор Литературы

1.1 Загрязнение атмосферы как экологическая проблема

Загрязнение воздуха – это концепция, которую трудно кратко описать. Согласно Сайнфелд и Пандис (2016), «Загрязнение воздуха – это состояние, при котором вещества присутствуют в атмосфере в концентрации, достаточно высокой, превышающей их нормальный уровень в окружающей среде, чтобы оказывать нежелательное воздействие на людей, животных, растительность или материалы». ВОЗ определяет загрязнение окружающей среды как внедрение любого химического, физического или биологического агента, который изменяет естественные характеристики окружающей среды (Швыряев, Меньшиков, 2022). Основываясь на этих определениях, можно сказать, что любое вещество, которое, как предполагается, оказывает воздействие на людей, животных, растительность, видимость, климат или другие активы, может считаться загрязнителем воздуха. Учёные утверждают, что загрязнение воздуха началось со сжигания топлива человеком и поэтому все антропогенные выбросы в атмосферу, изменяющие естественный состав атмосферы, могут быть квалифицированы как загрязнители воздуха (Zannetti, Daly, 2007). Однако загрязнители воздуха имеют как природное, так и антропогенное происхождение и могут принимать форму твёрдых частиц, жидких или газообразных веществ. Все они делятся на несколько групп, таких как частицы, летучие органические соединения и галогенорганические соединения (Ngo Tho Hung, 2010).

В результате появления и производства огромного количества загрязняющих веществ, выбрасываемых в воздух и наносящих вред здоровью человека, глобальное загрязнение окружающей среды ухудшилось после промышленной революции. Факты показывают, что загрязнение воздуха является глобальной проблемой общественного здравоохранения. Это ведущая в мире экологическая причина заболеваний и преждевременной смерти, на которую ежегодно приходится около 9 миллионов смертей (Fuller и др., 2022), причём только

мелкодисперсные аэрозоли или твёрдые частицы являются причиной более 6,4 миллиона смертей. Установлено, что загрязнение воздуха негативно влияет на поведение людей, их самочувствие и производительность труда (Петрович и др., 2014). Помимо здоровья, загрязнение воздуха также связано с утратой биоразнообразия и экосистем и оказывает неблагоприятное воздействие на человеческий капитал (Soppelsa, Lozano-Gracia, Xu, 2019). Влияние загрязнения воздуха на животных сопоставимо с воздействием на человека, кислотные дожди, вызванные атмосферным диоксидом серы и оксидами азота, а также осаждение тяжёлых металлов в воде и почве способствуют подкислению и эвтрофикации наземной и морской среды, нанося вред флоре и фауне, которые их населяют.

1.2 Мониторинг и моделирование качества воздуха

Мониторинг качества атмосферного воздуха – это постоянно измерение концентрации загрязняющих веществ в каждом районе. Он является фундаментальной частью эффективной системы управления качеством воздуха (ЕРА, 2022). На рисунке 1 описаны компоненты и функциональные возможности системы экологического мониторинга. Сети мониторинга воздуха позволяют измерять и прогнозировать развитие загрязнения воздуха. Основной целью мониторинга качества воздуха является определение уровней загрязнения атмосферы и разработка плана действий по смягчению последствий и адаптации к высоким уровням загрязнения (Зенченко, Горбачев, 2018). Кроме того, система мониторинга качества воздуха позволяет оценивать степень загрязнения воздуха, предоставляет данные о загрязнении воздуха для информирования общественности об уровне загрязнения, помогает внедрить ограничения и стандарты выбросов в атмосферу, позволяет проводить оценку и калибровку установленных моделей качества воздуха, созданных исследователями для разных целей (Bower и др., 1999). Выбор параметров мониторинга зависит от цели мониторинга. Критерии, используемые для выбора, напрямую связаны со степенью соответствия метода следующему требованию: он должен быть (а) ясным и достаточно точным, (б)

чувствительным и специфичным, (в) экономичным с точки зрения времени, материалов и инструментов, (г) уже широко признанные и предпочтительно подтверждённые в межлабораторных сравнительных исследованиях (Lodge, 2003). Однако, независимо от цели мониторинга, сеть мониторинга качества воздуха должна быть надёжной в предоставлении соответствующей информации о загрязнителях воздуха для оценки воздействия загрязнения на людей и окружающую среду (Yi и др., 2015).



Рисунок 1 – Роль мониторинга в управлении качеством воздуха

Хотя наземный мониторинг является лучшим методом определения уровня загрязнения воздуха, но во многих случаях он недостаточен или непрактичен для полного определения воздействия на население на обширной территории. Для этого учёные широко используют модели. Часто мониторинг качества воздуха сочетается с другими методами объективной оценки, такими как инвентаризация выбросов, картирование и интерполяция (Bower и др., 1999) для получения полной информации об уровне воздействия загрязнения воздуха.

Моделирование качества воздуха как численный инструмент для описания причинно-следственных эффектов загрязнения воздуха играет важную роль в

управлении качеством воздуха благодаря своей способности оценивать относительную важность соответствующих процессов (Daly, Zannetti, 2007). Построение количественных связей между выбросами загрязняющих веществ из точки в объем, от стационарных до передвижных источников, и последующими концентрациями в различных точках приёма на различных временных интервалах – это и есть процесс моделирования качества воздуха (Guldmann, Kim, 2010). Из-за множества природных и антропогенных явлений, при которых пассивные или активные химические соединения и частицы выбрасываются в атмосферу, моделирование рассеивания загрязнителей воздуха используется для прогнозирования взаимодействия между ними и результирующего качества воздуха. Таким образом, разработка различных модельных стратегий является ключевым элементом характеристики загрязнения воздуха (Leelőssy и др., 2014). Из-за пробелов в нашем понимании выбросов и атмосферных процессов моделированная информация неизбежно является неопределённой. Однако этот недостаток можно смягчить, используя измерения для проверки моделей или объединяя информацию измерений и моделей для оценки качества воздуха (Aalst van и др., 1998). Кроме того, в сочетании с наблюдениями дистанционного зондирования возможности моделирования загрязнения воздуха облегчили определение уровней загрязнения воздуха в некоторых районах, где измерительная сеть отсутствует или мало разнесена (Mozumder, Reddy, Pratap, 2013), особенно в странах с низким и средним уровнем дохода, а также и в городских районах, где требуется определение уровня загрязнения с очень точным пространственным и временным разрешением.

1.3 Влияние загрязнения воздуха на здоровье

Глобальную проблему загрязнения воздуха можно рассматривать с точки зрения его прямого воздействия на здоровье человека. Загрязнение воздуха является причиной около 9 миллионов смертей ежегодно (Fuller и др., 2022). Все загрязнители воздуха вредны для здоровья человека, но некоторые компоненты более опасны, чем другие. Среди всех известных загрязнителей воздуха твёрдое

частицы оказывают более неблагоприятное воздействие на здоровье человека. Поступая из различных источников, твёрдые частицы окружающей среды являются переносчиками токсичных веществ из источников их происхождения. Тем не менее, аналогичные эффекты наблюдаются и при длительном воздействии других загрязнителей (Kampa, Castanas, 2008). Поскольку дыхательные тракт являются основным путём проникновения загрязнителей воздуха, большая часть вредного воздействия загрязнителей воздуха связана с заболеваниями, от которых страдают дыхательные пути (Березин, Сергеев, 2018). В зависимости от своих размеров и химической активности переносимые по воздуху твёрдые частицы и газы могут проникать в кровоток, проходя через лёгкие и достигая всего тела, что приводит к системному воспалению и канцерогенности. Влияние загрязнения воздуха на здоровье человека в значительной степени изучено, но многое ещё неизвестно, поэтому исследования продолжают обнаруживать связь между загрязнением воздуха и вредом для здоровья (Vandyck и др., 2022).

Пагубные последствия загрязнения воздуха зависят от типа и характера загрязняющих веществ, а также от продолжительности их воздействия. Исследование загрязнения воздуха твёрдыми частицами и статистики ежедневной смертности в 652 городах показало независимую связь между краткосрочным воздействием TC_{10} и $TC_{2,5}$ и ежедневной смертностью от всех причин, сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний (Liu и др., 2019). Острое воздействие SO_2 вызывает немедленную бронхоконстрикцию, сужение реактивности дыхательных путей и изменяет метаболизм. Хроническое воздействие приводит к отеку слизистых тканей и повышению секреции, а воздействие окружающей среды может усугубить имеющиеся лёгочные заболевания. Вдыхание большого количества CO приводит к тому, что гемоглобин менее эффективно переносит кислород, что может иметь фатальные последствия при достаточно высоких концентрациях и длительном воздействии. Другие последствия для здоровья включают головные боли, головокружение, тошноту, рвоту, слабость и задержку реакции (Raub, 1999). Оксиды азота (NO_x) являются потенциальным

раздражителем глаз, кожи и дыхательных путей даже при кратковременном воздействии было обнаружено, что они быстро индуцируют метгемоглобинемию. Они ухудшает симптомы астмы (Рыбакова, 2015) и вызывают заболевания дыхательных путей. Даже некоторые исследования связывают смертность от NO_x с сердечно-сосудистыми заболеваниями (Carey и др., 2013) и диабетом. Однако до сих пор существует неоднозначность в интерпретации связи между NO_x и всеми этими болезнями, поскольку оксид азота также может представлять собой триггер для других загрязнителей. В Таблице 1 обобщены современные знания о влиянии загрязнения воздуха на здоровье человека.

Таблица 1 – Документально подтверждённое влияние загрязнения воздуха на здоровье человека

Область	Патологии	Воздействие загрязняющих веществ	Источники
Нейрональные заболевания	Головная боль	NO ₂	(Dales, Cakmak, Vidal, 2009)
	Беспокойство	ТЧ	(Power и др., 2015)
	Старческое слабоумие	ТЧ	(Power и др., 2016)
	Аутизм	ТЧ; CO	(Levy, 2015)
	Альцгеймер	ТЧ; O ₃	(Block, Calderón-Garcidueñas, 2009)
Респираторные заболевания	Вирусная инфекция	ТЧ	(Brugha, Grigg, 2014)
	Астма	CO ₂ ; NO ₂ ; O ₃	(Guan и др., 2016)
	Бронхит	SO ₂	(Sunyer и др., 2006)
	ХОБЛ	ТЧ	(Kurmi и др., 2010)
	Муковисцидоз	ТЧ	(Goss и др., 2004)

	Рак лёгких	ТЧ	(Fajersztajn и др., 2013)
Сердечно-сосудистые заболевания	Инфекция миокарда	ТЧ	(Zanobetti, Schwartz, 2005)
	Аритмия	ТЧ	(Anderson, Thundiyil, Stolbach, 2012)
	Инсульт	NO ₂	(Maheswaran, 2016)
	Сердечная недостаточность	CO; SO ₂ ; NO ₂	(Yang и др., 2017)
онкология	Рак лёгких	ТЧ	(Raaschou-Nielsen и др., 2013)
	Рак молочной железы	NO ₂	(Crouse и др., 2010)
	Аденокарцинома	ТЧ	(Yang и др., 2022)

Помимо характера загрязняющих веществ, неблагоприятное воздействие загрязнения воздуха затрагивает всех людей, но некоторые группы людей более восприимчивы, чем другие. Исследования показали, что вред воздействия загрязнения воздуха больше для беременных женщин, новорождённых, детей и пожилых людей и людей с некоторыми основными заболеваниями (Makri, Stilianakis, 2008). Загрязнение воздуха также влияет на здоровье плода из-за воздействия на него материалов загрязнителей и вызывает преждевременные роды, низкий вес и задержку роста, а также неблагоприятные сердечно-сосудистые и респираторные последствия (Backes и др., 2013). В своём мета-аналитическом исследовании Попе и др., (2010) обнаружили, что риск низкой массы тела при рождении и случаи мертворождения, связанные с загрязнением воздуха внутри помещений в развивающихся странах, что составляет 21% и 26% соответственно (Pope и др., 2010). Некоторые компоненты, такие как полициклические ароматические углеводороды, входящие в состав ТЧ_{2,5}, были связаны с задержкой развития, снижением интеллектуального коэффициента, симптомами тревоги, депрессии и невнимательности (Perera и др., 2014), а также уменьшением размера

мозга у детей (Сериккановна, Өмірханқызы, 2024). Группа экологических исследований Имперского колледжа Лондона проанализировала влияние загрязнения воздуха на здоровье человека на основе более чем 35000 научных работ и пришла к выводу о влиянии загрязнения воздуха на протяжении всей жизни (Fuller, Friedman, Mudway, 2023). В Таблице 2 дано краткое изложение последствий загрязнения воздуха для здоровья, которые освещены в их отчётах.

Таблица 2 – Краткое изложение последствий загрязнения воздуха для здоровья в зависимости от роста жизни (Fuller, Friedman, Mudway, 2023)

Этап жизни	Влияние на здоровье
Беременность и исходы родов	Недоразвитие плода Низкий вес при рождении Гестационный возраст и преждевременные роды Выкидыш Количество и подвижность сперматозоидов
Развитие ребёнка: от рождения до подросткового возраста.	Опухоль лёгких Астма Артериальное давление Когнитивные способности Невнимательность и гиперактивность Психическое здоровье и болезни
Взрослая жизнь	Ранняя смерть Болезни сердца Инсульт Мозг и психическое здоровье Болезнь органов дыхания Рак Множественные хронические заболевания

1.4 Проблема загрязнения воздуха в странах Восточной Африки

Проблемы загрязнения воздуха затрагивают все регионы мира, однако, развивающиеся страны страдают от них больше других (Фахриддиновна, Қизи, Ўғли, 2023). Исследования показали, что уровень загрязнения твёрдыми частицами в большинстве городов к югу от Сахары превышает нормативы ВОЗ (Agbo и др., 2021). В условиях ограниченных возможностей мониторинга уровень загрязнения воздуха в африканских странах и риски остаются неопределёнными. Об этом свидетельствуют чрезвычайные действия, предпринятые правительствами ряда африканских стран для решения проблемы ухудшения ситуации с качеством воздуха в городах и регионах, что также обусловлено знаниями местных властей о масштабах загрязнения воздуха и рисков воздействия на окружающую среду и здоровье людей (Agbo и др., 2021). В глобальной базе данных ВОЗ по загрязнению воздуха в городах содержится информация только о ТЧ₁₀ о 12 из 47 городов Африканского региона (Tsati и др., 2022).

Ухудшение качества воздуха в городах Африки к югу от Сахары в основном объясняется быстрым ростом населения, развитием промышленности и стремительной урбанизацией при отсутствии вспомогательной инфраструктуры (Amegah, Agyei-Mensah, 2017). Страны Восточной Африки входят в число стран, переживающих быстрые экономические преобразования, но этот рост сопровождается быстрым ухудшением состояния окружающей среды (Mazzeo и др., 2022). Тот факт, что границы Восточно-Африканских стран связаны и имеют общую антропогенную и генетическую историю, приводит также к примерно одинаковой доле аналогичных источников загрязнения воздуха в этих странах. Однако в отношении качества воздуха в этих странах наблюдаются значительные различия. Подобно другим регионам Африки к югу от Сахары, Восточная Африка сильно страдает от плохого качества воздуха. Недавние исследования показали, что в странах Восточной Африки, к югу от Сахары зафиксирован очень высокий риск детской смертности, на которые приходится более половины всей смертности детей в возрасте до пяти лет (Tesema, Teshale, Tessema, 2021). Отмечено также,

загрязнения воздуха существенно влияет на пренатальный период жизни в этом регионе (Clarke и др., 2022b). Несмотря на небольшое количество исследований эпидемиологического воздействия, связанного с загрязнением воздуха, в них также преобладает воздействие, вызванное загрязнением воздуха в жилых помещениях, и ни в одном исследовании не сообщается о влиянии загрязнения окружающей среды. Тем не менее, учёные продолжают демонстрировать высокие концентрации загрязнения окружающего воздуха, особенно ТЧ_{2,5}; СО и О₃ (Subramanian и др., 2020).

Кроме того, социально-экономическое положение Восточной Африки благоприятствует загрязнению воздуха. Хотя Восточная Африка имеет быстрорастущую экономику, она все ещё остаётся одним из беднейших регионов мира, с наименьшей долей населения, проживающего в городах и, следовательно, большая доля людей не имеет доступа к современным источникам энергии. Более 80% сельских домохозяйств Восточной Африки тратят в среднем до двух часов в день на сбор биомассы для приготовления пищи, а неэффективным кухонным плитам требуется много часов, чтобы закончить приготовление пищи (Kammila и др., 2014). Кроме того, высокий уровень внутреннего использования ресурсов биомассы приведёт к примерно 117000 смертей в год из-за НАР к 2015 году (Forouzanfar и др., 2016). Загрязнение атмосферного воздуха также является растущей проблемой в регионе, приводя к увеличению заболеваемости и смертности. Кроме того, быстрая урбанизация в городах способствует ухудшению качества воздуха, поскольку движение транспорта, промышленность и сжигание твёрдого топлива являются основными источниками загрязнения воздуха в этих городах (Singh и др., 2021). В таблице 3 приведены данные о текущем состоянии окружающей среды, занятости и климата, полученные в результате всестороннего обзора Центра Восточной Африки.

Таблица 3 – Перечень вопросов, требующие безотлагательного решения для снижения загрязнением воздуха в странах Восточной Африки (Wipfli и др., 2021)

Страны	Проблемы загрязнения воздуха
Бурунди	- Необходимо разработать национальную политику в области качества воздуха - Необходимо сократить открытое сжигание отходов и загрязнение воздуха в помещениях путём продвижения чистого топлива для приготовления пищи и печей. - Недостаточные исследования уровня загрязнения воздуха и связанных с ними последствий для здоровья. - Отсутствие возрастных ограничений на ввоз подержанных автомобилей. - Необходимы действия по расширению, совершенствованию и продвижению общественного транспорта и общественного транспорта. - Необходимо создать сеть мониторинга качества воздуха
Кения	- Неадекватные исследования уровней загрязнения воздуха и связанных с ними последствий для здоровья. - Необходимость создания систем мониторинга качества воздуха
Руанда	- Отсутствие инфраструктуры и возможностей мониторинга качества воздуха. - Необходимо наращивание потенциала для проведения исследований по оценке воздействия загрязнения воздуха. - Необходимость создания систем мониторинга качества воздуха и уделения приоритетного внимания мониторингу качества воздуха, связанному с дорожным движением и разработке политики. - Необходимо наращивание потенциала для проведения исследований по оценке воздействия.

Танзания	- Необходимость внедрения стандартов по выбросам вредных веществ в атмосферу. - Необходимы действия по расширению, совершенствованию и продвижению общественного транспорта и общественного транспорта. - Действия по управлению бытовыми и сельскохозяйственными отходами. - Продвижение более чистого топлива для приготовления пищи и печей - Снижение сжигания биомассы в помещении.
Уганда	- Ограниченные исследования уровней загрязнения воздуха и связанных с этим последствий для здоровья. - Отсутствие потенциала университетов для проведения исследований - Отсутствие политики и руководящих принципов по загрязнению воздуха, включая выбросы транспортных средств и заводов, число которых растёт. - Низкая осведомлённость о влиянии загрязнения воздуха на здоровье. - Необходимо создать систему мониторинга качества воздуха.

Общие проблемы, с которыми сталкиваются страны Восточной Африки, включают квази-отсутствие и/или неадекватность сети мониторинга на их территориях. Отсутствие данных о качестве воздуха приводит к слепым научным исследованиям с использованием не повсеместных опросов и в большей степени к использованию некалиброванных и дешёвых датчиков. Анализируя вопросы, приведённые в Таблице 3, можем отметить о необходимости наращивания потенциала для проведения исследований по оценке влияния загрязнения воздуха с вредом для здоровья в странах Восточной Африки. Отсутствие эпидемиологических и экологических исследований снижает эффективность

политики, направленной на сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и чаще всего подталкивает политиков к разработке неадекватной политики в области загрязнения воздуха, ссылаясь на исследования из других регионов, которые могут не иметь ничего общего с ситуацией в Восточно-Африканском регионе. Несмотря на проблему неадекватного мониторинга и оценок загрязнения воздуха в регионе, исследователи продолжают использовать все возможные средства, чтобы сообщить о последствиях для здоровья в регионе. Однако отсутствие общего согласия между странами-членами Восточно-Африканского региона привело к отсутствию совместных действий по борьбе с загрязнением воздуха в регионе. Чтобы понять состояние качества воздуха в каждой из стран Восточной Африки, были проведены исследования загрязнения воздуха в каждой стране, сосредоточившись на изучении воздействия, эпидемиологических и обзорных исследованиях.

Республика Бурунди – страна в Восточной Африке, площадью 27 834 км² и численностью населения 11,1 млн. человек (ЕАС, 2023), граничит с Руандой, Танзанией и Демократической Республикой Конго. В Бурунди охрана окружающей среды предусмотрена конституцией страны (Walmsley, Husselman, 2019). Однако Управление по охране окружающей среды Бурунди (Office Burundi pour la Protection de l'Environnement, ОБРЕ) сталкивается с большими проблемами в обеспечении соблюдения природоохранного законодательства. К числу этих проблем можно отнести нехватку финансовых и квалифицированных человеческих ресурсов (USAID, 2022), что обуславливает критическую нехватку ресурсов, необходимых для реализации широкого спектра мероприятий, за которые отвечает учреждения, отвечающие за обеспечение и соблюдение экологических норм (GoB, World Bank, 2017). Проблемы, с которыми сталкивается ОБРЕ, проявляются в неправильном обращении с твёрдыми отходами на территории страны (Manirakiza и др., 2023). В Бурунди 86,3% сельских общин используют дрова для приготовления пищи, тогда как 67,2% городских домохозяйств используют для приготовления пищи древесный уголь, что вызывает проблемы со здоровьем и

усугубляет вырубку лесов, только 1,5% сельских домохозяйств и 50% городских жителей имеют доступ к электричеству (Gatoto, Athanase Dalson, Roddy Lollchund, 2020).

Респираторные заболевания в Бурунди, в большинстве случаев вызваны плохим качеством воздуха в помещениях и являются причиной 14% детских смертей и 25% посещений больниц (UNICEF, 2021). Исследование, проведённое Виау и др. (2000) о воздействии полициклических ароматических углеводородов и монооксида углерода внутри помещений в традиционных домах в Бурунди, пришли к выводу, что довольно высокая концентрация исследуемых загрязнителей представляет собой потенциальную опасность для здоровья сельского населения Бурунди. Бурунди и Руанда лидируют среди других стран Восточной Африки по высокому уровню оптической плотности аэрозолей как индикатору плохого качества окружающего воздуха (Baharane, Shatalov, 2023). Помимо прямого воздействия на здоровье человека, в Бурунди ежегодные затраты на деградацию окружающей среды оцениваются в 376 миллионов долларов, что эквивалентно 12,1% валового внутреннего продукта (ВВП) страны в 2014 году (World Bank, 2017). Отсутствие научных исследований уровня загрязнения воздуха и связанных с ним последствий для здоровья в Бурунди приводит к недостатку информации о последствиях загрязнения воздуха для здоровья, опираясь лишь на оценки ВОЗ и отчёты о Глобальном Бремене Болезней (ГББ), (Global Burden of Disease, GBD).

Республика Кения – расположена на экваторе и простирается от Индийского океана на востоке до Уганды на западе и от Объединённой Республики Танзания на юге до Эфиопии и Судана на севере. На востоке и северо-востоке она граничит с Сомали. Республика Кения занимает площадь 582 646 км², численность населения составляет 52,4 млн. человек (ЕАС, 2023). Кения входит в число стран Восточной Африки, переживающих стремительную урбанизацию, сопровождающуюся ухудшением состояния окружающей среды, особенно качества воздуха в городских районах. Загрязнение воздуха в Найроби постоянно превышает нормативы ВОЗ для содержания ТЧ_{2,5} (ASAP-East Africa Research Team,

2019). По оценкам, вред здоровья, связанное с $\text{ТЧ}_{2,5}$ в Кении, оценивается в более чем 5000 смертей в 2019 году (Health Effects Institute, 2024), и около 21000 преждевременных смертей происходят ежегодно из-за загрязнения воздуха в домашних условиях и респираторных заболеваний, усугубляемых плохим качеством воздуха, увеличившихся на 8,7% в период с 2015 по 2016 год (Kenya National Bureau of Statistics, 2017). Помимо загрязнения воздуха, Кения, также сталкивается с растущей проблемой управления твёрдыми отходами, которые накапливаются в городских районах и способствуют ухудшению окружающей среды. Нечистая бытовая энергия является основным источником загрязнения в сельской местности при этом твёрдое топливо из биомассы используется на 68% энергопотребления (National Environment Management Authority, 2021). Твёрдое топливо и древесный уголь составляют основной источник энергии, используемой в быту для приготовления пищи и освещения (Kimutai, Talai, 2021). Несмотря на то, что в Кении были приняты политические меры в отношении выбросов и качества воздуха, их реализация и снижение уровня загрязнения окружающей среды, продвигаются медленно (Muigua, 2019).

Источниками загрязнения воздуха в Кении в основном являются автомобили, промышленность, использование традиционных видов топлива и керосина для приготовления пищи и отопления, а также беспорядочное сжигание твёрдых отходов (deSouza, 2020). Импорт подержанных автомобилей в Кению, как сообщается, усугубляет связанные с движением выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в городских районах (Gatari и др., 2019). Хотя метеорологический департамент Кении измеряет загрязнение воздуха по большинству критериев загрязнения по всей стране, общедоступного централизованного набора данных не существует. Исследования загрязнения воздуха в Кении проводятся отдельными людьми, причём большинство из них используют некалиброванные недорогие датчики. Наиболее полным исследованием загрязнения воздуха в Кении является обзор, проведённый деСоузой (2020), в котором зафиксированы повышенные концентрации твёрдых частиц и черного углерода, одни из самых высоких в мире

с 1980-х годов (deSouza, 2020). Из-за отсутствия адекватной сети мониторинга загрязнения воздуха большинство исследований были сосредоточены на ТЧ (ТЧ₁; ТЧ_{2,5}; и ТЧ₁₀) в городских районах. В стране также наблюдается повышенный уровень загрязнения атмосферы тяжёлыми металлами, что свидетельствует о наличии технологических источников загрязнения в Кении. Кроме того, большинство исследований были направлены на изучение процесса воздействия и лишь немногие сообщали о последствиях для здоровья, связанных с загрязнением воздуха (Ezzati, Kammen, 2001).

Республика Руанда – Восточно-Африканская страна, граничащая с Угандой, Танзанией, Бурунди и Демократической Республикой Конго. Страна простирается на площадь 26 338 км², численность населения составляет 13,1 млн. человек (ЕАС, 2023). В Руанде было проведено несколько научных исследований, посвящённых загрязнению воздуха. Согласно последнему инвентаризационному списку загрязнения воздуха, составленному Агентством по управлению окружающей средой Руанды (Rwanda Environment Management Authority, REMA), основными загрязнителями, вызывающими обеспокоенность в Руанде, являются NO_x, SO₂, ТЧ, О₃ и СО (REMA, 2018). Основная причина ухудшения загрязнения воздуха в Руанде аналогична другим причинам в странах Восточной Африки. Руанда переживает ускоренный экономический рост, сопровождающийся быстрой урбанизацией, которая, по прогнозам, увеличится с 18% в 2020 году до 70% к 2050 году (Kalisa и др., 2022). По оценкам, 27,9% всего населения Руанды проживает в городских районах, при этом Кигали является крупнейшим и наиболее быстрорастущим городом. Сельские жители проживают в плановых поселениях (агломерациях), что составляет 65% от общего числа сельских домохозяйств. Основным источником энергии для приготовления пищи в Руанде являются дрова (76%), но в сельской местности это соотношение выше, где, по оценкам, 93% домохозяйств используют дрова в качестве основного источника энергии. Несмотря на перспективное видение Руанды, в котором основное внимание уделяется благополучию населения, загрязнение воздуха остаётся вторым ведущим фактором риска

смертности после недоедания: все население Руанды проживает в районах, где концентрация $\text{ТЧ}_{2,5}$ превышает нормативы ВОЗ по качеству воздуха для здорового воздуха (Health Effects Institute, 2019). Ежегодные уровни $\text{ТЧ}_{2,5}$ на открытом воздухе в городах Руанды могут достигать в наши дни значений, установленных рекомендациями ВОЗ. Высокий уровень урбанизации не сопровождается развитием инфраструктуры, отсутствие дорог с твёрдым покрытием не может снизить загрязнение окружающей среды в городских районах (Gasore и др., 2018). Использование ископаемого топлива в качестве основного источника энергии для приготовления пищи, отопления и освещения увеличивает риск заболеваний, связанных с загрязнением воздуха в жилых домах (REMA, 2018).

Исследования загрязнения воздуха в Руанде начались в 2011 году (Nsengimana, Bizimana, Sezirahiga, 2011). С тех пор научная осведомлённость продолжает расти, но все исследования сходятся на значительном ухудшении загрязнения воздуха в Руанде (DeWitt и др., 2018). Большинство существующих исследований, связанных с качеством воздуха в Руанде, проводились в городе Кигали и были сосредоточены на загрязнении твёрдыми частицами. Кроме того, в Руанде не хватает систематических эпидемиологических и экологических исследований, связанных с загрязнением воздуха. До сих пор только три исследования оценивали последствия для здоровья, связанные с загрязнением воздуха в Руанде (Kalisa и др., 2018) и были сосредоточены только на детях в возрасте до пяти лет с учётом влияния бытовых твёрдых частиц на их здоровье. Однако помимо твёрдых частиц газообразные загрязнения также оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье человека.

Объединённая Республика Танзания – граничит с Индийским океаном на востоке и имеет сухопутные границы с восемью странами: Кенией, Угандой, Руандой, Бурунди, Демократической Республикой Конго, Замбией, Малави и Мозамбиком. Площадь страны составляет – 947 303 км², а численность населения составляет 67,4 млн. человек (ЕАС, 2023). Танзания является одной из первых африканских стран, осознавших опасность загрязнения воздуха. Исследование

Мбулигве и Кассенга (1997) показали, что исследование загрязнения воздуха в Дар-эс-Саламе было проведено в 1992 году химическим факультетом Университета Дар-эс-Салама (Mbuligwe, Kassenga, 1997). С тех пор большинство исследований было сосредоточено на загрязнении, связанным с дорожным движением, причём большинство исследователей предупреждали о растущем ухудшении качества воздуха, особенно в столице Дар-эс-Саламе (Henricson, 1999). Отсутствие политики ограничения загрязнения воздуха привело к ухудшению качества воздуха, несмотря на предупреждения научного сообщества (Mfinanga, 2012).

Как и в других странах Восточной Африки, источниками загрязнения воздуха в Танзании являются быстрая урбанизация, сопровождаемая увеличением численности автотранспорта, нечистые бытовые источники энергии и сжигание биомассы в сельском хозяйстве и фермерстве. Плохие жилищные условия, ограниченная вентиляция и традиционные неэффективные кухонные плиты усугубляют опасность, вызванную домашним загрязнением. Около 85% энергетических потребностей Танзании удовлетворяется за счёт использования биомассы в виде древесного угля и дров, преимущественно для приготовления пищи и отопления (Shayo, Bintabara, 2022). К этому добавляются технологические источники, такие как, промышленность и горнодобывающая деятельность, которые увеличивают концентрацию ТЧ, газообразных и тяжёлых металлов в атмосфере (Mmari, Hassan, Bencs, 2020). В настоящее время показатели загрязнения воздуха, в Танзании выше, чем в соседних странах (The World Bank Group, 2019). Отсутствие мониторинга качества воздуха в масштабах всей страны ограничивает проведение исследований в крупных городах, таких как Дар-эс-Салам и Додома, и лишь немногие исследования о влиянии загрязнения воздуха на здоровье человека доводятся до печати.

Республика Уганда – Восточно-Африканская страна, расположенная на экваторе. Она граничит с Суданом, Кенией, Объединённой Республикой Танзания, Руандой и Демократической Республикой Конго. Площадь страны составляет 236 000 км², а численность населения — 49,2 млн. человек (ЕАС, 2023). По данным

ВОЗ, жители Уганды чаще умирают от загрязнения воздуха, чем жители Танзании и Руанды, и в два раза чаще, чем жители Кении. Основной вклад в плохое качество воздуха в Уганде вносят промышленные предприятия, выхлопы автомобилей и сжигание отходов. Увеличение количества автомобилей, которые чаще всего плохо обслуживаются, ухудшает качество воздуха в угандийских городах. Биомасса является преобладающим видом энергии, используемым в Уганде, и составляет 95% от общего потребления энергии в стране. В то время как дрова, сельскохозяйственные остатки и древесные отходы широко используются в сельских районах, а древесный уголь в основном применяется в городах (National Environment Management Authority (NEMA), 2016).

Наиболее загрязнённые районы находятся в городах или промышленно развитых частях страны, однако в некоторых сельских районах также наблюдается высокий уровень загрязнения (Clarke и др., 2022a). Загрязнение воздуха внутри помещений вызывает большое количество респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний и объясняется большой зависимостью от традиционных технологий и топлива для приготовления пищи и освещения (Mungyereza, 2016). Эпидемиологические исследования, посвящённые изучению последствий для здоровья, связанных с загрязнением воздуха, показали сильную корреляцию между вредом для здоровья и уровнем загрязнения воздуха в Уганде. В стране также наблюдается социально-экономическое неравенство в отношении воздействия загрязнения воздуха и адаптации к нему (Clarke и др., 2022a), при этом условия проживания и доступ к первичным ресурсам влияют на воздействие загрязнения воздуха и состояние здоровья.

1.5 Критерии загрязнения и их последствия для здоровья

1.5.1 Оксид углерода (CO)

Оксид углерода (CO) – это бесцветный, безвкусный, легковоспламеняющийся и токсичный газ. Он выделяется как побочный продукт неполного сгорания углеродсодержащих топлив в процессах горения, связанных с производством энергии для отопления, транспортными средствами, биомассами, а

также при окислении метана и летучих органических соединений (ЛОС) (Seinfeld, Pandis, 2016). Антропогенная деятельность является причиной двух третей выбросов СО, наиболее важными являются природные источники, такие как, вулканическая активность, электрические разряды и выбросы природного газа.

Время жизни оксида углерода, попавшего в атмосферу Земли, оценивается в три месяца. Его основным поглотителем является реакция с гидроксильным радикалом (ОН), а почвенное поглощение и диффузия в стратосферу являются второстепенными путями. Коэффициенты смешивания СО в тропосфере варьируются от 40 до 200 частей на миллиард (parts per billion, ppb) (Seinfeld, Pandis, 2016), а концентрации в окружающей среде, измеряемые в городских районах, сильно зависят от плотности транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания и зависят от топографических и погодных условий. Оксид углерода в атмосфере демонстрирует сильную временную изменчивость из-за своей высокой химической активности. Глобальные тенденции концентрации СО в тропосфере снизились примерно с 1988 по 1993 год после нескольких лет ежегодного увеличения, как это было определено различными станциями наблюдений, а уровни СО стабилизировались с 1993 года, вероятно, благодаря использованию каталитических нейтрализаторов в автомобилях (Bakwin, Tans, Novelli, 1994). Снижение глобальной концентрации СО приведёт к увеличению радикала ОН, что приведёт к увеличению скорости поглощения метана (CH_4). Это изменило бы окислительную способность атмосферы. Концентрация угарного газа также демонстрирует пространственную и временную изменчивость, обусловленную как микро-, так и макрометеорологическими факторами.

Вдыхание СО в высоких концентрациях приводит к снижению переноса кислорода гемоглобином, что вызывает такие последствия для здоровья, как ухудшение времени реакции, головные боли, лёгкое недомогание, тошнота, рвота, слабость, помутнение сознания, кома, а при достаточно высокой концентрации и длительном воздействии – смерть (Raub, 1999).

1.5.2 Диоксид серы (SO₂)

Диоксид серы (SO₂) представляет собой бесцветный газ с резким раздражающим запахом. Сжигание угля является основным источником антропогенного диоксида серы, но также он может попадать в атмосферу в качестве побочного продукта при сжигании серосодержащих видов топлива для производства энергии. Его основным биогенным источником являются извержения вулканов, но атмосферный SO₂ почти полностью имеет антропогенное происхождение (Barry, Chorley, 2021).

Соотношение смешивания SO₂ на фоне воздуха континента колеблется от 20 частей на триллион (parts per trillion, ppt) до 1 ppb. В незагрязнённом морском пограничном слое уровни SO₂ колеблются от 20 до 50 ppt. Коэффициенты смешивания SO₂ в городских условиях могут достигать значений в несколько сотен частей миллиона (parts per million, ppm) (Seinfeld, Pandis, 2016). Время жизни диоксида серы в атмосфере составляет около суток, после чего он выпадает на поверхность или окисляется до сульфатного аэрозоля.

Диоксид серы может вызвать затруднение дыхания при вдыхании в организм (Мухаметжанова, 2017). Он также токсичен для растений и может вызвать кислотные дожди, когда вступает в реакцию с влагой в воздухе. Острое (однократное) воздействие SO₂ вызывает немедленное сужение бронхов, сужение дыхательных путей, повышение лёгочного сопротивления, повышение реактивности дыхательных путей и изменения в метаболизме. Хроническое воздействие приводит к отеку тканей слизистой оболочки и увеличению секреции (WBK & Associates Inc., 2003). Воздействие атмосферного воздуха может усугубить существующие лёгочные заболевания. Ухудшение функции лёгких и сокращение продолжительности жизни у людей связано с длительным воздействием загрязнения городского воздуха. Кроме того, воздействие диоксида серы связано с различными симптомами, включая одышку и кашель, а также с обострением ранее существовавших сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний (Chen и др., 2007b). Контролируемые исследования с участием

астматиков, занимающихся спортом, показывают, что у некоторых из них наблюдаются изменения в лёгочной функции и респираторные симптомы после воздействия SO_2 в течение всего 10 минут.

1.5.3 Оксиды азота (NO_x)

Оксиды азота представляют собой группу высоко реактивных газов в атмосфере, состоящих из азота и кислорода. Среди оксидов азота наиболее токсичными молекулами являются оксид азота (NO) и диоксид азота (NO_2). NO и NO_2 не воспламеняются и имеют цвет от бесцветного до коричневого при комнатной температуре. Их основным источником является высокотемпературное горение, основным результатом которого является NO . NO , образующийся в процессе сгорания, напрямую окисляется до NO_2 , при этом степень конверсии зависит от нескольких факторов, включая доступную концентрацию NO , температуру процесса сгорания и расстояние от зоны выброса. В тропосфере к первичным источникам NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) относятся высокотемпературное горение углеводородного топлива, молнии и микробные процессы в почвах (Staudt и др., 2003). Биогенные источники оксидов азота доминируют над антропогенными (Seinfeld, Pandis, 2016). Уровень NO_x на открытом воздухе часто напрямую связан с выбросами автотранспортных средств и плотностью движения транспорта на оживлённых дорогах и наряду с ТЧ и различными органическими веществами, это позволяет считать NO_2 полезным индикатором сложной смеси твёрдых частиц и газообразных веществ, обусловленной движением автотранспорта (Schlesinger, Lippmann, 2020).

NO_x являются потенциальным раздражителем глаз, кожи и дыхательных путей даже при кратковременном воздействии, и, как было установлено, быстро вызывают метгемоглобинемию. Он ухудшает симптомы астмы (Реброва, Сергеева, Асатиани, 2023) и вызывает заболевания дыхательных путей. Даже некоторые исследования связывают смертность от NO_x с сердечно-сосудистыми заболеваниями (Carey и др., 2013) и диабетом. Однако до сих пор неясно, как NO_x определяет все эти эффекты, поскольку он также может быть триггером для других

загрязняющих веществ. В Таблице 1 обобщены современные знания о влиянии показателей загрязнения воздуха на здоровье человека.

1.5.4 Призёмный озон (O_3)

Озон — это элементарная молекула, образованная тремя атомами кислорода. Он выглядит как бесцветный или голубоватый газ, который конденсируется в темно-синюю жидкость или сине-черные кристаллы (Dionisio и др., 2018). Тропосферный (или призёмный) O_3 представляет собой вторичный загрязнитель, образующийся в результате химических реакций под действием солнечного света между газами-предшественниками озона: химической реакции угарного газа между оксидами азота и ЛОС. В отличие от стратосферного озона, призёмный озон считается «плохим озоном» из-за его воздействия на здоровье и состояние человека.

Количество озона в атмосфере постоянно меняется в зависимости от сезона и широты, его временные вариации и вертикальное распределение являются важными исходными данными для исследований морфологии и поведения атмосферного озона в различных частях земного шара (Ganguly и др., 2006). Основным источником тропосферного озона являются фотохимические реакции с участием ЛОС, СО и NO_x , а также гидроксильных радикалов, которые являются ключевыми атмосферными окислителями (Котельников, 2015). Однако существует естественный приток озона из стратосферы в тропосферу, пик которого обычно приходится на весенние месяцы (в северном полушарии) и этот приток в значительной степени способствует фоновым уровням приземного озона. Наиболее антропогенными являются выработка энергии, автомобильный транспорт, сельское хозяйство, промышленные процессы, сжигание биомассы и др. (Royal Society, 2008).

Время пребывания атмосферного озона колеблется от нескольких недель до нескольких месяцев, в зависимости от высоты над уровнем моря, географического положения и времени года (Stordal и др., 2003). Такое время жизни озона

благоприятствует его переносу в атмосфере вплоть до уровня полушария. Современные среднегодовые фоновые концентрации озона в средних широтах Северного полушария колеблются примерно в пределах 20–45 частей на миллиард, причём изменчивость зависит от географического положения, высоты и степени антропогенного воздействия. Приземный озон может влиять на здоровье человека, его общее состояние, растительность и материалы (Stevens и др., 2020). Вредное воздействие озона на здоровье человека варьируется от незначительного воздействия на лёгочную ткань до респираторных симптомов и обострения существующих заболеваний, таких как астма или хронические обструктивные заболевания лёгких, достаточных для госпитализации или смерти. Наиболее убедительные доказательства того, что O_3 может вызывать хронические эффекты, вызывая необратимое повреждение лёгких (Royal Society, 2008). Кроме того, воздействие озона связано с различными респираторными симптомами, включая одышку, раздражение верхних дыхательных путей, кашель и чувство стеснения в груди (Chen и др., 2007a).

1.5.5 Твёрдые частицы (ТЧ)

Атмосферные твёрдые частицы, также известные как атмосферные аэрозоли, состоят из мелких частиц твёрдых веществ и жидкостей, взвешенных в атмосфере. Они образуются из природных источников, таких как переносимая ветром пыль, морские брызги, вулканы и антропогенная деятельность, например, при сжигании топлива. Твёрдые частицы в атмосферу могут выбрасываться непосредственно из антропогенных источников или образовываться в атмосфере в результате процессов преобразования газа в частицы. Твёрдыми частицами часто называют частицы диаметром от нескольких нанометров до десятков микрометров. Наиболее известными среди них являются частицы диаметром менее или равные 1 мкм (известные как $ТЧ_1$), частицы диаметром менее или равные 2,5 мкм ($ТЧ_{2,5}$) и частицы диаметром менее или равные 10 мкм ($ТЧ_{10}$). Об этом свидетельствует

негативное воздействие на здоровье человека: ТЧ₁ и ТЧ_{2,5} очень опасны из-за их способности проникать в нижние дыхательные пути.

Поступая из разных источников, атмосферные ТЧ имеют разные химические и физические свойства, которые требуют детальных аналитических измерений для полного описания (Ault, Axson, 2017). В атмосфере они рассеивают и поглощают солнечную радиацию, нарушая тем самым радиационные процессы биосферы. Значительная часть тропосферного аэрозоля имеет антропогенное происхождение и содержит сульфаты, аммоний, нитрит натрия, хлориды, микроэлементы, углеродистый материал, элементы коры и воду (Seinfeld, Pandis, 2016). В зависимости от их источников, размера и преобладающих метеорологических условий, время их существования в атмосфере варьируется от нескольких дней до нескольких недель, процессы удаления заключаются в сухом или влажном осаждении на поверхность Земли.

Твёрдые частицы попадают в организм человека через ингаляцию, кожную абсорбцию, инъекции и проглатывание. Ингаляция и кожная абсорбция часто признаются в качестве основных путей воздействия (Thompson, 2018). Присутствие твёрдых частиц представляет большую опасность для здоровья человека, чем приземный озон и другие распространённые загрязнители воздуха. Токсичность твёрдых частиц обусловлена не только физическим присутствием частиц в биологических тканях, но и токсическим воздействием химических компонентов твёрдых частиц, таких как гигроскопичные неорганические электролиты, полициклические ароматические углеводороды, полихлорированные дифенилы, элементарный углерод (сажа), материалы земной коры и металлы 189]. Воздействие твёрдых частиц приводит к различным проблемам со здоровьем, включая преждевременную смерть людей с заболеваниями лёгких, сердечные приступы, нерегулярное сердцебиение, обострение астмы, снижение функции лёгких и усиление респираторных симптомов, таких как, раздражение дыхательных путей, кашель или затруднённое дыхание (Kim, Kabir, Kabir, 2015).

1.5.6 Тяжёлые металлы (ТМ)

Тяжёлые металлы определяются по-разному в зависимости от указанного свойства для их классификации. Определяющие свойства включают атомный номер, атомный вес, токсичность и плотность. Основными металлами и/или металлоидами с точки зрения экологических исследований, основанных на их токсичности и биологической значимости, являются хром (Cr), свинец (Pb), ртуть (Hg), кадмий (Cd), мышьяк (As), медь (Cu), марганец (Mn), никель (Ni), цинк (Zn) и серебро (Ag) (Теплая, 2013). Выбросы тяжёлых металлов в окружающую среду происходят через широкий спектр процессов и путей, включая выбросы в атмосферу в результате процессов сжигания, добычи и переработки или сброс в поверхностные воды через сток и выбросы при хранении и транспортировке (Jägar, 2003).

Тяжёлые металлы необходимы для поддержания различных биохимических и физиологических функций в живых организмах, когда они находятся в допустимых концентрациях для этих организмов, однако они становятся вредными, когда превышают определённые пороговые концентрации (Jaishankar и др., 2014). Международное Агентство по Исследованию Рака (International Agency for Research on Cancer, IARC) классифицировало тяжёлые металлы на три категории в зависимости от канцерогенности этих металлов для человека. В первую группу тяжёлых металлов входят металлы и металлоиды, которые являются доказанными канцерогенами для человека. Вторая группа состоит из соединений, которые вероятно или возможно являются канцерогенами. Последняя группа (группа 3) содержит соединения, не являющиеся канцерогенами для человека. As, Cd, Cr и Ni — некоторые тяжёлые металлы, включённые IARC в группу 1. Твёрдые частицы обладают сильным потенциалом поглощения тяжёлых металлов и являются одним из переносчиков тяжёлых металлов в организм человека. Учёные продолжают исследования по установлению наличия и поведения тяжёлых металлов в атмосферных аэрозолях (Li, Qian, Wang, 2013).

1.6 Заключение первой главы

В данной главе проведен обзор литературы о загрязнении воздуха и влиянии на здоровье человека в регионе Восточной Африки с целью определения его текущей ситуации и выявления пробелов в существующей литературе.

Проблема загрязнения воздуха в Восточной Африке является весьма актуальной, и в большинстве исследований сообщается о концентрациях $\text{ТЧ}_{2,5}$ и O_3 , превышающих рекомендации ВОЗ в большинстве стран.

Основной причиной ухудшения состояния окружающей среды является, в частности, непропорциональная урбанизация по сравнению с существующей инфраструктурой, использование традиционных источников энергии для отопления жилых помещений и приготовления пищи, а также практика подсечно-огневого земледелия для подготовки земли.

В дополнение к полному описанию критериев загрязняющих веществ и их влияния на здоровье человека особое внимание уделено отдельно каждой из пяти исследуемых стран. К числу общих проблем, с которыми сталкиваются страны Восточной Африки, относятся практически полное отсутствие и/или неадекватность сети мониторинга на всей их территории.

Отсутствие данных о качестве воздуха приводит к слепым научным исследованиям с использованием неколичественных опросов и в большей степени, к использованию устаревших, некалиброванных недорогих датчиков. Необходимо наращивать потенциал для проведения исследований по оценке загрязнения воздуха, искать и находить пути и решения по снижению вредных веществ в воздухе до уровней, установленных ВОЗ.

Глава 2 Материал и методы исследования

2.1 Описание территории исследования

Наш анализ посвящён пяти странам Восточно-Африканского региона (Бурунди, Кения, Объединённая Республика Танзания, Руанда и Уганда). На Рисунке 2 показано географическое положение исследуемой территории. Выбор этих стран был обусловлен не только их компактным расположением, в них проживает население со схожими антропологическими, культурными и генетическими характеристиками, они имеют сопоставимые источники загрязнения воздуха, что делает его исключительными для данного типа экологического исследования. Тем не менее, тот факт, что эти страны входят в число активных членов Восточно-Африканского Сообщества (East African Community, ЕАС), может стать дополнительным преимуществом для реализации рекомендаций, полученных в результате исследований, путём объединения усилий в борьбе с проблемами загрязнения воздуха. В 2023 году во всех этих странах проживало около 184 926 876 человек на площади 1 823 390 км² (UN Statistics Division, 2025).

Уникальный рельеф и разнообразные климатические условия региона влияют на растительность, биоразнообразие и деятельность человека. Сезонность осадков здесь сложна и меняется в пределах нескольких километров. Несмотря на это, межгодовые колебания однородны и определяются одними и теми же факторами. Годовой цикл бимодальный, с основным сезоном дождей в марте-мае и «короткими дождями» в октябре-ноябре. Колебания количества осадков тесно связаны с явлением Эль-Ниньо-Южное Колебание (ЭНЮК), (El Niño-Southern Oscillation, ENSO), при котором в годы ЭНЮК количество осадков превышает средний уровень. Сезонный сдвиг внутритропической зоны конвергенции и её замена сильными меридиональными ветрами на малых высотах объясняют малое количество осадков.



Рисунок 2 – Географическое положение территории исследования

На климат региона также сильно влияет диполь Индийского океана (Marchant и др., 2007). Как обсуждалось ранее, основные антропогенные источники загрязнения воздуха в регионе включают сжигание биомассы для подготовки сельскохозяйственных земель, а также приготовления пищи и отопления в сельской местности. В то время как промышленность и выбросы от дорожного движения являются основными источниками загрязнения воздуха в городских районах.

2.2 Источники данных

2.2.1 Источники выбросов загрязнителей воздуха в Восточной Африке

Потенциальные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу были оценены и смоделированы с использованием пакета программ NEMCO (Harmonized Emissions Component). NEMCO – это программный продукт для расчёта выбросов в атмосферу из разных источников, регионов и видов по определяемой

пользователем сетке (Keller и др., 2014; Lin и др., 2021). С помощью этой программы можно комбинировать, накладывать и обновлять наборы кадастров данных на основе выбросов и масштабных коэффициентов. Чтобы адаптировать модель NEMCO для региона Восточной Африки, антропогенные выбросы были рассчитаны на основе данных DICE-Africa (Diffuse and Inefficient Combustion Emissions in Africa), которые представляют собой реестр выбросов, разработанный Элоизой и Кристиной (Marais, Wiedinmyer, 2016), что используется для заполнения пробелов, связанных с отсутствием подробного реестра антропогенных диффузных и неэффективных источников горения в Африке. Антропогенные выбросы, отсутствующие в базе данных DICE-Africa, были заполнены с использованием базы данных EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) (European Commission, 2024). EDGAR – это многоцелевая независимая глобальная база данных антропогенных выбросов парниковых газов и загрязнения воздуха. Ее продукты представляют собой независимые оценки выбросов по методологии Межправительственная Группа экспертов по изменению климата (МГЭИК), (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) и сравниваются с данными о выбросах европейских государств-членов и сторон рамочной конвенции Организации Объединённых Наций об изменении климата (РКИК ООН), (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC). Выбросы от сжигания биомассы были получены из GFAS (Global Fire Assimilation System) (Copernicus, 2022). GFAS ассимилирует данные наблюдений за радиационной мощностью пожара со спутниковых датчиков для получения ежедневных оценок выбросов от лесных пожаров и сжигания биомассы. Выбросы вулканов были собраны «NASA Global Modeling and Assimilation Office, GMAO», Управлением глобального моделирования и ассимиляции НАСА (Steven Pawson, 2024). Выбросы самолётов были оценены на основе регламентов AEIC2019, (Aircraft Emissions Inventory Code, AEIC), (Регламента инвентаризации выбросов самолётов). Инвентаризация AEIC даёт оценку общего расхода топлива, пройденного расстояния и выбросов загрязняющих веществ, связанных с посадкой и взлётом и полётами, не

связанными с посадкой и взлётом, включая крейсерскую скорость. Полёты авиатехники моделируются на основе данных расписания из официального авиационного справочника самолётов OAG (Official Aviation Guide of Airways) (Eastham, Fritz, 2019). Кроме того, данные о выбросах с судов были получены из CEDS, (Community Emissions Data Systems), из реестра системы данных о выбросах сообщества (Hoesly и др., 2018). Помимо оценки выбросов с использованием модели HEMCO, мы проанализировали источники и тенденцию антропогенных выбросов из набора данных пакета EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) за период с 1998 по 2022 год. EDGAR используется в качестве эталонного кадастра антропогенных выбросов, предоставляя исторические данные временных рядов выбросов SO_2 ; NO ; CO ; общее количество неметановых летучих органических соединений (НМЛОС), NH_3 , TC_{10} ; $\text{TC}_{2,5}$; черный углерод, органический углерод. Кроме того, метеорологические данные, данные о землепользовании и характеристиках были получены из базы данных MERRA-2, (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2). MERRA-2 – это комплексный набор данных атмосферного реанализа, разработанный Управлением глобального моделирования и ассимиляции (GMAO) NASA. Он призван обеспечить последовательную и подробную запись атмосферы Земли с 1980 года с использованием комбинации спутниковых наблюдений и современных климатических моделей (Gelaro и др., 2017).

2.2.2 Уровень загрязнения воздуха

Мониторинг качества воздуха на уровне земли в регионе практически отсутствует или не отражает репрезентативный национальный профиль (Abera и др., 2021). Именно с этой целью были использованы данные спутниковых наблюдений и моделирования для оценки состояния качества воздуха в регионе. Проведен анализ уровня концентрации диоксида азота (NO_2), оксида углерода (CO) и диоксида серы (SO_2) за десять лет (2013–2022 гг.), а также поверхностного загрязнения мелкими частицами ($\text{TC}_{2,5}$). Показатели по NO_2 , были взяты из базы данных OMI, (Ozone Monitoring Instrument), системы, установленной на борту

спутника «Aura», по сканированию заданных участков поверхности Земли с высочайшим на сегодня разрешением – $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.

Кроме того, были проанализированы ежедневные отчеты базы данных EARTHDATA по NO_2 для всех атмосферных условий состояния неба и доли облаков менее 30%. Для SO_2 была выбрана усреднённая площадь массовой концентрации SO_2 на поверхности ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) из MERRA-2. По такому же алгоритму определялась поверхностная концентрация CO. Для анализа использовались данные GIOVANNI (Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure) (Liu, Acker, 2017), за исключением приземных концентраций $\text{TC}_{2,5}$, полученных от компании ACAG (Atmospheric Composition Analysis Group). ACAG работает на базе университета Вашингтона в Сент-Луисе и использует информацию от спутников, источников моделирования и мониторинга для оценки глобальных и региональных приземных концентраций $\text{TC}_{2,5}$ с очень высоким пространственным разрешением (вплоть до $0,01^\circ \times 0,01^\circ$). Данные по $\text{TC}_{2,5}$ из ACAG показывают хорошую корреляцию ($R^2 = 0.90 - 0.92$) с данными наземного мониторинга $\text{TC}_{2,5}$ (Donkelaar Van и др., 2021), что позволяет с высокой степенью достоверности использовать эти данные для анализа загрязнения почвы. В качестве альтернативы данным наземного мониторинга $\text{TC}_{2,5}$ были получены данные в рамках проекта «AirQo» (AirQo, 2022) для всех стран (измерения проводились в соответствующих крупных городах каждой страны), за исключением Танзании, где AirQo не ведёт мониторинговую корреспонденцию. На рисунке 3 показаны точки мониторинга, использованные в данном исследовании в каждом городе.

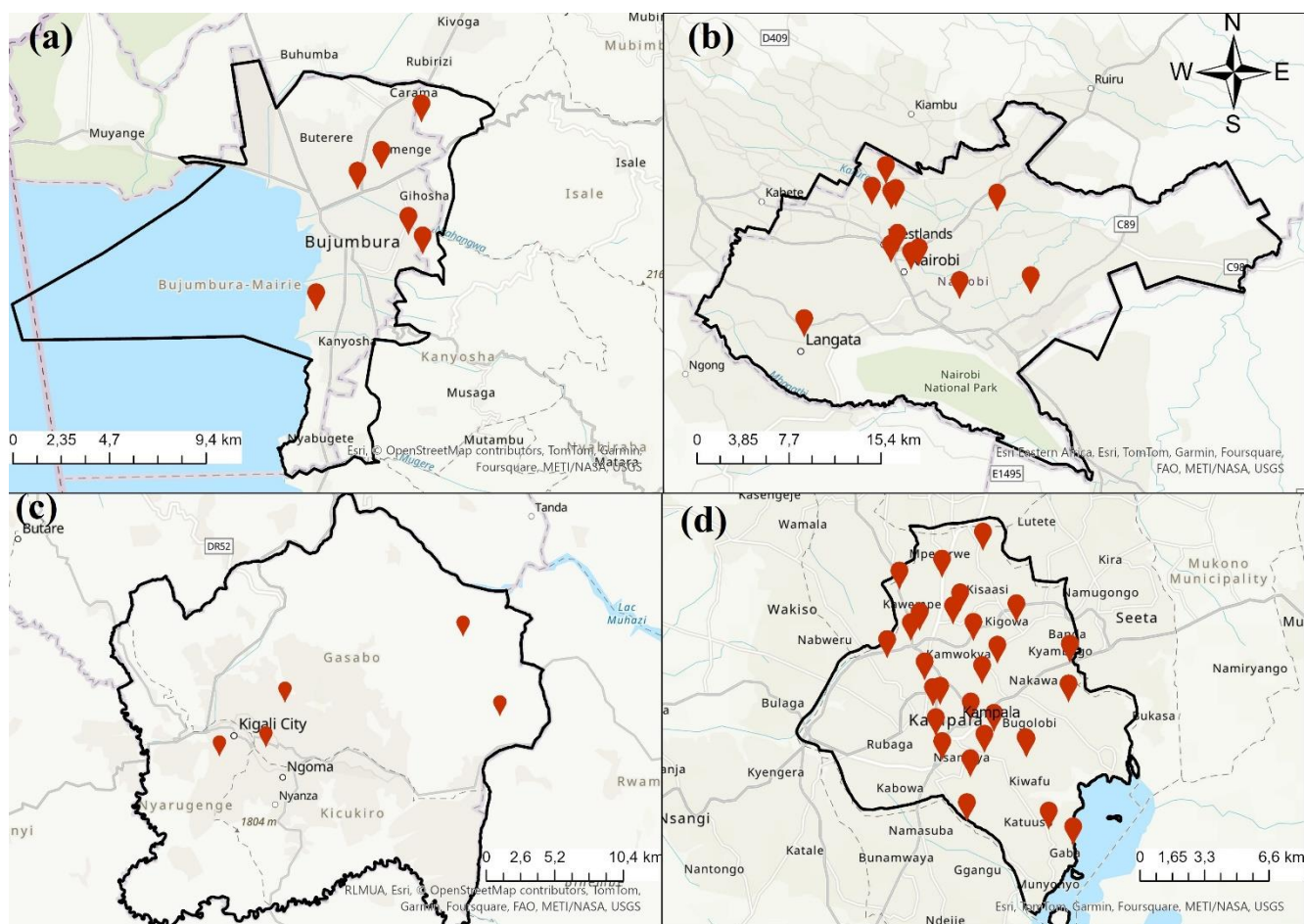


Рисунок 3 – Объекты мониторинга, используемые для оценки уровня загрязнения воздуха в городах Восточной Африки. (а) Бужумбура, (б) Найроби, (с) Кигали, и (д) Кампала

AirQo – основана в 2015 году в УниверситетеMakerере (Уганда), проводит мониторинг качества воздуха по всей Африке, обрабатывает данные и распространяет среди зарегистрированных участников.

2.2.3 Вред для здоровья, связанный с загрязнением воздуха

Для оценки вреда для здоровья, связанного с загрязнением воздуха, были обработаны и проанализированы данные, полученные из достоверных и аккредитованных источников. Используя данные исследования GBD, (Global Burden of Disease), мы проанализировали воздействие воздуха на здоровье в регионе Восточной Африки. Данные по этим странам за период с 1992 по 2021 год, касающиеся общей смертности, потерянных годы жизни (Years of life lost, YLLs) и

годы жизни с поправкой на инвалидность (Disability-Adjusted Life Years, DALYs), связанных с загрязнением воздуха, для всех возрастов и полов, были собраны в рамках исследования GBD с использованием инструмента глобального обмена данными о здравоохранении (Global Health Data Exchange, GHDX) (Abbafati и др., 2020), а также Института измерения показателей и оценки состояния здоровья (Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME), расположенного в Университете Вашингтона, являющимся независимой исследовательской организацией в области популяционного здоровья, которая сотрудничает с партнёрами по всему миру для получения своевременных, актуальных и научно обоснованных данных, проливающих свет на ситуацию в области глобального здравоохранения. Программа GBD — одна из самых масштабных и тщательных работ IHME по измерению потери здоровья человека во всем мире. Мы сосредоточили внимание на отдельных данных оценок заболеваемости и смертности, связанных с ишемической болезнью сердца (ИБС); инсульт; Хроническая обструктивная болезнь лёгких (ХОБЛ), рак трахеи, бронхов и лёгких (РТБЛ); Инфекция нижних дыхательных путей (ИНДП); и сахарный диабет 2 типа (СД2).

Данные GBD также использовались для оценки роли воздействия загрязнения воздуха и других факторов экологического стресса на сокращение ожидаемой продолжительности жизни при рождении в регионе. Для оценки взаимозависимости факторов в снижении ожидаемой продолжительности жизни мы собрали показатели мирового развития из репозитория Всемирного банка (ГВБ) (World Bank, 2024) и взвешенное по численности населения загрязнение твёрдыми частицами от ACAG (Donkelaar Van и др., 2021). Описание ACAG было сделано в разделе 2.2.2.

Растительный покров оценивался с помощью расширенного индекса растительности (Enhance Vegetation Index, EVI). В зависимости от типа анализируемой поверхности и цели этого анализа вегетационные индексы подразделяются на индексы. Наиболее используемыми вегетационными индексами являются NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и EVI. NDVI –

это вегетационный индекс, определяющий наличие растительной массы на определённом участке земной поверхности (Макаров, 2023). NDVI описывает взаимосвязь между красным и ближним инфракрасным диапазонами спектра, которые отражает поверхность Земли, при измерении плотности растительности. NDVI рассчитывается по следующей формуле (уравнения (2)):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Где NIR — это ближняя область инфракрасной области спектра, а RED — красная область спектра.

Улучшая показатели NDVI, EVI — это индекс растительности, который используется для оценки здоровья и плотности растительности. EVI учитывает влияние атмосферной коррекции, которая удаляет атмосферные частицы и повышает точность оценок густоты растительности. EVI рассчитывается с использованием данных в трех световых диапазонах длин волн: красном (RED), ближнем инфракрасном (NIR) и синем (BLUE). Формула расчёта EVI выглядит следующим образом (уравнения (3)):

$$EVI = 2,5 \times \frac{NIR - RED}{NIR + 6 \times RED - 7,5 \times BLUE + 1} \quad (2)$$

Как NDVI, так и EVI могут находиться в диапазоне от -1 до 1. Значения, близкие к -1, указывают на отсутствие растительности, 0 указывает на отсутствие растительности, а значения ближе к 1 указывают на высокую плотность растительности (Макаров, 2023).

Данные EVI получены с помощью спектрорадиометра с формированием изображений умеренного разрешения MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) спутника дистанционного зондирования окружающей среды Terra (Didan, 2021). Данные индексы растительности Terra/MODIS (MODIS13A3) Версия 6.1 предоставляются ежемесячно с пространственным разрешением 1 км в виде сетки уровня 3 в синусоидальной проекции. Индекс вегетации с

нормализованными различиями NDVI является чувствительным к хлорофиллу, а EVI более чувствителен к структурным изменениям кроны и сохраняет чувствительность в условиях густой растительности (Didan, 2021). Поскольку исследуемый регион характеризуется уникальным рельефом и разнообразными климатическими условиями, которые влияют на растительность, биоразнообразие и деятельность человека (Nicholson, 2019), мы предпочли использовать EVI, а не NDVI в нашем анализе.

В дополнение к данным по угарному газу из MERRA-2, описанным в разделе 2.2.2, при оценке взаимосвязи между загрязнением воздуха, состоянием поверхностной растительности и распространённостью инсульта, мы также использовали трёхмерные среднемесячные данные O_3 (M2IMNPASM v5.12.4), которые состоят из 42 уровня давления (Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), 2015a). Мы выбрали уровень давления 500 ГПа, поскольку он наилучшим образом отражает значение поверхности Восточно-Африканского региона, так как высота рельефа варьируется от 0 до 5895 м над уровнем моря, а температура - от 5°C до 35°C (Kebacho, 2022). Мы использовали общую массовую концентрацию $TC_{2,5}$ (M2TMNXAER v5.12.4), которая представляет собой комбинацию пяти видов аэрозоля, включая черный углерод, пыль, органический углерод, морскую соль и сульфат (Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), 2015b). Общая концентрация $TC_{2,5}$ на поверхности оценивается на основе сульфата (SO_4), органического углерода (OC), черного углерода (BC), пыли (DS) и морской соли (SS) с использованием уравнения (1) (Provençal и др., 2017).

$$[TC_{2,5}] = 1,375 \times [SO_4] + 1,18 \times [OC] + [BC] + [DS_{2,5}] + [SS_{2,5}] \quad (3)$$

Все независимые переменные были получены из MERRA-2 с использованием инструмента данных GIOVANNI. GIOVANNI – это веб-приложение центра распределенных активных архивов (Distributed Active Archive Center, DAAC) и центра данных и информационных служб имени Годдарда по науке о Земле НАСА (NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services

Center, GES DISC), которое обеспечивает простой и интуитивно понятный способ визуализации, анализа и доступа к данным наблюдения за поверхностью Земли со спутников (Wang, Ma, Smith, 2024).

2.3 Методологии анализа данных

Моделирование потенциальных выбросов загрязнителей воздуха в регионе было выполнено с использованием автономной модели НЕМСО. Полное описание и настройка модели НЕМСО приведены в разделе 2.2.1. Анализ источников выбросов проводился путём определения центральной описательной статистической тенденции, для оценки временной изменчивости оценивались месячные и сезонные выбросы в регионе Экваториальной Восточной Африки. Анализ статистических тенденций для непараметрического семейства проводился с использованием теста тренда Манна-Кендалла с помощью пакета программирования на Питон. Уровень загрязнения воздуха оценивался путём усреднения ежедневных проб к среднемесячным и годовым значениям в соответствии с необходимым анализом.

Последствия загрязнения воздуха для здоровья оценивались с помощью многоуровневой логистической регрессии для учёта иерархической структуры эффектов. Мы также построили мультилинейную регрессию и модель GMM (Generalized Method of Moments) для оценки последствий воздействия загрязнения воздуха на здоровье человека. Кроме того, роль загрязнения воздуха в сокращении продолжительности жизни среди других экологических и поведенческих переменных оценивалась путём построения стандартных таблиц жизни с учётом сценария, когда не происходит устранения причинного агента (сценарий «бизнес как обычно»), а также с учётом снижения смертности, вызванной этими факторами. В связи с возможной взаимообусловленностью переменных причин смерти мы использовали моделирование с помощью анализа путей для проверки и количественного определения направления эффектов, а также причинно-следственных зависимостей между переменными, определяющими продолжительность жизни. Наконец, связь между загрязнением воздуха и уровнем

смертности взрослого населения в регионе была смоделирована с использованием GMM (Li и др., 2022). Статистический анализ и модели были выполнены с использованием программного обеспечения Питон, R (версия 4.3.1), ArcGIS Pro и CDO (Climate Data Operators) в дополнение к Microsoft Excel. Концептуальное использование каждого подхода к анализу и моделированию описано в соответствующих разделах.

2.4 Заключение второй главы

В этой главе были представлены источники данных и основные методологии исследования, использованные в данном исследовании. Наше исследование сосредоточено на пяти странах региона Восточной Африки. Регион с уникальным рельефом местности и разнообразным климатом, на который влияют растительность, биоразнообразие и занятость человека.

Оценка выбросов в атмосферу проводилась с использованием модели HEMCO. Чтобы настроить модель, мы получили данные из различных кадастров выбросов, включая DICE–Africa, GFAS, HACA GMAO, AEIC, CEDS и EDGAR. Уровни загрязнения воздуха были в основном проанализированы с использованием данных повторного реанализа MERRA-2 для данных дистанционного зондирования и проекта AirQo для наборов данных наземного мониторинга. Мы также получили информацию о загрязнении воздуха от местных государственных агентств по охране окружающей среды. Данные о показателях, связанных со здоровьем, были собраны из наборов данных ВОЗ, ГВБ и IHME.

Анализ выбросов был проведен путём определения центральных описательных статистических тенденций и оценки их пространственной и временной изменчивости. Сопутствующее воздействие загрязнения воздуха на здоровье человека оценивалось с использованием модели многолинейной и многоуровневой логистической регрессии. Модель линейной регрессии также использовалась для оценки взаимосвязи между загрязнением воздуха и поверхностным растительным покровом, поскольку они влияют на наблюдаемые показатели смертности, связанной с инсультом, в регионе. Кроме того, роль

загрязнения воздуха в сокращении ожидаемой продолжительности жизни среди других экологических и поведенческих переменных была оценена путём построения стандартных и причинно-устраняемых таблиц жизни. Взаимосвязь между загрязнением воздуха и уровнем смертности среди взрослого населения была смоделирована с использованием общих методов на основе моделирования моментов.

Глава 3 Оценка техногенных и антропогенных факторов и структуры загрязнения воздуха в их развитии

3.1 Выбросы загрязнения воздуха в регионе Центрально-Восточной Африки

Инвентаризация выбросов должна быть первым шагом в любом мониторинге загрязнения воздуха и оценке воздействия. Однако эта практика отсутствует в странах с низким уровнем дохода, особенно в странах Африки к югу от Сахары, из-за нехватки финансовых ресурсов и активов. В этом разделе оцениваются выбросы загрязнения воздуха в странах Центральной и Восточной Африки с использованием модели NEMCO и базы данных EDGAR. Полное описание модели NEMCO и данных используемых для моделирования выбросов, описано в разделе 2.2.1. Моделирование NEMCO было выполнено в области сетки, содержащей прямоугольник между 10,0° в.д., 45,0° в.д и 16,0° ю.ш., 10,0° с.ш, как показано на рисунке 4.

По данным различных исследований, африканские страны переживают быстрый экономический и демографический рост, сопровождающийся стремительной урбанизацией, промышленной революцией и трансформацией (Amegah, Agyei-Mensah, 2017; Fisher и др., 2021). Тем не менее, этот рост не сопровождается поддерживающей инфраструктурой и приводит к быстрому ухудшению состояния окружающей среды (deSouza, 2020). Ухудшение состояния окружающей среды в африканских городах также связано с отсутствием эффективного согласия и действий между учеными, неправительственными организациями и политиками в установлении стандартов качества воздуха и политики на континенте (Andres и др., 2022; Singh и др., 2021).

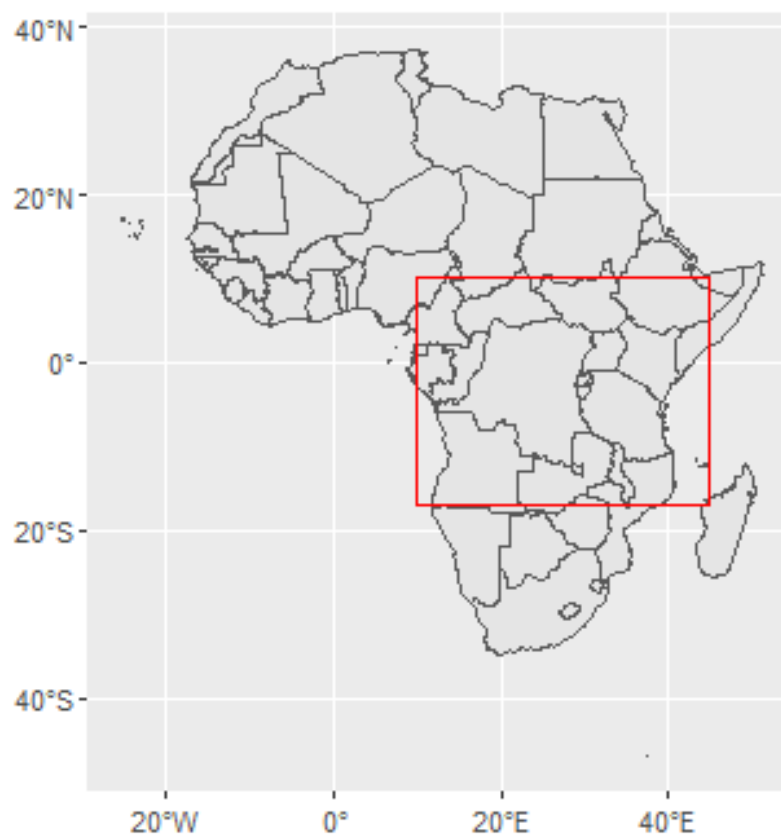


Рисунок 4 – Область ассимиляции НЕМСО (внутри красного прямоугольника)

Помимо проблемы отсутствия сети мониторинга загрязнения воздуха, страны Африки к югу от Сахары характеризуются отсутствием адекватных кадастров выбросов и недостаточным потенциалом для обеспечения соблюдения политики, правил и стандартов управления загрязнением воздуха (Singh и др., 2021). Кроме того, основным источником бытовой энергии для отопления, освещения и приготовления пищи в африканских общинах остаётся традиционное сжигание биомассы, при этом, по оценкам, 75% африканского населения используют уголь, древесину, навоз и древесный уголь для приготовления пищи (Health Effects Institute, 2022). На всем континенте ископаемое топливо лидирует в производстве электроэнергии, на его долю приходится более 80% общего объёма энергоснабжения (Wang, 2018). Растущий спрос на энергию, концентрация городского населения и постоянное отсутствие доступа к энергии способствуют резкому увеличению загрязнения воздуха как в помещениях, так и на открытом воздухе.

3.1.1 Пространственная изменчивость выбросов загрязнителей воздуха

Мы смоделировали и проанализировали выбросы для регионов Центральной и Восточной Африки. Общий поток выбросов, смоделированный NEMCO (в $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$) SO_2 , CO, NO и твёрдых частиц (пыли), представлен на рисунке 5.

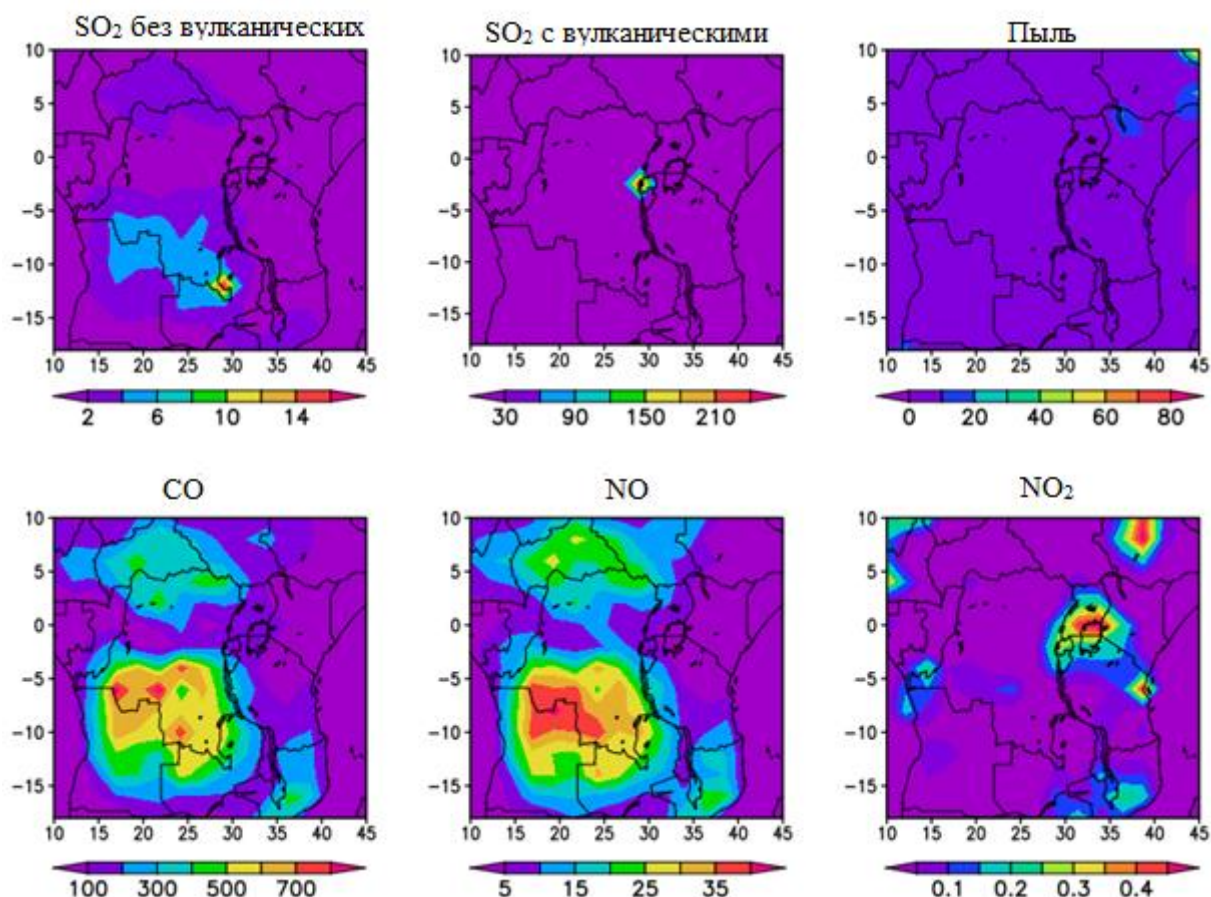


Рисунок 5 – Пространственные изменения выбросов загрязнения воздуха в странах Экваториальной Восточной Африки в 2022 году (цветные полосы указаны в $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$)

В частности, выбросы SO_2 были оценены сначала путём удаления вулканических источников, а затем путём их включения в конфигурацию модели. В экваториальной Восточной Африке, вулкан Ньирагонго в восточной части Демократической Республики Конго, является основным источником выбросов SO_2 , как наблюдали Опио и др. (2021) в своих исследованиях тенденции выбросов SO_2 в Восточно-Африканском регионе (Opiyo, Mugume, Nakatumba-Nabende, 2021).

Годовые выбросы CO, SO₂ и NO выше в двух симметричных частях экватора (север-юг), причём южные выбросы значительно превышают северные. На рисунке 5, две области в которых доминируют выбросы загрязняющих веществ, характеризуются интенсивными пожарами биомассы и лесных пожаров (Mammimo, 2020; Wu и др., 2022). Помимо сжигания биомассы, молния также является потенциальным источником NO в регионе. Научно доказано, что молния способствует образованию NO, обеспечивая высокотемпературную среду (более 1300 °C), окисляющую атмосферный N₂ или O₂ для дальнейшего образования NO посредством «механизма Зельдовича» как показано в химических реакциях, выраженных в уравнениях (4)-(6) (Miller и др., 1998; Иванов и др., 2014).



Выбросы NO₂ максимальны на юго-востоке Уганды и центральной части Эфиопии. Улучшение социально-экономического развития в исследуемом регионе является одной из причин наблюдаемых низких выбросов NO₂ при сжигании биомассы (Berrick и др., 2009). Количественная оценка выбросов проводилась путём суммирования общих годовых выбросов для каждого вида. Кроме того, мы использовали возможности НЕМСО для разделения секторов-выбросов и выявили наиболее влиятельные секторы для всего 2022 года, как представлено в Таблице 4. Следует отметить, что источники выбросов, представленные в таблице 4, относятся к наиболее влиятельным секторам.

Антропогенные выбросы включают выбросы от автомобилей, мотоциклов, самолётов, международных перевозок, производства и использования древесного угля, резервных генераторов, сжигание сельскохозяйственных отходов для приготовления пищи, газовые факелы, специальной/неформальной переработки

нефти и использования энергии. В то время как выбросы от сжигания биомассы состоят из лесных пожаров и выбросов от открытого сжигания биомассы.

Таблица 4 – Выбросы по секторам и загрязняющим веществам за 2022 год (в гигаграммах видов)

Источник	SO ₂	CO	NO ₂	NO	Пыль
Морской транспорт	193,90	6,86	-	2007,56	-
Вулканический	1351,05	236,87	-	-	616,86
Молния	-	-	-	2136,36	-
Натуральный	-	-	-	-	11192,83
Сжигание биомассы	816,65	119466,71	-	6560,75	158,27
Антропогенный	297,44	9596,79	6,27	69,00	369,30
Самолёт	4,13	12,65	8,59	35,28	-

Сжигание биомассы является основным источником выбросов CO и NO, тогда как вулканические источники доминируют в выбросах SO₂. Вулканическая область простирается между Демократической Республикой Конго, Руандой и Угандой и является активным источником выбросов SO₂ с несколькими действующими вулканами.

3.1.2 Сезонная изменчивость выбросов загрязнителей воздуха

Сезонная изменчивость выбросов каждого загрязняющего вещества представлена на рисунке 6. В период декабрь-январь-февраль (ДЯФ) выбросы в основном происходят из верхней части экватора (Центрально-Африканская Республика и Южный Судан). Выбросы смещаются в южную часть экватора (Ангола, Замбия и Демократическая Республика Конго) в течение июня-июля-августа (ИИА). Такое поведение связано с влажностью и засушливостью региона (Alahacoon и др., 2022). В период ДЯФ солнце находится над южной частью Африки, что оставляет северную часть очень сухой из-за отсутствия конвекции и, следовательно, осадков. Сухость приводит к сжиганию биомассы в региональном

масштабе в результате природных лесных пожаров и пожаров, вызванных фермерами при подготовке сельскохозяйственных земель. Аналогично, в период ИИА, солнце в северной части Африки, затем в южной части становится очень сухим и происходит сжигание биомассы.

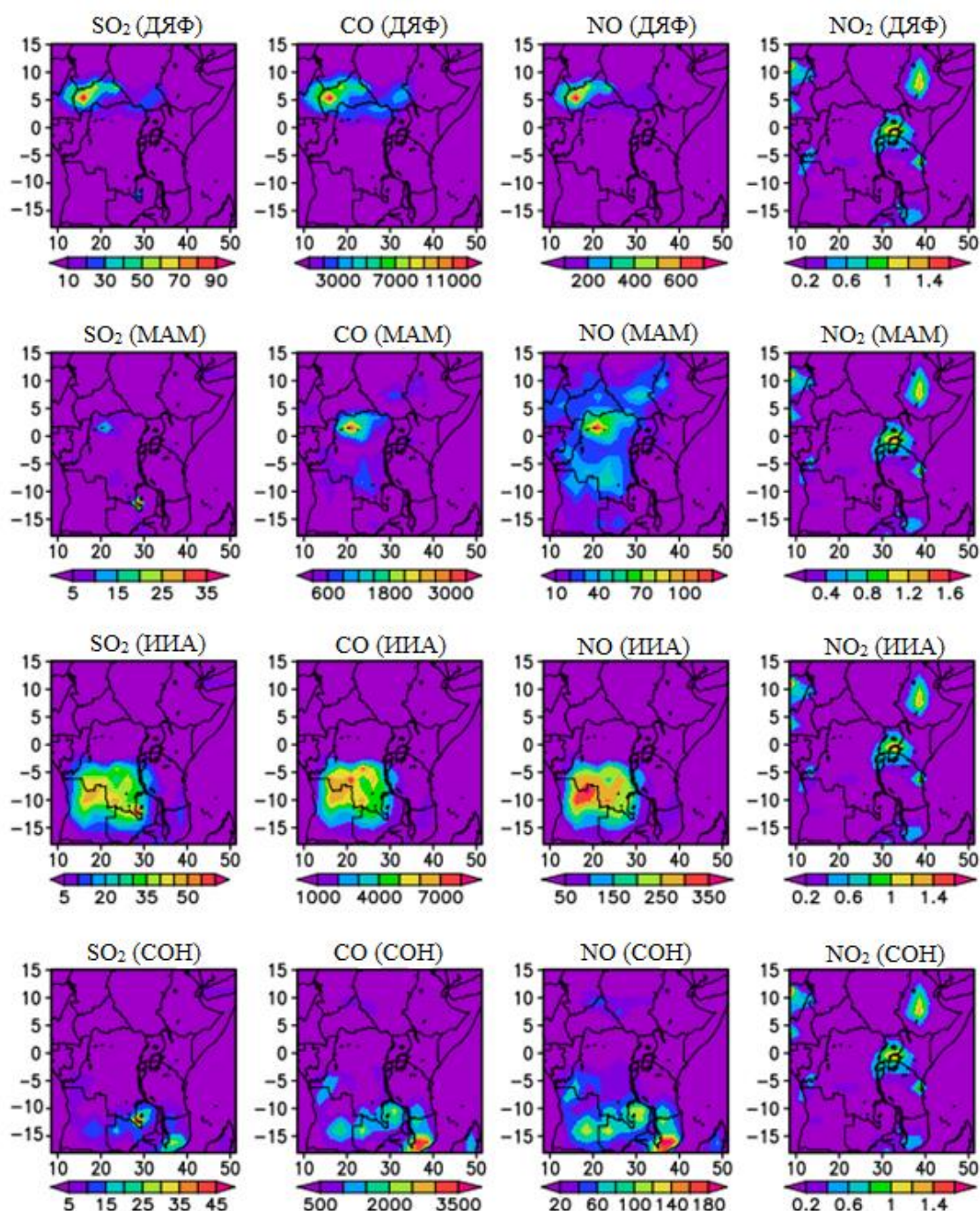


Рисунок 6 – Усреднённые сезонные выбросы CO, SO_2 , NO и NO_2 за 2022 год ($\mu\text{г}/\text{м}^3/\text{с}$). ДЯФ означает Декабрь-Январь-Февраль; МАМ: Март-Апрель-Май; ИИА: Июнь-Июль-Август, и СОН: Сентябрь-Октябрь-Ноябрь

В регионе более высокая интенсивность осадков концентрируется на экваторе в марте-апреле-мае (МАМ), смещаясь в северную часть экваториального региона вовремя ИИА, а затем в южную часть в течение декабря-января-февраля (ДЯФ). Сжигание биомассы является наиболее динамичным источником выбросов в регионе, поскольку, как показала наша модель, на него приходится 23,71%, 50,46% и 45,12% соответствующих выбросов SO_2 , CO и NO в 2022 году (таблица 4). В глобальном масштабе выбросы от открытого сжигания биомассы составляют около 30%, 10%, 15% и 40% современных глобальных выбросов CO , оксидов азота (NO_x), черного углерода и органического углерода соответственно (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Напомним, что черный углерод и органический углерод являются основными компонентами твёрдых частиц, образующихся в процессе сжигания топлива, и играют важную роль в загрязнении воздуха и изменении климата. Содержание NO и CO , оценённое в ходе этого исследования, соответствует наблюдениям Европейского космического агентства (European Space Agency, ESA) по пожарам и изменению климата (Fire_cci), показанным на рисунке 7.

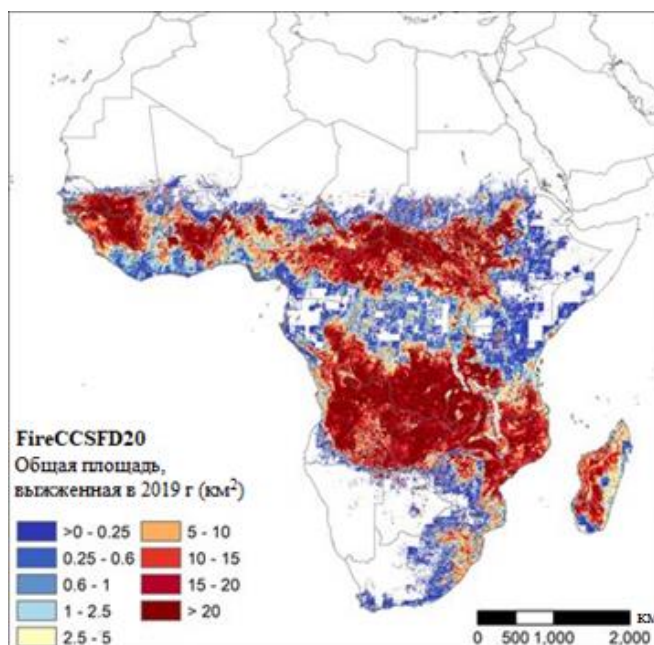


Рисунок 7 – Общая площадь сгоревших территорий Африки в 2019 году по оценке FireCCISFD20 (Chuviesco и др., 2021)

Версия Fire_cci 2.0 набора данных о пожарах («FireCCISFD20») охватывает Африку к югу от Сахары и основывается на определении площади сгоревших территорий при мониторинге изменений отражательной способности поверхности в результате сжигания биомассы.

Выбросы SO_2 , CO и NO также характеризуются выраженной помесечной изменчивостью, достигая максимума в июле и принимая минимальные значения в апреле и октябре, как показано на рисунке 6. Наибольшие значения SO_2 , CO и NO совпадают с периодом, когда максимальные выбросы приходятся на южную часть экватора, в то время как минимумы совпадают с периодами, когда выбросы затухают для основных регионов-источников, как показано на рисунке 6. Это объясняется тем, что большее количество выжженных участков Центральной Африки расположено в южной части экватора, как показано на рисунке 7. Выбросы NO_2 демонстрировали стабильную динамику на протяжении 2022 года. В целом, крупнейшими источниками выбросов NO_2 являются грузовые автомобили, автобусы и легковые автомобили, затем дизельное внедорожное оборудование, промышленные процессы и угольные электростанции. Усиленные, но сильно изменчивые NO_2 в вертикальном столбе атмосферы связаны с регионами, где сжигается биомассы, а также с районами, подверженными влиянию грозовой активности (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

Среднемировое значения вреда от выбросов CO, оценённое Гобер и др. (2017) с использованием методов ассимиляции данных за период 2002-2013 гг. составило 356 ± 27 тераграмм (Тг). Тем не менее, исследования выявили тенденцию к снижению глобальных выбросов CO с 2010 года. Это снижение объясняется регулированием выбросов от автомобильного транспорта в Северной Америке и Европе и уменьшением сжигания биомассы в странах Африки к югу от Сахары и Латинской Америки, несмотря на вероятное увеличение химического производства CO в атмосфере (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). Из-за бытовых пожаров и дорожной деятельности Восточная Африка является вторым после

Западной Африки регионом по выбросам черного углерода, органического углерода, CO и не метановых летучих органических соединений в Африке (Keita и др., 2021). В выбросах CO в Восточной Африке также преобладают лесные пожары, преднамеренно возникшие по разным причинам или вызванные ударами молний. Выбросы SO₂ относительно невелики в регионе Восточной Африки.

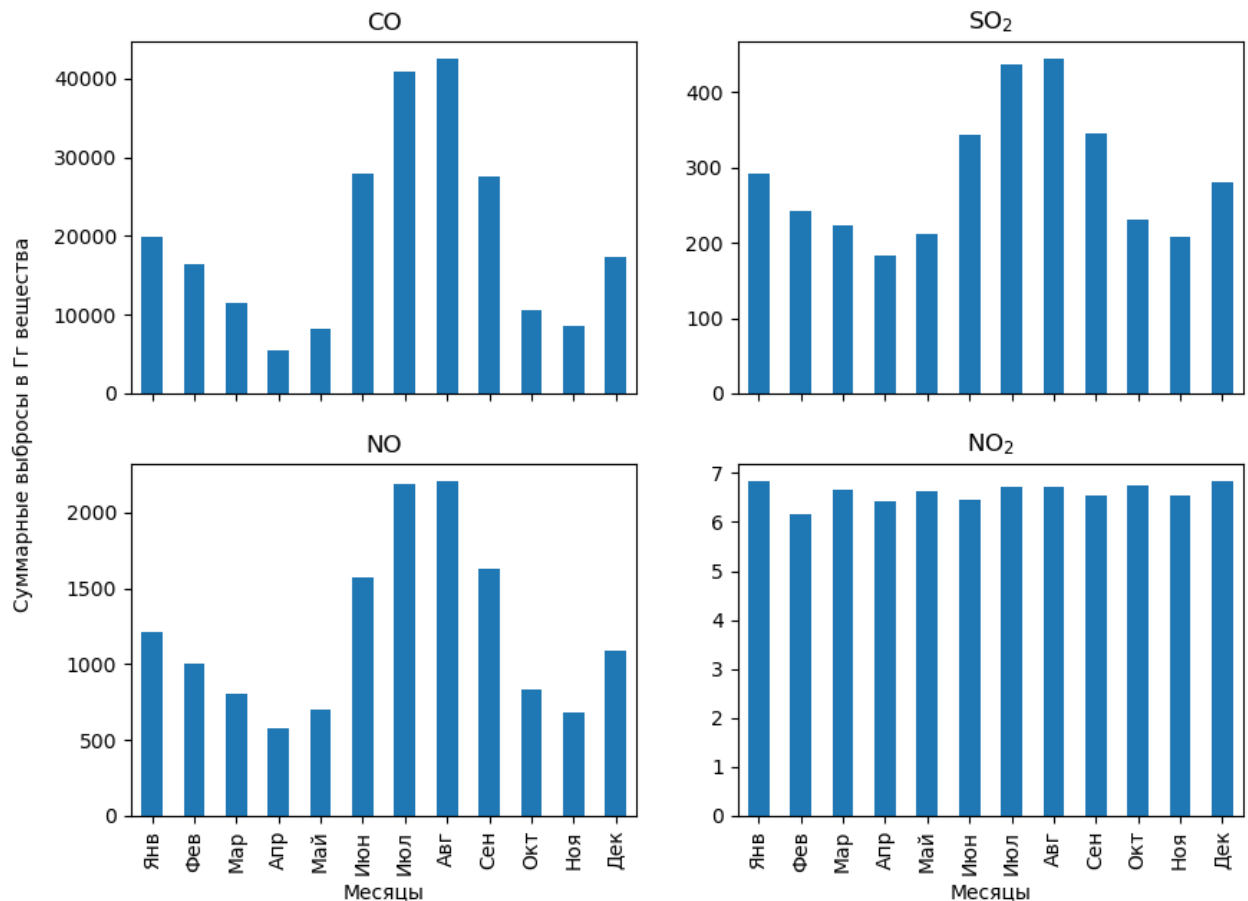


Рисунок 8 – Месячная изменчивость выбросов за 2022 год по оценкам НЕМСО

Южная Африка является крупнейшим источником выбросов в Африке, в то время как Индия и Россия были основными мировыми источниками антропогенных выбросов в 2019 году с относительным вкладом 21% и 12% соответственно (Sunil Dahiya, Andreas Anhäuser, Aidan Farrow, Hubert Thieriot, Avinash Chanchal, 2020). Металлургические предприятия в Замбии являются наиболее антропогенными источниками SO₂ в регионе Центральной Африки. Согласно каталогу данных HACA MEaSUREs за 2023 год, более 70% выбросов SO₂

имеют антропогенное происхождение, поскольку промышленные предприятия сжигают ископаемое топливо либо для выработки электроэнергии, либо для извлечения металла из руды (плавильный завод), составляющих первичные источники. Другими антропогенными источниками являются локомотивы, корабли и другие транспортные средства или тяжёлое оборудование, сжигающее топливо с высоким содержанием серы. Вулканы являются единственным крупным природным источником SO_2 , на долю которого приходится около 32% современных выбросов SO_2 . В рамках инициативы глобальной стратегии Коалиции за климат и чистый воздух (Climate and Clean Air Coalition, CCAC) по внедрению топлива с низким содержанием серы и более чистых дизельных транспортных средств страны Восточной Африки сделали выбор в пользу снижения содержания серы в топливе до 50 частей на миллион и использования технологии спасательных моторных фильтров и катализаторов, способствующие использованию чистого топлива с 2015 года (Naré, Kamakaté, 2017).

3.1.3 Анализ тенденций антропогенных выбросов

База данных выбросов EDGAR – это многоцелевая независимая глобальная база данных антропогенных выбросов парниковых газов и загрязнения воздуха на Земле. Чтобы проиллюстрировать изменение антропогенных выбросов за 25 лет (1998-2022 гг.), мы использовали базу данных EDGAR и изучили выбросы по странам, а затем по секторам, как показано на рисунках 9, 10, 11 и 12. За этот период CO , NO_x , SO_2 и $\text{ТЧ}_{2,5}$, поступающие из всех стран вместе взятых, увеличились на 191,7%, 52,7%, 180,1% и 74,6% с годовыми темпами роста 4,4%, 1,7%, 4,2% и 2,4% соответственно (рисунок 8). Профиль страны показывает, что Эфиопия является крупнейшим региональным источником выбросов CO и $\text{ТЧ}_{2,5}$, тогда как более высокие средние показатели SO_2 и NO_x поступают из Замбии и Судана (В данном разделе (3.1.3) Судан обозначает Республику Южный Судан и Республику Судан), соответственно.

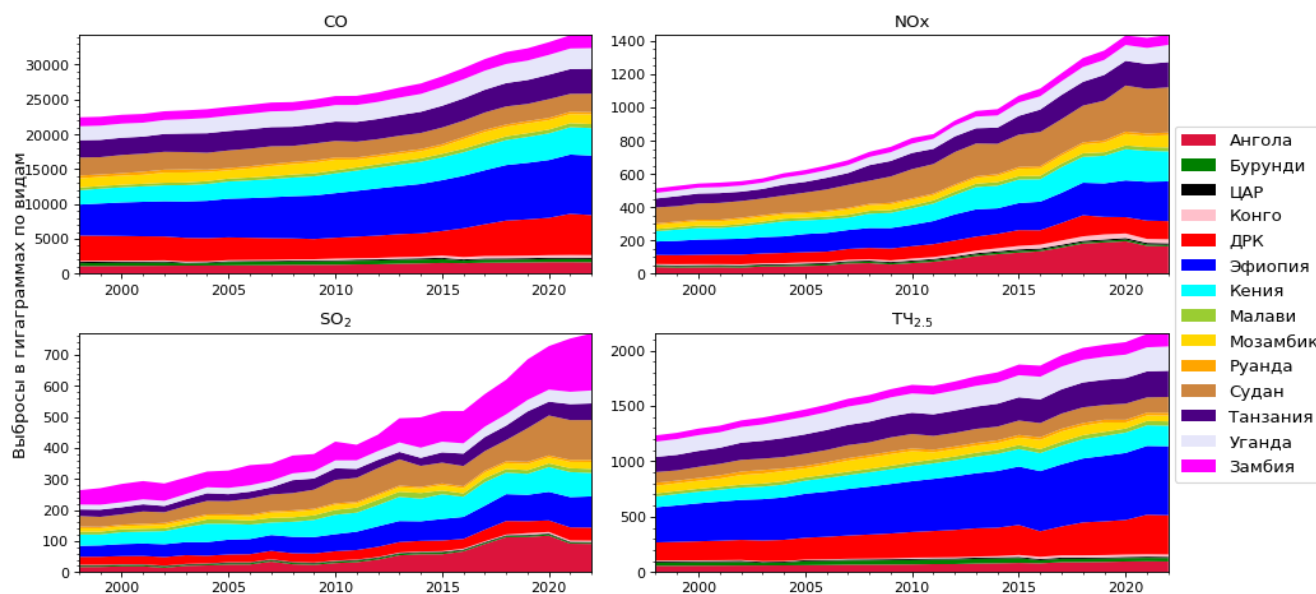


Рисунок 9 – Динамика выбросов по странам с 1998 по 2022 год по данным базы данных EDGAR

Тест Манна–Кендалла использовался для проверки существенных тенденций в выбросах каждого газа по странам. Как правило, тест Манна-Кендалла анализирует знак разницы между данными, измеренными позже и ранее. Каждое последующее измерение сравнивается со всеми значениями, измеренными ранее, в результате чего получается общее количество $\frac{n(n-1)}{2}$ возможных пар данных, где n – это общее количество наблюдений. Статистика Манна-Кендалла (S) для временного ряда $x_1, x_2, \dots, x_n$ рассчитывается как в уравнении (7).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sign}(x_i - x_k) \quad (7)$$

$$\text{где } \text{sign}(x_i - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_k) < 0 \end{cases}$$

Когда S является большим положительным числом, то более поздние измеренные значения имеют тенденцию быть больше, чем более ранние значения, и указывается тенденция к росту. Если S – большое отрицательное число, более поздние значения имеют тенденцию быть меньше, чем более ранние значения, и

указывается тенденция к снижению. Когда S мало, тенденция не прослеживается. Мы использовали модуль `pyMannKendall` с помощью пакета программ Питон (Hussain, Mahmud, 2019) для оценки тенденции для каждой страны. Тест тенденций показал, что все выбросы (SO_2 , NO_x , $ТЧ_{2,5}$) увеличились, за исключением CO , для которого тест не подтвердил тенденцию к увеличению (p -значение больше 0,05) в Бурунди, Демократической Республике Конго, Мозамбике, Руанде и Судане (Таблица 5). Тенденция к увеличению не была статистически подтверждена ($p > 0,05$) также для SO_2 в Бурунди и $ТЧ_{2,5}$ в Бурунди, Центральноафриканская Республика (ЦАР) и Мозамбике.

Таблица 5 – Результаты теста тренда Манна-Кендалла, проведённого для выбросов загрязняющих веществ за 25-летний период (1998–2022 гг.)

Страны	SO_2		CO		NO_x		$ТЧ_{2,5}$	
	s	p*	s	p*	s	p*	s	p*
Ангола	264,0	0,000	292,0	0,000	266,0	0,000	292,0	0,000
Бурунди	50,0	0,252	66,0	0,129	174,0	0,000	74,0	0,088
ЦАР	204,0	0,000	124,0	0,004	282,0	0,000	66,0	0,129
Республика Конго	190,0	0,000	272,0	0,000	252,0	0,000	230,0	0,000
ДРК	234,0	0,000	76,0	0,080	280,0	0,000	284,0	0,000
Эфиопия	292,0	0,000	300,0	0,000	294,0	0,000	300,0	0,000
Кения	226,0	0,000	300,0	0,000	270,0	0,000	298,0	0,000
Малави	88,0	0,042	282,0	0,000	262,0	0,000	264,0	0,000
Мозамбик	236,0	0,000	-8,0	0,870	250,0	0,000	-50,0	0,252
Руанда	150,0	0,001	-2,0	0,981	226,0	0,000	108,0	0,012
Судан	236,0	0,000	-30,0	0,498	280,0	0,000	248,0	0,000
Танзания	198,0	0,000	256,0	0,000	252,0	0,000	300,0	0,000
Уганда	296,0	0,000	282,0	0,000	298,0	0,000	286,0	0,000
Замбия	194,0	0,000	196,0	0,000	254,0	0,000	298,0	0,000

Примечание – * p : p -значение $< 0,05$ означает отклонение нулевой гипотезы об отсутствии тренда и, таким образом, свидетельствует о существовании тренда. Тенденция возрастает, когда S положительный и уменьшается при отрицательном S .

Чтобы получить количественное представление об изменении выбросов за период исследования (1998–2022 гг.), мы провели графический анализ, обобщив процентные изменения каждого выброса по странам, как показано на рисунке 9. Профиль страны показал, что выбросы SO_2 увеличились вдвое в Анголе, Замбии, Судане и Республике Конго. Удвоение выбросов произошло также для данных NO_x , поступающих из Анголы, Республики Конго и Уганды. В то время как выбросы $\text{ТЧ}_{2,5}$ удвоились в Республике Конго. Такие страны, как Бурунди, Центральноафриканская Республика (ЦАР) и Руанда, продемонстрировали снижение выбросов SO_2 в Бурунди, $\text{ТЧ}_{2,5}$ в Центральноафриканской Республике (ЦАР), Мозамбике и Руанде и CO в Мозамбике и Руанде. Графический анализ позволил прояснить изменения в выбросах загрязняющих веществ, выявленные с помощью трендового теста Манна-Кендалла, представленные в таблице 5.

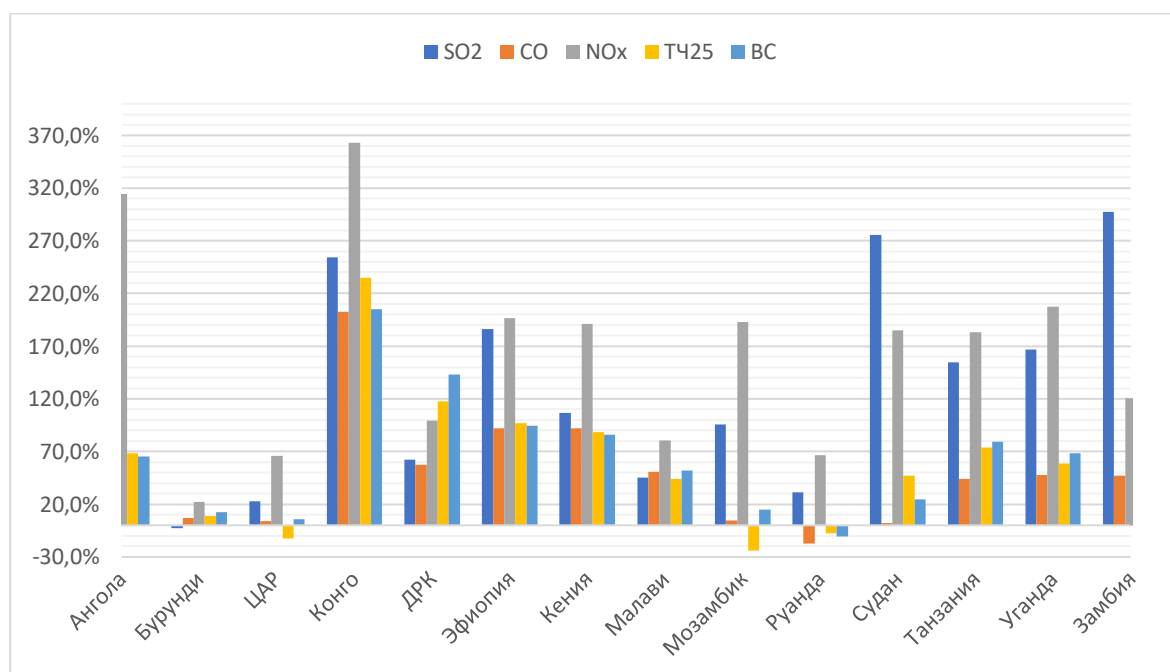


Рисунок 10 – Изменение антропогенных выбросов по странам за 25 лет (1998–2022 гг.)

Анализ выбросов на душу населения (рисунок 11) показал снижение выбросов CO и $\text{ТЧ}_{2,5}$ на душу население во всех странах, в то время как выбросы NO и SO_2 увеличились. Такие страны, как Судан и Замбия, имеют более высокие выбросы по

сравнению с другими странами. Эти страны также характеризуются повышенным уровнем загрязнения воздуха в результате использования тепловой энергии и горнодобывающей деятельности (Mwaanga и др., 2019), а также природной пылью, образующейся в рассеянных районах. Как обсуждалось ранее (раздел 3.1.2), Замбия является основным источником выбросов SO_2 в регионе из-за деятельности металлургических заводов, в то время как сжигание биомассы доминирует в выбросах NO .

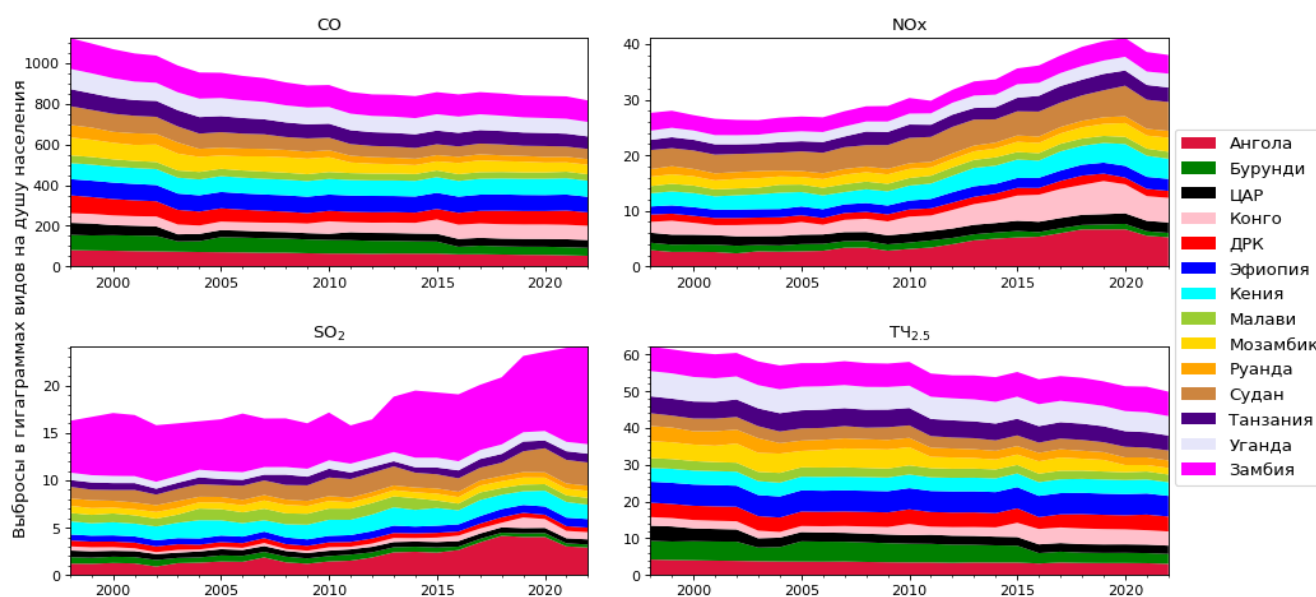


Рисунок 11 – Динамика выбросов по странам на душу населения с 1998 по 2022 год по данным EDGAR

Среди источников выбросов CO преобладают бытовые источники (в среднем за 25 лет 62,0%), за ними следуют летучие выбросы от твёрдого топлива (23,6%). Выбросы NO_x в основном связаны с автомобильным транспортом (25,9%), жилыми домами (20,3%), производством и строительством (13,9%). Основными источниками SO_2 являются жилые дома, тепло- и электроэнергетика, обрабатывающая промышленность и производство металлов – 31,7%, 25,9%, 22,9% и 13,1%, соответственно. В выбросах твёрдых частиц ($\text{ТЧ}_{2.5}$) преобладают жилые дома (в среднем за 26 лет 78,3%), за ними следуют летучие выбросы от твёрдого топлива (7,1%).

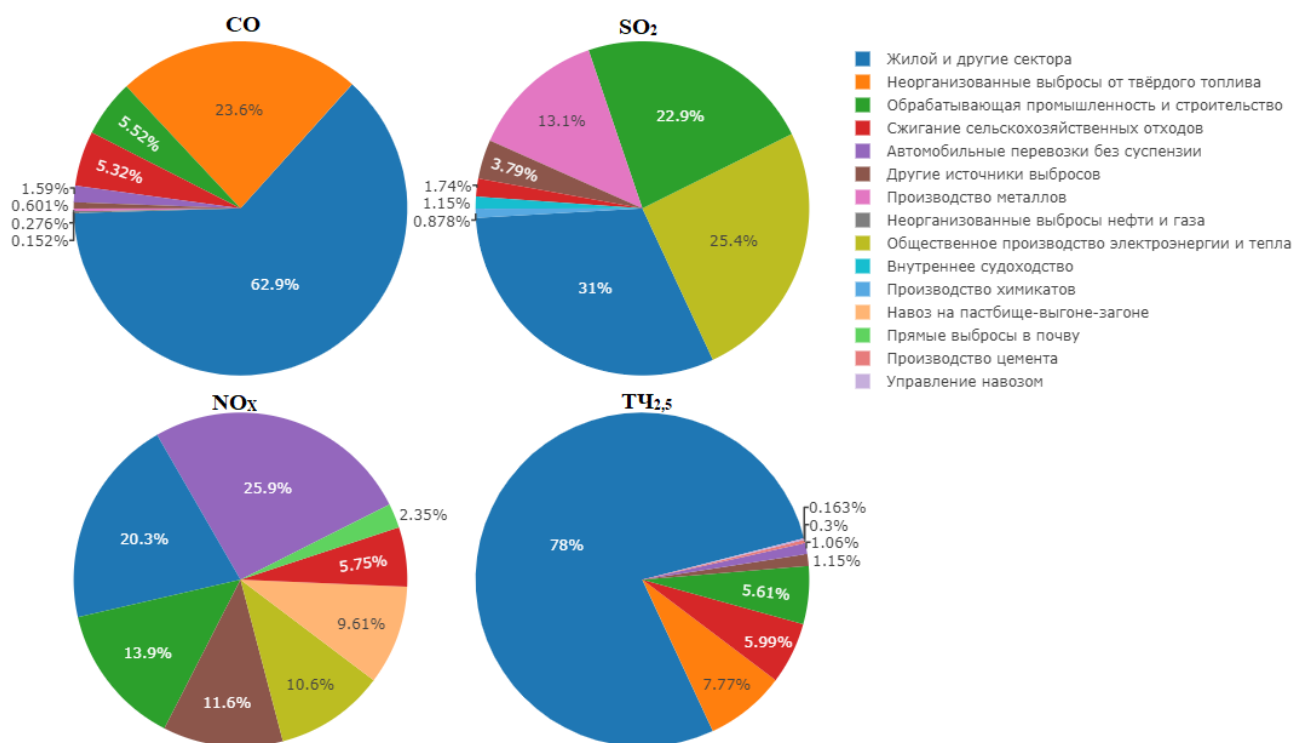


Рисунок 12 – Средний вклад сектора в выбросы загрязняющих веществ за 25 лет (1998–2022 гг.)

3.2 Уровень загрязнения воздуха в регионе Восточной Африки

Загрязнители воздуха, выброшенные из своих первичных источников, переносятся, рассеиваются и подвергаются физическим и химическим преобразованиям в атмосфере, пока не разложатся или не удалятся в атмосфере. Основные процессы удаления загрязнений воздуха включают процессы сухого и влажного осаждения (Кузнецов, 2009). Сухое осаждение — это процесс, при котором загрязняющие вещества удаляются из атмосферы и оседают на таких поверхностях, как земля, растительность или здания, в отсутствие осадков. Сухое осаждение определяется уровнем атмосферной турбулентности, химическими свойствами осаждающихся частиц и природой самой поверхности. Для газообразных загрязнителей растворимость и химическая реакционная способность могут влиять на поглощение на поверхности. Влажное осаждение — это процесс, при котором загрязнители воздуха поглощаются атмосферными

гидрометеорами (каплями облаков и тумана, дождём, снегом) и затем доставляются на поверхность Земли. Влажные отложения являются ключевым компонентом естественного механизма очищения атмосферы. Срок службы каждого загрязнителя определяется его природой, источником и взаимодействием, которое он осуществляет в атмосфере.

Попадая в воздух, переносимые по воздуху загрязнители вступают в контакт с живыми и неживыми организмами, оказывая на них различное воздействие. У людей и животных дыхательная система является основным путём воздействия загрязнения воздуха. Вдыхаемые загрязнители воздуха вызывают окислительный стресс, воспаление, иммуносупрессию и мутагенность в каждой клетке нашего тела, поражая сердце, мозг и лёгкие среди других органов и в итоге приводя к множеству заболеваний. Несмотря на то, что загрязнение воздуха стало широко известно, почти 99% населения мира дышит воздухом, качество которого превышает стандарты качества воздуха, установленные Всемирной организацией здравоохранения, что ставит под угрозу их здоровье (World Health Organization, 2020a). Более того, загрязнение воздуха оказывает непропорционально большое влияние на малообеспеченные слои населения (UNEP, 2019). Исследования показали, что эти сообщества часто сталкиваются с более высоким уровнем загрязнения воздуха из-за таких факторов, как близость к промышленным объектам и основным транспортным коридорам, а также менее строгое соблюдение экологических норм (Jbaily и др., 2022). Отсутствие действий в развивающихся странах привело к тому, что они в наибольшей степени страдают от низкого качества воздуха, вызванного неконтролируемой урбанизацией, быстрым ростом числа автомобилей и развитием промышленности. В данном разделе рассматриваются уровни концентрации загрязнителей воздуха в странах Восточной Африки на основе $\text{ТЧ}_{2,5}$; CO , SO_2 и NO_x .

3.2.1 Уровень воздействия загрязнения воздуха по странам

После оценки и анализа выбросов в регионе Центрально-Восточной Африки мы оценили уровень и изменчивость загрязнения воздуха в странах Восточной

Африки, уделив особое внимание $\text{ТЧ}_{2,5}$, CO , NO_2 и SO_2 , путём агрегирования данных за десять лет (2013–2022 гг.) (Таблица 6). Источник данных, использованных в этом подразделе, описан в разделе 2.2.2 настоящего исследования. Среднегодовое значение $\text{ТЧ}_{2,5}$ превысило норму ВОЗ для среднегодового уровня на всех территориях. Жители Уганды и Кении особенно подвержены высокому воздействию твёрдых частиц по сравнению с другими странами. CO и SO_2 высоки в Руанде и Бурунди, в то время как самые низкие концентрации этих загрязнителей наблюдаются в Танзании и Кении.

Таблица 6 – Средние концентрации загрязнителей воздуха по территории страны за период 2013–2022 гг.

Загрязнители	Бурунди	Кения	Руанда	Танзания	Уганда	Средний
$\text{ТЧ}_{2,5}$ (мкг/м ³)	71,83 (34,08)	77,81 (33,64)	70,63 (33,13)	66,04 (26,05)	88,57 (45,75)	72,92 (31,30)
CO (мкг/м ³)	146,79 (44,29)	88,07 (9,40)	150,80 (48,46)	105,07 (22,90)	128,27 (37,69)	104,02 (21,25)
NO_2 ($\times 10^{15}$ мкг/м ²)	487,91 (215,70)	362,54 (44,35)	408,09 (98,22)	505,37 (253,31)	490,80 (166,72)	456,30 (172,52)
SO_2 (мкг/м ³)	0,748 (0,201)	0,232 (0,023)	0,953 (0,278)	0,139 (0,068)	0,414 (0,146)	0,226 (0,069)

Примечание: В таблице приведены средние климатологические значения и их стандартное отклонение в скобках.

Пространственная изменчивость показывает, что уровень NO_2 в основном высок на юго-западе Танзании и северо-западе Уганды. Более высокие уровни NO_2 совпадают с регионами, характеризующимися саваннами, в которых предполагается, что сжигание саванны является основным источником NO_2 в регионе (Opio, Mugume, Nakatumba-Nabende, 2021). Северо-запад Восточно-Африканского региона также сталкивается с высоким уровнем загрязнения пылью, поступающей из пустыни Сахары и эта пыль рассеивается по всему региону, что приводит к более высоким уровням загрязнения $\text{ТЧ}_{2,5}$. Более того, загрязнение SO_2

преобладает в некоторых точках Руанды, Уганды и Кении. Вулкан Ньирагонго является основным источником SO_2 , наблюдаемым в северо-западной части Руанды (Arellano и др., 2017), а производство энергии и сжигание биомассы являются основными источниками SO_2 в Уганде и Кении.

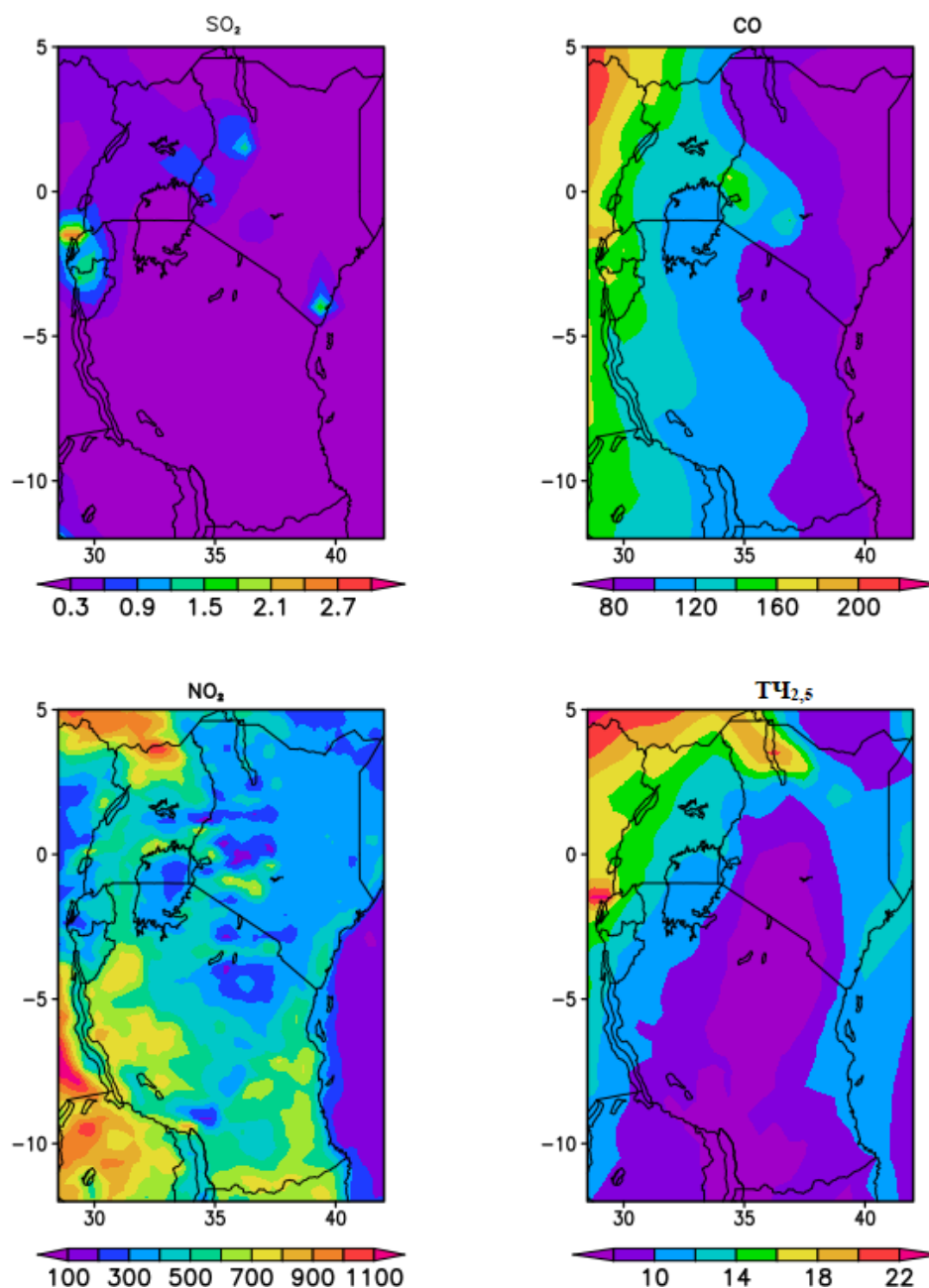


Рисунок 13 – Пространственная изменчивость загрязнения воздуха в регионе Восточной Африки. Цветные столбики выражены в $\text{мкг}/\text{м}^3$ для $\text{TCH}_{2.5}$; SO_2 и CO , и $\times 10^{15} \text{ мкг}/\text{м}^2$ для NO_2

3.2.2 Временная изменчивость загрязнения воздуха

Знание временной изменчивости уровня загрязнения воздуха в том или ином районе должно помочь преодолеть период высокого загрязнения, чтобы защитить жителей региона, особенно наиболее уязвимые группы населения. Следуя этой схеме, мы проанализировали ежемесячную изменчивость уровня загрязнения, усреднённого за период десяти лет (с 2013 по 2022 год), чтобы выявить наиболее загрязнённые месяцы в регионе. Концентрации $\text{ТЧ}_{2,5}$, CO , SO_2 и NO_2 соответственно колебались между среднемесячными значениями (от максимального до минимального) $144,32 \text{ мкг/м}^3$ и $23,68 \text{ мкг/м}^3$; $228,03 \text{ мкг/м}^3$ и $79,88 \text{ мкг/м}^3$; $1,32 \text{ мкг/м}^3$ и $0,05 \text{ мкг/м}^3$; $909,34 \times 10^{15} \text{ мкг/м}^2$ и $221 \times 10^{15} \text{ мкг/м}^2$. Несмотря на то, что поверхностный уровень $\text{ТЧ}_{2,5}$ вызывает тревогу во всем регионе, жители Уганды и Кении подвергаются высокому уровню загрязнения мелкими частицами по сравнению с другими странами в данном исследовании (Рисунок 14).

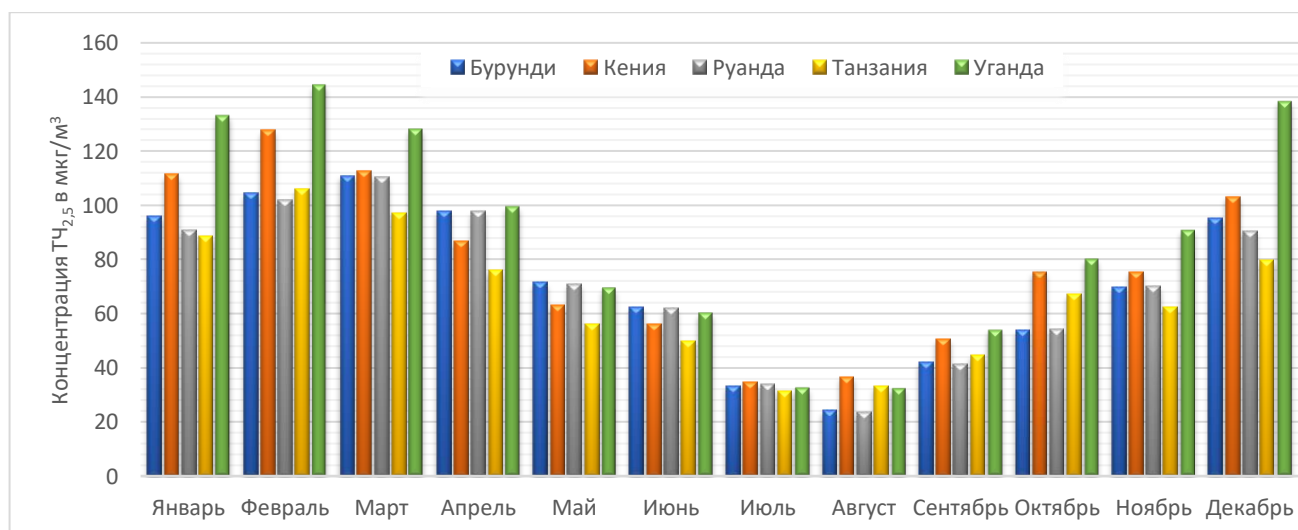


Рисунок 14 – Среднемесячная изменчивость приземной концентрации $\text{ТЧ}_{2,5}$ в регионе Восточной Африки

Концентрации CO , SO_2 и NO_2 сопоставимы с глобальными уровнями (Marković и др., 2008), при этом в Руанде и Бурунди наблюдаются более высокие уровни CO и SO_2 , тогда как NO_2 доминирует в Танзании и Бурунди (рисунки 14, 15 и 16). $\text{ТЧ}_{2,5}$, CO и SO_2 продемонстрировали сезонную изменчивость с пиком

ТЧ_{2,5} в течение сезона декабрь-январь-февраль, а CO и SO₂ показали бимодальную изменчивость с пиками в январе-феврале, а затем в период июнь-июль-август.

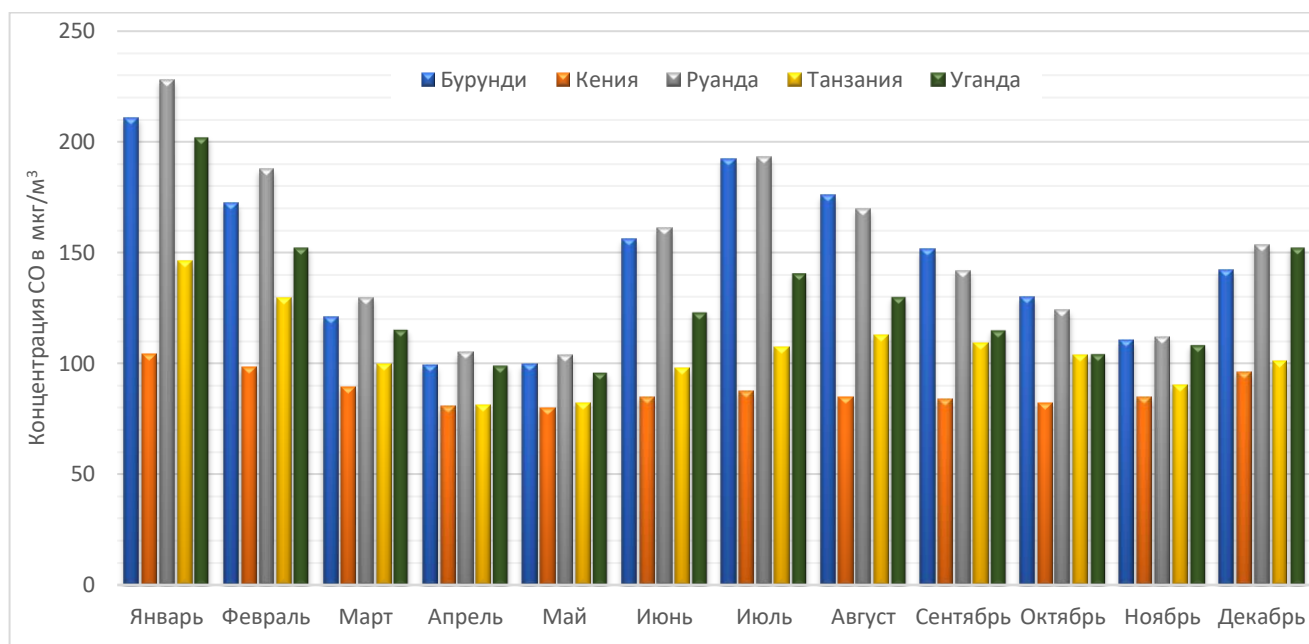


Рисунок 15 – Среднемесячная изменчивость приземной концентрации CO в регионе Восточной Африки

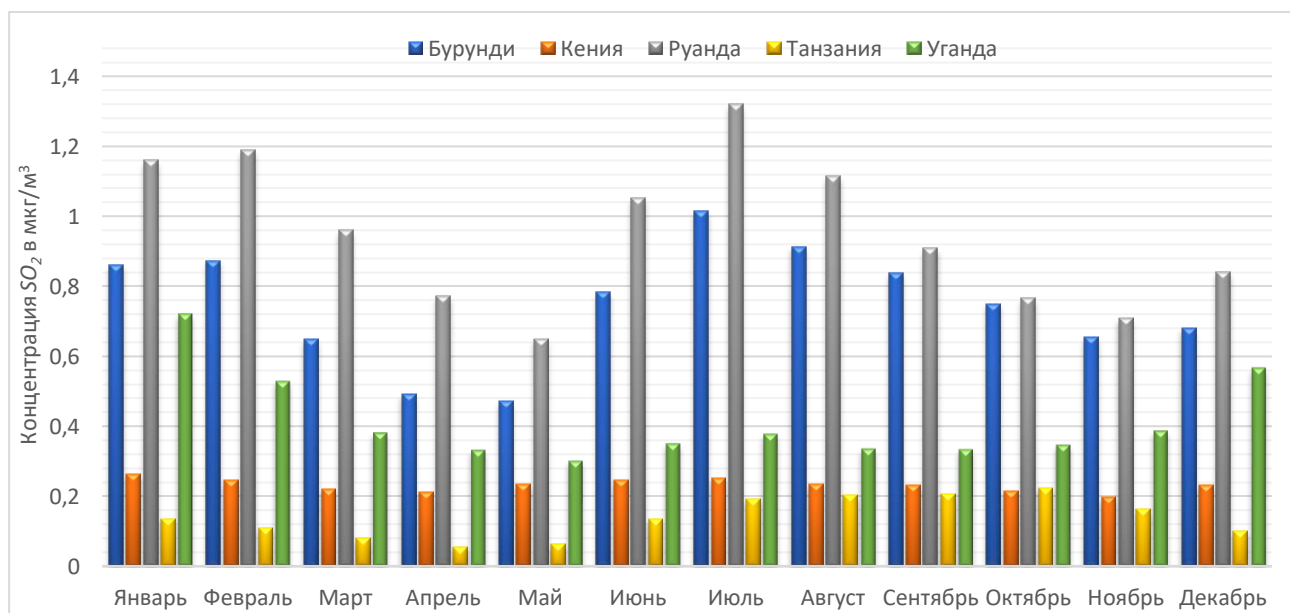


Рисунок 16 – Среднемесячная изменчивость приземной концентрации SO₂ в регионе Восточной Африки

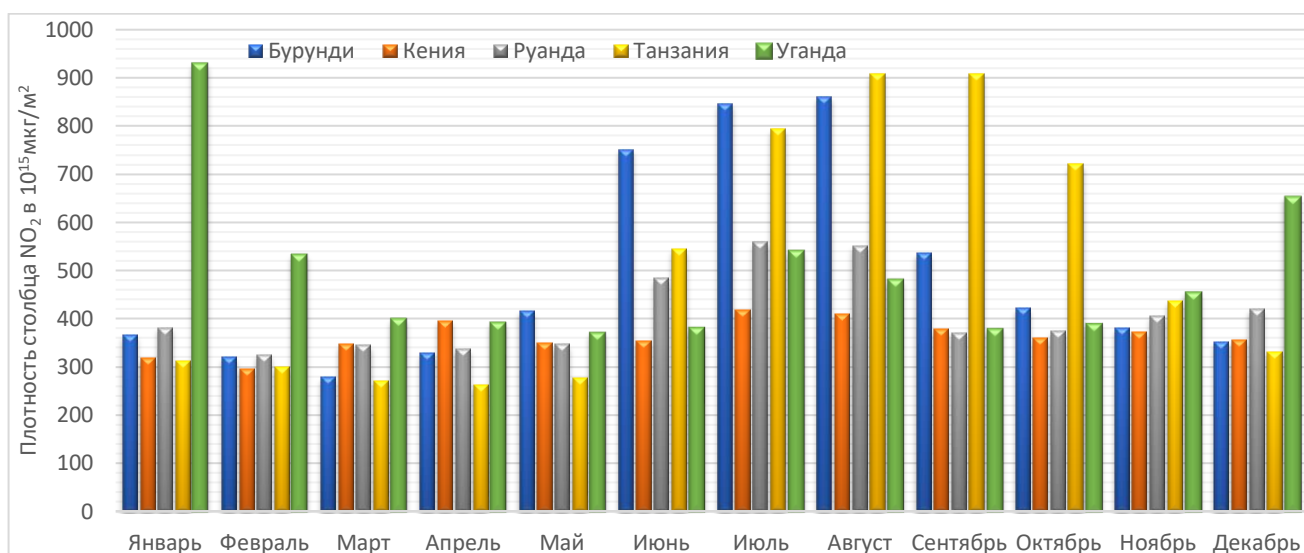


Рисунок 17 – Среднемесечная изменчивость приземной концентрации NO_2 в регионе Восточной Африки

3.2.3 Уровень загрязнения воздуха в городах

Загрязнение окружающей среды твёрдыми частицами (ТЧ) считается показателем загрязнения атмосферы, особенно в городских районах, где его основными источниками являются автомобильная и промышленная деятельность. Исследование, проведённое Apte и др., (2021) (Southerland и др., 2022) значительно расширили знания об экспозиции $\text{TЧ}_{2,5}$ в городских районах, показав, что наиболее загрязнёнными городами являются города с населением менее 1 миллиона человек, в большинстве из которых даже не было наземного мониторинга качества воздуха. Исследование также выявило различия между развитыми и развивающимися странами, отметив улучшение концентрации $\text{TЧ}_{2,5}$ в городских районах с высокими доходами, в то время как концентрации $\text{TЧ}_{2,5}$ в городских районах с низкими доходами растут.

Используя данные проекта AirQo, мы оценили среднюю дневную и еженедельную концентрацию $\text{TЧ}_{2,5}$ в четырёх из пяти основных городов региона, выбрав по одному городу по стране (данные по Танзании не были представлены, поскольку AirQo не имеет датчиков или отчётов о сотрудничестве в Танзании). В Таблице 7 представлены доступные данные и усреднённые по времени значения для каждого города из пяти заинтересованных стран.

Таблица 7 – Наличие данных по ТЧ_{2,5} и средние значения (ТЧ_{2,5} в мкг/м³) в городах Восточной Африки

Город	Доступность данных	Среднечасовое значение ТЧ _{2,5} (стандартное отклонение)	Минимальные (максимальные) средние значения за час	Руководство ВОЗ
Бужумбура	29.08.2023-31.12.2023	28,76 (15,50)	6,44 (90,41)	5 мкг/м ³ в среднем за год, 15 мкг/м ³ среднее значение за 24 часа.
Найроби	01.07.2023-31.12.2023	15,57 (10,02)	4,31 (118,20)	
Кигали	19.04.2022-19.12.2023	45,89 (25,14)	3,50 (156,20)	
Кампала	31.01.2022-31.12.2023	41,90 (26,76)	4,22 (203,6)	

Люди в Кампале подвергаются воздействию более высоких значений концентраций ТЧ_{2,5}, чем в любом городе региона и в среднем во всех городах превышены среднесуточные нормативы ВОЗ по ТЧ_{2,5}. Самый высокий (почасовая выборка) уровень составил 203,60 мкг/м³, наблюдавшийся в городе Кампала, 156,20 мкг/м³ в Кигали, 118,20 мкг/м³ в Найроби и 90,41 мкг/м³ в городе Бужумбура. Дневные концентрации ТЧ_{2,5} варьировались от 26,61 до 31,38 мкг/м³; 14,35–22,23 мкг/м³; 41,35–50,82 мкг/м³ и от 46,91 до 52,96 мкг/м³ в городах Бужумбура, Найроби, Кигали и Кампала, соответственно. Самая высокая среднесуточная концентрация наблюдалась в Кигали ($45,89 \pm 25,14$ мкг/м³), а самая низкая – в Найроби ($15,57 \pm 10,02$ мкг/м³).

В целом, концентрация мелких твёрдых частиц превышала норму ВОЗ в 15 мкг/м³ в течение 24 часов во всех городах, где проводился мониторинг. Хотя уровень ТЧ_{2,5} вызывает тревогу во всем регионе, жители Уганды и Кении подвергаются воздействию более высоких концентраций ТЧ_{2,5}, чем жители других стран региона. Эти результаты подтверждают наблюдения других исследователей (Opio, Mugume, Nakatumba-Nabende, 2021; Singh и др., 2021). Этот анализ рекомендует провести инвентаризацию выбросов и организовать адекватный мониторинг загрязнения воздуха в регионе для точного определения качества воздуха, воздействию которого подвергаются люди.

3.3 Заключение третьей главы

В данной главе были оценены источники и уровни загрязнения воздуха в регионе Восточной Африки. Характеристика потенциальных источников загрязнения воздуха показала, что сжигание биомассы в результате естественных лесных пожаров и подготовки сельскохозяйственных земель является основным источником диоксидов азота и оксида углерода, в то время как вулканическая деятельность доминирует в выбросах диоксида серы. По оценкам, в 2022 году выбросы от сжигания биомассы составили 50,46%, 45,12% и 23,71% от общего объёма выбросов CO, NO и SO₂ соответственно. Проведённый анализ показал, что сезонная изменчивость выбросов в регионе следует за сменой сезонов, при этом в засушливые сезоны выбросы выше, чем во влажные.

Кроме того, особое внимание было уделено антропогенным выбросам путём проведения 25-летнего анализа базы данных о выбросах для базы данных о выбросах для глобальных атмосферных исследований. В целом, согласно типу загрязняющих веществ, в антропогенных выбросах преобладают жилой сектор и автомобильный транспорт. В течение 1998–2022 гг. содержание CO, NO_x, SO₂ и TCH_{2,5} увеличилось на 191,7%, 52,7%, 180,1% и 74,6% с годовым темпом роста 4,4%, 1,7%, 4,2% и 2,37% соответственно.

Хотя выбросы загрязнителей воздуха демонстрируют тенденцию к увеличению в большинстве стран региона, оценка уровней их концентрации в воздухе помогла выявить загрязняющие вещества, вызывающие наибольшую озабоченность как в пространственном, так и во временном измерении. Уровень загрязнения воздуха превышает рекомендуемую ВОЗ концентрацию, особенно загрязнение TCH, в ключевых городах соответствующих стран. Кроме того, наш анализ показал, что концентрация загрязняющих веществ в воздухе в регионе определяется местными выбросами в сочетании с перестановкой сезонов сухости и влажности.

Глава 4 Оценка влияния загрязнения воздуха на здоровье человека

4.1 Вред для здоровья, связанный с загрязнением воздуха в странах Восточной Африки

Наше исследование влияния загрязнения воздуха на здоровье человека началось с анализа вреда для здоровья, связанного с загрязнением воздуха, в пяти странах Восточной Африки с использованием данных из доклада GBD (Global Burden of Disease) за 2021 год (Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), 2024). Проект GBD, травм и факторов риска оценивает смертность и инвалидность от основных заболеваний, травм и факторов риска, таких как загрязнение воздуха. Последняя версия исследования, представляющая собой непрерывную попытку методического включения данных на протяжении всего времени, включает информацию по возрасту и полу с 1990 по 2021 год, охватывающую более 200 стран и территорий. В исследование включены стандартные эпидемиологические показатели, такие как заболеваемость, распространённость и смертность, а также сводные показатели здоровья, такие как годы жизни с поправкой на инвалидность (DALYs) и потерянные годы жизни (YLLs). Используя этот всеобъемлющий набор данных о нагрузке на здоровье, вреда для здоровья, мы сосредоточились на общем количестве смертей, DALYs и YLLs, зарегистрированных в период с 1992 по 2021 год. По определению Всемирной организации здравоохранения DALYs рассматривается как общее количество лет потенциальной жизни, потерянных из-за преждевременной смертности, и лет продуктивной жизни, потерянных из-за инвалидности, и оценивается как сумма этих двух параметров (Fox-Rushby, Hanson, 2001). Один DALY представляет собой потерю, эквивалентную одному году полного здоровья. Таким же образом YLL определяется как суммарный показатель преждевременной смертности. Один YLL соответствует годам потенциальной жизни, потерянным из-за преждевременной смерти, с учётом частоты смертей и возраста, в котором наступает смерть.

Мы сосредоточили внимание на отдельных данных оценок заболеваемости и смертности, связанных с ишемической болезнью сердца (ИБС); инсульт; хроническая обструктивная болезнь лёгких (ХОБЛ), рак трахеи, бронхов и лёгких (РТБЛ); инфекция нижних дыхательных путей (ИНДП); и сахарный диабет 2 типа (СД2). Учёные определили, что эти шесть причин болезней и смерти связаны с загрязнением воздуха (Schraufnager и др., 2019; Всемирная организация здравоохранения, 2024а; Всемирная организация здравоохранения, 2024b). Мы обнаружили, что число смертей, связанных с загрязнением воздуха, оценивалось в 99 125 смертей в 2021 году, что отражает увеличение на 8,52% по сравнению с 91 342 смертями, оценёнными в 1992 году. По статистике, во всех этих странах, вместе взятых, наблюдался среднегодовой показатель из 95 958 (95% доверительный интервал (ДИ): 95 579 — 96 337) смертей за период исследования (1992–2021 гг.). Если рассматривать причины смерти отдельных лиц, то основными причинами смерти в подгруппе региона Восточной Африки были инфекция нижних дыхательных путей и инсульт, которые в среднем составляли 43,43% и 26,55% в год за этот период в 30 лет, соответственно. Число смертей, связанных с загрязнением воздуха, увеличилось в Кении; Танзания и Уганде и уменьшилось в остальных двух странах (Бурунди и Руанда), причём в Руанде наблюдалось значительное снижение смертности, как показано на рисунке 18.

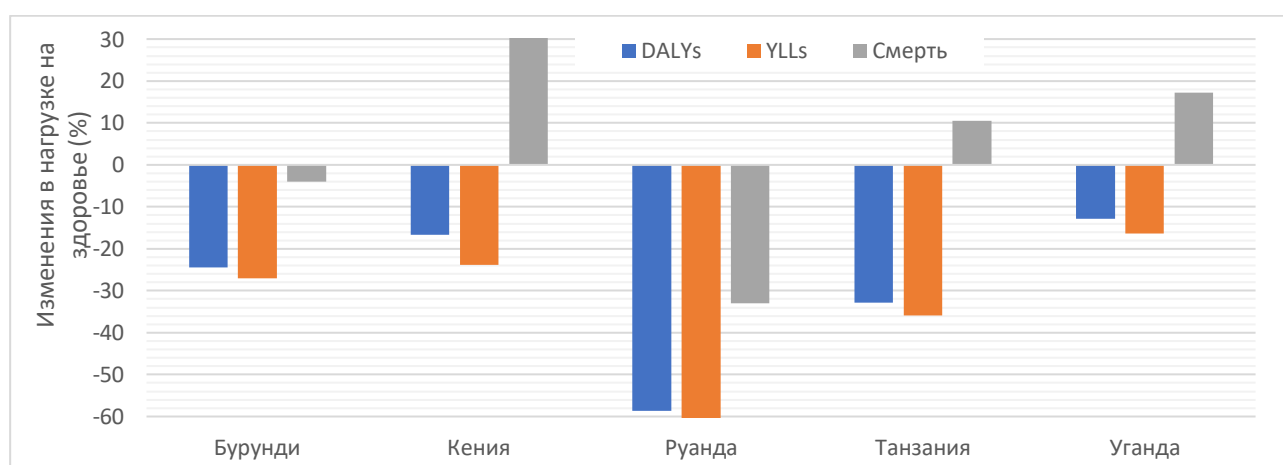


Рисунок 18 – Процентное изменение количества смертностей, DALYs и YLLs, связанных с загрязнением воздуха, в 2021 году по сравнению с 1992 годом

Суммарное количество лет, потерянных с поправкой на инвалидность по пяти странам, составила 3 297 961 года, что на 25,04% меньше в 2021 году по сравнению с 1992 годом (4 399 905 лет). Независимо от общего снижения DALYs, все причины, связанные с загрязнением воздуха, увеличивали DALYs, за исключением инфекций нижних дыхательных путей (Рисунок 19).

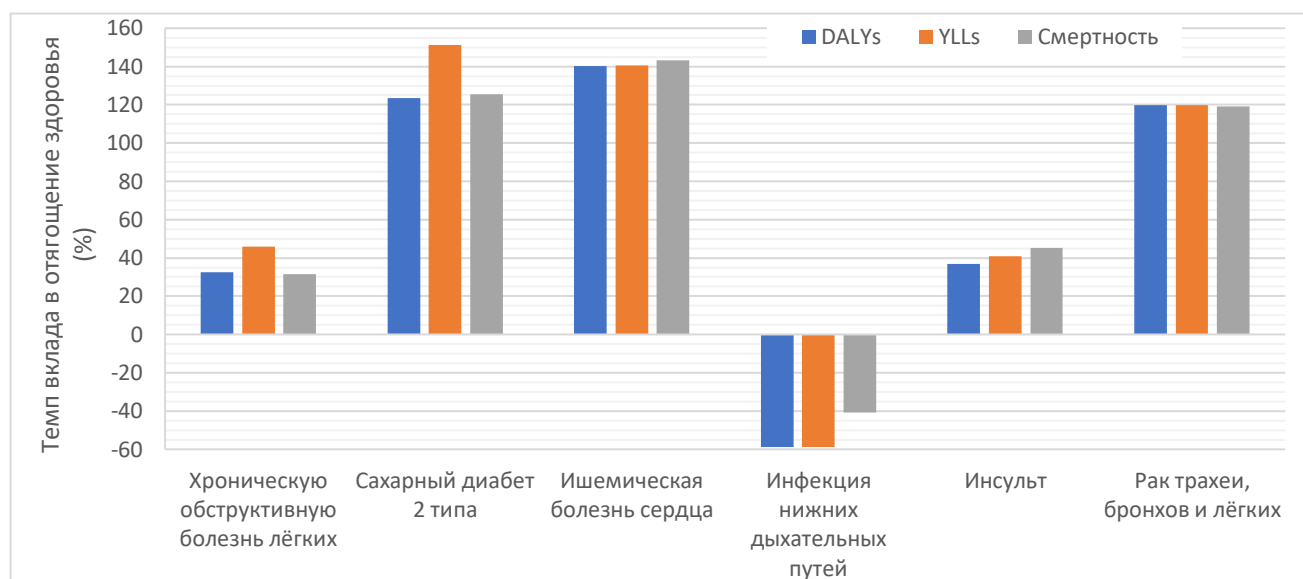


Рисунок 19 – Процентное изменение числа смертей от причин, связанных с загрязнением воздуха, в 2021 году по сравнению с 1992 годом

Сокращение смертности, связанной с инфекциями нижних дыхательных путей, может быть прямым результатом поставленной глобальной задачей 2013 г. по снижению детской смертности в возрасте до трех лет на 1000 человек, выдвинутой Глобальным планом действий по профилактике неинфекционных заболеваний и борьбе с ними (Global Action Plan for the Prevention and Control of Noncommunicable Diseases) (World Health Organization, 2013). Поскольку острая инфекция нижних дыхательных путей является одной из серьёзных проблем в настоящее время в странах Африки к югу от Сахары и распространён среди детей в возрасте до пяти лет (Sarfo и др., 2023), снижение заболеваемости острыми инфекциями нижних дыхательных путей происходит одновременно с снижением заболеваемости инфекциями нижних дыхательных путей и следовательно,

снижение уровня смертности, связанной с загрязнением воздуха. Для достижения этой цели в Африке больше усилий было направлено на снижение загрязнения воздуха в помещениях, где загрязнение воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (Household Air Pollution from solid fuels, HAP) является важным компонентом (Малышева, Калинина, Юдин, 2022). Сокращение загрязнения воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (HAP) в Восточной Африке также является частью стратегий, принятых в большинстве африканских стран, включая более чистые виды топлива и использование усовершенствованных печей для экономии энергии и эффективного приготовления пищи (Phillip и др., 2023). Использование нечистых источников энергии для приготовления пищи и отопления является основным источником загрязнения воздуха внутри помещений от твёрдого топлива в бедных африканских семьях (Gangiah, 2022). Основной причиной DALYs в этот период была инфекция нижних дыхательных путей (65,88%), а наименьшей причиной – рак трахеи, бронхов и лёгких (0,77%). Проблемы со здоровьем от инсульта, ишемической болезни сердца, хронической обструктивной болезни лёгких и от сахарного диабета 2 типа составили соответственно 15,56%; 8,92%; 6,33% и 2,54%. Наш анализ показал, что инфекция нижних дыхательных путей также является основной причиной YLLs, на которую в среднем за несколько лет приходится 67,98% наблюдаемых случаев YLLs.

Чтобы количественно исследовать влияние загрязнения воздуха на YLLs и оценить загрязняющие вещества в большинстве уголков страны, мы построили модель множественной линейной регрессии для каждой страны, а также для оценки региона, учитывая связь $ТЧ_{2,5}$; O_3 и загрязнения воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (HAP). В этой связи мы получили оценки $ТЧ_{2,5}$; O_3 и загрязнения воздуха внутри помещений от твёрдым топливом (HAP) на уровне страны от института измерений показателей и оценки состояния здоровья – Состояние глобального воздуха за 2021 год (Health Effects Institute, 2024). Результаты моделирования представлены в таблице 8. Если взять в качестве практического примера Кению, то результаты моделирования показывают, что изменение $ТЧ_{2,5}$ на

10% приводит к изменению YLLs на 3,7%, а увеличение загрязнения воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (HAP) на 10% приводит к увеличению YLLs на 45,8%. Более того, наш анализ показал, что загрязнение воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (HAP) является загрязнителем, вызывающим наибольшую озабоченность во всех странах. Помимо HAP, было обнаружено, что $TC_{2,5}$ предсказывает YLLs в Уганде и Кении, а O_3 был хорошим предсказателем в Бурунди.

Таблица 8 – Результаты анализа модели множественной линейной регрессии (МЛР)

Профиля страны	Модель МЛР для YLLs	R^2	F-статистика (p-значение)
Кения	$\log(YLLs) = 5,76 + 0,37\log(TC_{2,5}) + 4,58\log(HAP)$	0,78	21,1 (0,000)
Бурунди	$\log(YLLs) = 4,06 + 1,31\log(O_3) + 79,20\log(HAP)$	0,65	11,6 (0,002)
Уганда	$\log(YLLs) = 3,75 + 0,20\log(TC_{2,5}) + 21,37\log(HAP)$	0,56	2,51 (0,140)
Руанда	$\log(YLLs) = 6,1 + 180,01\log(HAP)$	0,75	49,2 (0,000)
Танзания	$\log(YLLs) = 6,78 + 14,35\log(HAP)$	0,53	8,20 (0,011)

Примечание – здесь, R^2 – Коэффициент детерминации, определяющий, сколько наблюдений объясняет модель (%), а также F-статистика и p-значение являются показателями статистической значимости модели.

Мы предсказали региональные случаи возникновения YLLs в регионах, используя модель множественной линейной регрессии. Результат нашей модели показал, что загрязнение воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (HAP) и $TC_{2,5}$ хорошо предсказывают региональные YLLs ($R^2 = 0,84$; $p < 0,05$) для периода исследования с соотношением воздействия и реакции, определяемым уравнением (8).

$$\log(YLLs) = 11,79 + 15,10 \times \log(HAP) + 0,42 \times \log(TC_{2,5}) \quad (8)$$

Уравнение 3 подразумевает, что увеличение региональных загрязнение воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (HAP) и $TC_{2,5}$ на 10% приведёт к увеличению YLLs на 151,0% и 4,2% соответственно. Эта оценка ещё раз подтверждает, что загрязнение воздуха внутри помещений от твёрдого топлива

(НАР) является загрязнителем, вызывающим серьёзную озабоченность в регионе. Показатель преждевременной смертности YLLs тесно связан с загрязнением воздуха. Было установлено, что во всем мире ежегодно теряется более 200 миллионов лет жизни из-за ежегодного воздействия загрязнения (Lelieveld и др., 2020). Результаты наших исследований хорошо согласуются с этим выводом, поскольку установлена прямая связь между YLLs и загрязнителями воздуха во всех заинтересованных странах и это конкретизирует обеспокоенность, высказанную по поводу широкого использования твёрдого биомасса в качестве основного источника энергии для домашних хозяйств в регионе (Kalisa и др., 2023).

4.2 Взаимосвязь между загрязнением воздуха, поверхностным растительным покровом и распространённостью инсульта в Восточной Африке

Загрязнение воздуха и поверхностный растительный покров являются двумя элементами окружающей среды, которые, как было показано, оказывают значительное, хотя зачастую и противоречивое, влияние на здоровье человека. Загрязнение воздуха остаётся одной из наиболее актуальных проблем экологического здравоохранения во всем мире (Ларионов, Безрукова, 2018). В отличие от загрязнения воздуха, воздействие поверхностного растительного покрова связано с рядом преимуществ для здоровья. Территории с растительным покровом включают парки, сады, уличные деревья и другие виды растительности в городских и сельских условиях способствует физическому, психическому и социальному благополучию посредством различных механизмов. Эти поверхности с растительным покровом способствуют физической активности, предоставляя привлекательные места для занятий спортом и отдыха. Было доказано, что регулярная физическая активность имеет решающее значение для профилактики хронических заболеваний, таких как ожирение, диабет и сердечно-сосудистые заболевания (Lee и др., 2012). Во-вторых, доказано, что воздействие естественной среды снижает уровень стресса, тревоги и депрессии (Yan, Leng, Yuan, 2024). Кроме того, Поверхностный растительный покров может улучшить

социальную сплочённость, предоставляя общественные пространства, где люди могут собираться и общаться.

В то время как преимущества поверхностного растительного покрова для здоровья хорошо изучены, а взаимодействие между растительностью и загрязнением воздуха остаётся сложным вопросом. С одной стороны, растительность может способствовать снижению уровня загрязнения воздуха. Деревья и растения могут поглощать загрязняющие вещества и фильтровать твёрдые частицы из воздуха, тем самым улучшая его качество (Nowak, Crane, Stevens, 2006). Это позволяет предположить, что озеленение городов может стать одной из стратегий борьбы с неблагоприятными последствиями загрязнения воздуха для здоровья. Однако деревья и растения выделяют летучие органические соединения (ЛОС), которые могут способствовать образованию приземного озона (Куркудилова и др., 2018).

Несмотря на последние успехи в лечении и профилактике различных болезней, инсульт остаётся второй ведущей причиной смерти и третьей ведущей причиной смерти и серьёзной долгосрочной инвалидности в совокупности (Feigin и др., 2022). В поисках новых модифицируемых факторов риска растёт интерес к неблагоприятному воздействию факторов окружающей среды, среди которых наиболее распространённым является загрязнение окружающего воздуха (Kulick, Kaufman, Sack, 2023).

Данные эпидемиологических исследований продемонстрировали тесную связь между загрязнением воздуха и сердечно-сосудистыми заболеваниями, включая инсульт (Lee, Miller, Shah, 2018). Общими факторами риска инсульта в Восточной Африке являются гипертония, диабет, ожирение, табакокурение и недостаточная физическая активность (Adeloye, 2014). Также отмечается высокая распространённость инфекционных заболеваний, таких как ВИЧ/СПИД, которые могут способствовать повышению риска инсульта (Akinyemi и др., 2021). Кроме того, аналогично мировым тенденциям, распространённость инсульта в Африке увеличивается с возрастом, однако в регионе может наблюдаться более высокая

доля инсультов у молодых людей по сравнению со странами с высоким уровнем дохода из-за различий в структуре факторов риска и доступности медицинской помощи.

В нашем исследовании анализ данных проводился путём усреднения показателей смертности от инсульта по годам и возрастным группам для каждой страны. Мы оценивали изменение экологических переменных (Улучшенный вегетационный индекс (EVI) и загрязнителей воздуха) с интервалом в пять лет в период 2003 и 2022 гг., чтобы продемонстрировать изменение этих переменных. Связь между уровнем смертности от инсульта и загрязнителями воздуха и EVI сначала устанавливали с помощью корреляционного анализа Пирсона, создавая корреляционную матрицу и пространственные корреляционные карты.

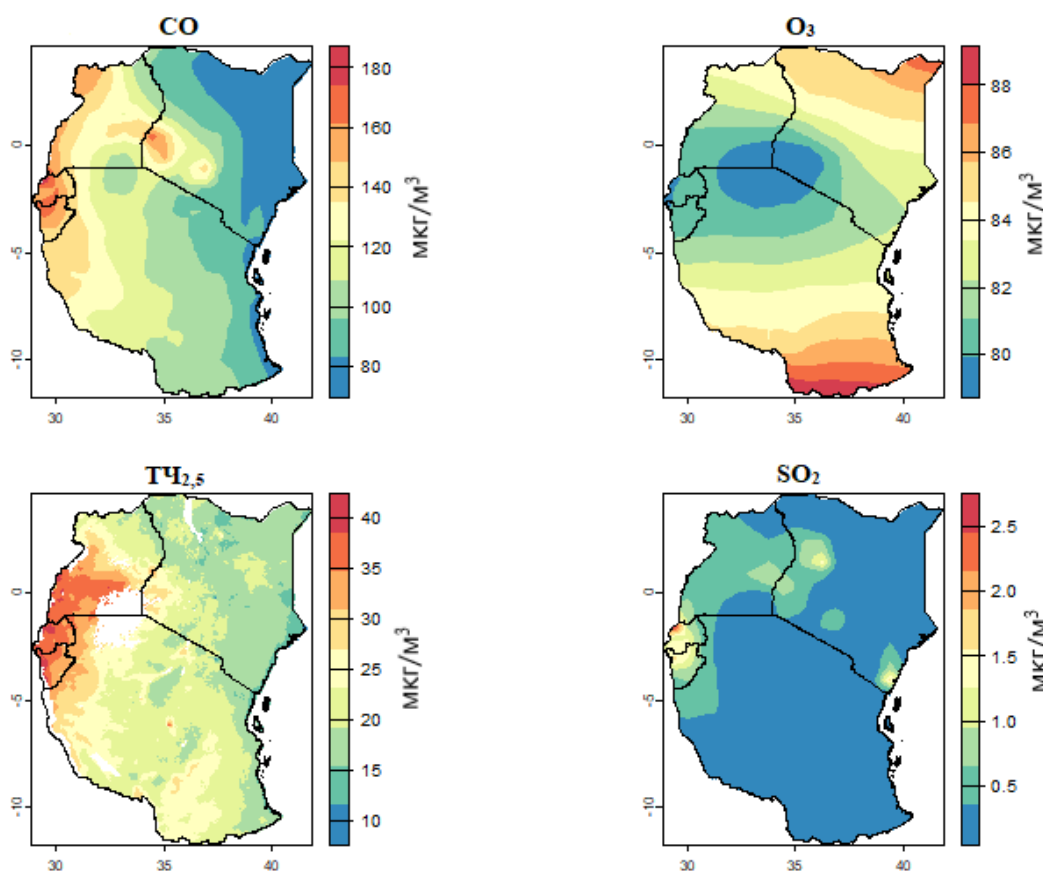


Рисунок 20 – Пространственное распределение загрязнителей воздуха, усреднённое за 20 лет (2003–2022)

Кроме того, мы использовали модель мульти-линейной регрессии для оценки вероятности смертности от инсульта в зависимости от EVI и загрязнителей воздуха, представляющих интерес. Графический анализ использовался для выявления пространственной и временной изменчивости исследуемых переменных.

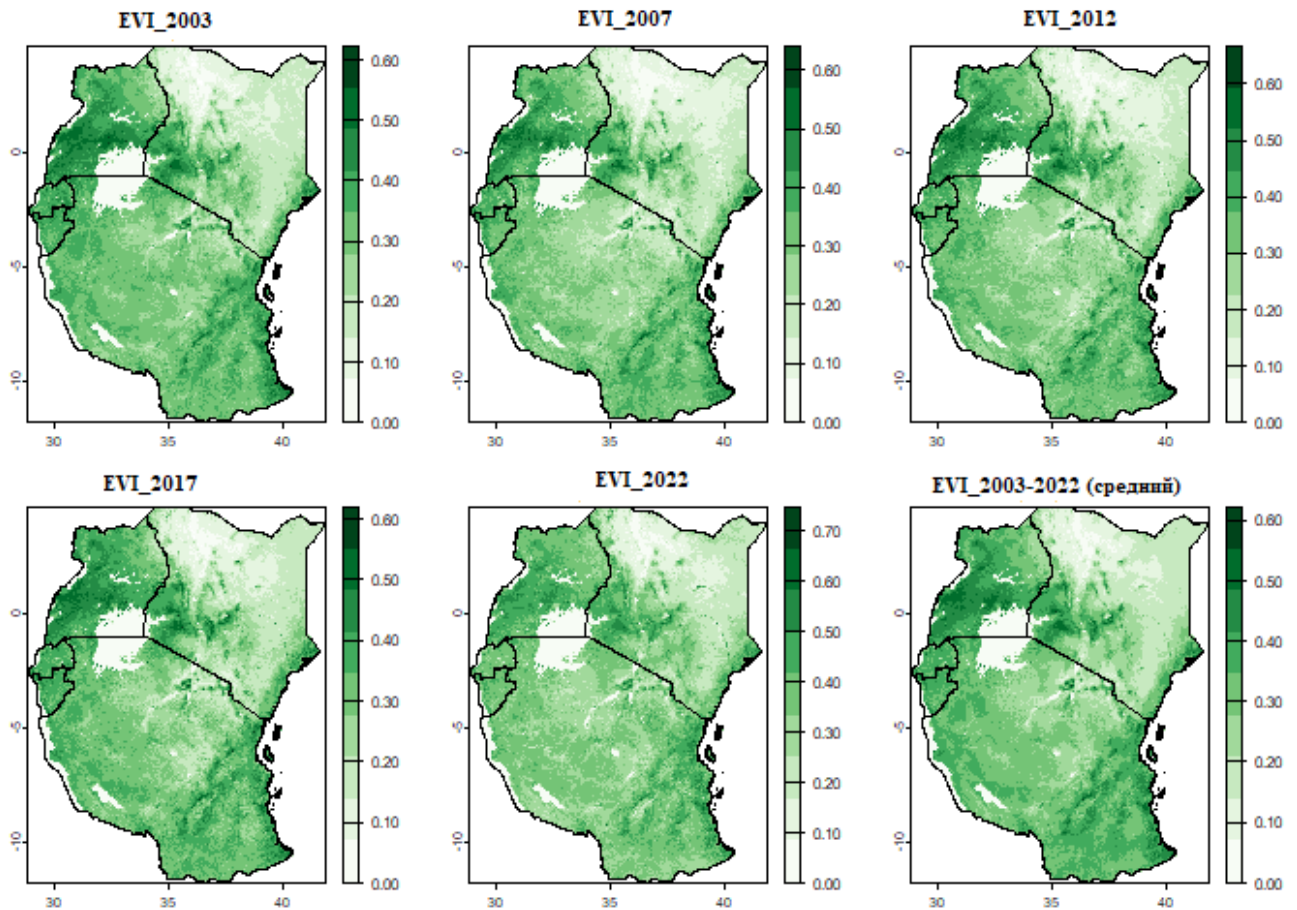


Рисунок 21 – Пространственное и временное распределение улучшенного вегетационного индекса

Сводная статистика переменных, использованных в данном исследовании, представлена в таблице 9 (среднее значение $\pm$ стандартное отклонение). Средние значения были получены за 20 лет (2003–2022 гг.). Самый высокий показатель EVI наблюдается в Бурунди и Руанде ($0,34 \pm 0,01$), за ними следуют Уганда ($0,33 \pm 0,01$) и Танзания ($0,30 \pm 0,01$), а самый низкий EVI наблюдается в Кении ($0,22 \pm 0,02$). В Руанде наблюдалась самая высокая концентрация $\text{ТЧ}_{2,5}$; SO_2 и CO ; а O_3 – в Танзании и Кении по сравнению с другими странами в районе исследования.

Самый высокий уровень смертности от инсульта был отмечен в среднем в Руанде ($779,16 \pm 123,31$ смертей на 100 000 человек), на втором месте – Бурунди ($776,47 \pm 81,69$ смертей на 100 000 человек), а самый низкий уровень заболеваемости - в Кении ($584,52 \pm 19,37$ смертей на 100 000 человек).

Таблица 9 – Сводная статистика (среднее $\pm$ стандартное отклонение) по странам для переменных, использованных в данном исследовании

Переменные	Бурунди	Кения	Руанда	Танзания	Уганда
Инсульт (случаи)	$776,47 \pm 81,69$	$584,52 \pm 19,37$	$779,39 \pm 123,31$	$658,11 \pm 26,52$	$638,07 \pm 90,25$
EVI (индекс)	$0,34 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,01$	$0,30 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,01$
ТЧ _{2,5} (мкг/м ³)	$36,38 \pm 3,22$	$22,05 \pm 1,36$	$37,59 \pm 3,32$	$22,94 \pm 4,13$	$32,11 \pm 2,85$
SO ₂ (мкг/м ³)	$0,79 \pm 0,13$	$0,23 \pm 0,01$	$1,13 \pm 0,38$	$0,18 \pm 0,08$	$0,44 \pm 0,10$
O ₃ (мкг/м ³)	$80,44 \pm 2,82$	$83,14 \pm 2,94$	$80,05 \pm 2,96$	$83,16 \pm 2,67$	$81,63 \pm 3,10$
CO (мкг/м ³)	$152,05 \pm 6,91$	$90,71 \pm 2,37$	$155,64 \pm 12,34$	$108,52 \pm 4,51$	$128,57 \pm 6,65$
Температура (°C)	$20,69 \pm 0,20$	$25,25 \pm 0,21$	$19,46 \pm 0,21$	$23,03 \pm 0,20$	$23,47 \pm 0,28$
Осадки (ММ/Г)	$1251,60 \pm 137,85$	$750,72 \pm 143,41$	$1172,91 \pm 132,87$	$964,82 \pm 128,51$	$1297,18 \pm 126,55$

Примечание. Случаи инсульта - смертность на 100 000 человек

В таблице 10 представлена корреляционная матрица Пирсона для переменных, использованных в данном исследовании. Было отмечено, что между всеми переменными в данном исследовании существует слабая корреляция. Показатели смертности от инсульта на 100 000 человек отрицательно коррелируют с EVI и O₃, что отражает общее снижение смертности от инсульта при увеличении этих переменных. Более того, корреляционная матрица показывает, что в целом смертность от инсульта увеличивается с ростом концентрации ТЧ_{2,5} и SO₂ в регионе. В то же время EVI отрицательно коррелирует с O₃ и SO₂, и положительно – с остальными концентрациями загрязнителей воздуха в регионе. Пространственные корреляции между EVI и загрязнителями воздуха, представляющими интерес в данном исследовании, показаны на рисунки 20 и 21.

На большей части территории Восточной Африки концентрации $\text{ТЧ}_{2,5}$ и CO положительно коррелируют с EVI .

Таблица 10 – Корреляционная матрица для переменных, использованных в данном исследовании

	Инсульт	EVI	$\text{ТЧ}_{2,5}$	SO_2	O_3	CO	Температура	Осадки
Инсульт	1							
EVI	-0,351*	1						
$\text{ТЧ}_{2,5}$	0,468**	0,090	1					
SO_2	0,345*	-0,055	-0,244	1				
O_3	-0,448**	-0,290	-0,417	-0,184	1			
CO	0,027	0,214	0,131	-0,029	-0,014	1		
Температура	-0,162	-0,100	-0,539**	0,054	0,364*	-0,207	1	
Осадки	-0,612***	0,560**	-0,293	0,039	-0,023	-0,245	0,228	1

Примечание – Статистическая значимость: *значимо на уровне 10%, **значимо на уровне 5% и ***значимо на уровне 1%.

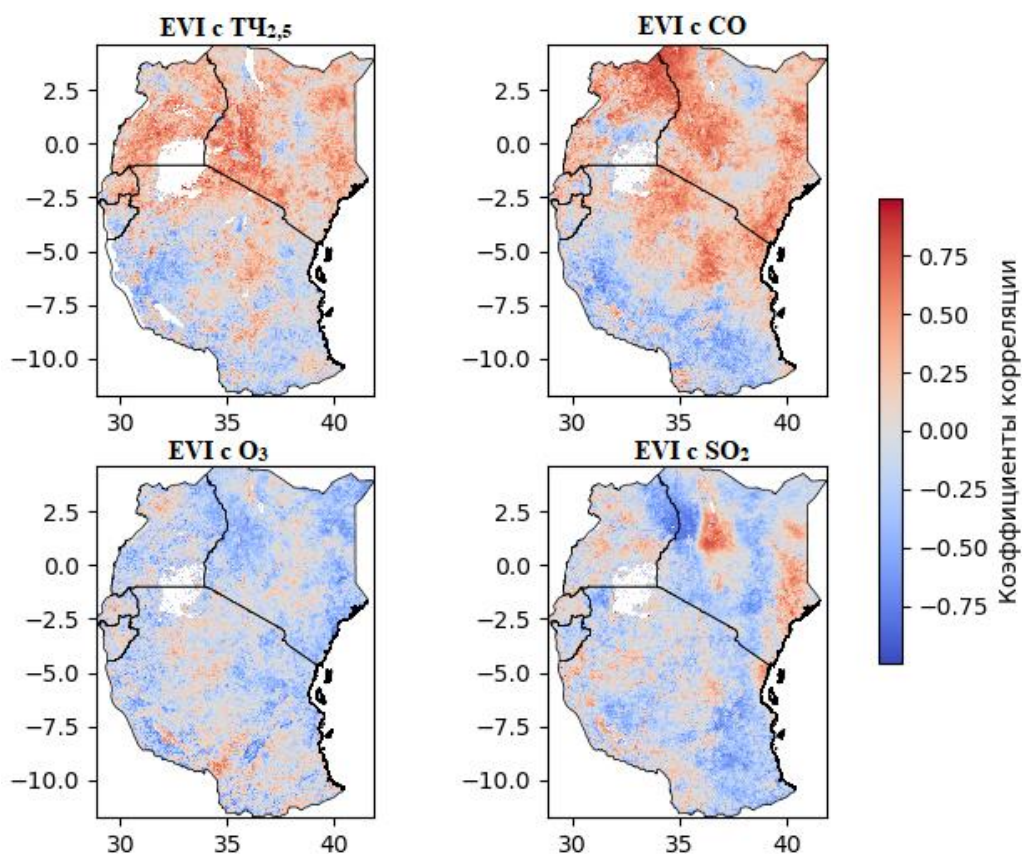


Рисунок 22 – Пространственная корреляция между EVI и загрязнителями воздуха

Наибольшая положительная корреляция между $\text{ТЧ}_{2,5}$ и EVI наблюдается на юго-востоке Уганды, юго-западе Кении и в восточной части Руанды. CO в основном положительно коррелирует в северной части Танзании и почти на всей территории Кении, Уганды и Руанды. O_3 и EVI отрицательно коррелируют почти на всех точках территории. SO_2 и EVI не демонстрируют пространственной корреляции на большей части территории.

Таблица 11 – Основные статистические показатели по результатам линейных регрессионных моделей оценки зависимости уровня смертности от загрязнения воздуха и озеленённости территории для всей популяции (20 лет спустя).

Переменные	Коэф.	Ст. ошибка	t-стат.	p- знач.	Ниже 95%	Верхние 95%
Свободный член	909,78	183,19	4,97	0,00	516,88	1302,68
EVI	-845,57	295,96	-2,86	0,01	-1480,35	-210,79
$\text{ТЧ}_{2,5}$	3,06	1,25	2,44	0,03	0,37	5,75
SO_2	139,28	64,33	2,17	0,05	1,31	277,26
O_3	-4,53	2,64	-1,71	0,11	-10,20	1,14
CO	0,46	0,96	0,48	0,64	-1,60	2,53
Температура	5,62	21,38	0,26	0,80	-40,59	51,83
Осадки	0,01	0,03	0,37	0,37	-0,05	0,07

Примечание – Статистическая значимость модели определяется $R^2 = 0,66$ и F-статистикой = 5,44, значимость составляет 0,6%.

Дальнейшая оценка влияния загрязнения воздуха и озеленённости территории на уровень смертности от инсульта была проведена с помощью линейных регрессионных моделей. Согласно результатам моделирования (Таблица 11), увеличение EVI приводит к снижению смертности от инсульта, причём каждое увеличение EVI на единицу приводит к снижению смертности на $845,57 \pm 295,96$ случаев на 100 000 человек. $\text{ТЧ}_{2,5}$ и SO_2 прогнозируют увеличение смертности от инсульта. Увеличение концентрации SO_2 на 1 мкг/м^3 приведёт к увеличению смертности от инсульта на $139,28 \pm 64,33$ смертей на 100 000 человек, а увеличение

концентрации $\text{ТЧ}_{2,5}$ на 1 мкг/м^3 приведёт к $3,06 \pm 1,25$ смертей на 100 000 человек. Более того, O_3 действует в пользу снижения смертности, в то время как СО не оказывает значительного влияния на распространённость смертности от инсульта в регионе.

На взаимосвязь между загрязнением воздуха и вредом для здоровья существенно влияет возраст людей. Различные возрастные группы, такие как дети, взрослые и пожилые люди, демонстрируют разный уровень уязвимости к загрязнению воздуха из-за различий в физиологии, воздействии и состоянии здоровья. Кроме того, показатели смертности от инсульта в разных возрастных группах также существенно различаются из-за различных факторов, включая устойчивость, распространённость факторов риска и исходные состояния здоровья. Среди детей и подростков смертность от инсульта очень низкая. У молодых взрослых (20–39 лет) инсульты чаще всего вызваны врождёнными заболеваниями, образом жизни и травмами. У взрослых (40–59 лет) смертность от инсульта возрастает. Сочетание факторов образа жизни, гипертонии, диабета и гиперлипидемии становится преобладающим, а атеросклероз и болезни сердца начинают играть более значительную роль. В пожилом (60–79 лет) и старческом (80+ лет) возрасте смертность от инсульта наиболее высока. Возрастные факторы, такие как длительная гипертония, и другие факторы риска способствуют увеличению смертности от инсульта в этих возрастных группах (Li и др., 2023).

Для оценки влияния загрязнения воздуха и EVI на распространённость смертности от инсульта мы разбили случаи смертности от инсульта по возрастным группам (от молодых взрослых и более старших групп населения) и выбрали линейную регрессионную модель. В таблице 12 приведены результаты коэффициентов линейной регрессии для каждой возрастной группы и переменной. Результаты показывают, что смертность от инсульта отрицательно связана с EVI и СО для возрастной группы от 20 до 59 лет, отрицательно связана с EVI и концентрацией O_3 для возрастной группы от 70 и старше, и положительно связана с другими загрязнителями воздуха, соответственно. Эта связь статистически

значима для $\text{ТЧ}_{2,5}$ и SO_2 для всех возрастных групп и значима для EVI у пожилых и старых людей (60 лет и старше).

Таблица 12 – Коэффициенты линейной регрессии для оценки влияния загрязнения воздуха и озеленённости территории на частоту смертности от инсульта в разных возрастных группах

Переменные	β (20–29)	β (30–39)	β (40–49)	β (50–59)	β (60–69)	β (70–79)	β (80+)
Свободный член	0,64 (3,99)	0,47 (12,80)	-15,71 (59,83)	-41,11 (193,81)	283,27 (364,02)	1492,51*** (433,93)	3416,74*** (481,58)
EVI	-9,18* (6,45)	-26,02 (20,68)	-90,63 (96,66)	-290,73 (313,13)	-1026,35* (588,13)	-2133,93** (701,07)	-2333,86** (705,98)
$\text{ТЧ}_{2,5}$	0,05* (0,03)	0,17* (0,09)	0,77* (0,41)	2,38* (1,33)	5,44** (2,49)	7,77** (3,01)	6,03* (3,30)
SO_2	4,28*** (1,40)	13,44** (4,89)	60,19*** (21,01)	12,87*** (68,06)	388,67*** (136,47)	426,21** (152,38)	130,53 (169,12)
O_3	0,05 (0,06)	0,17 (0,18)	0,98 (0,86)	3,17 (2,80)	0,25 (5,25)	-8,10 (6,26)	-21,69** (6,95)
CO	0,00 (0,02)	0,00 (0,07)	-0,05 (0,31)	-0,13 (1,02)	0,40 (1,91)	1,45 (2,28)	1,71 (2,53)
R^2	0,50	0,48	0,44	0,43	0,54	0,68	0,68
Значимость F	2,79*	2,58*	2,22*	2,15*	3,24**	6,03***	5,98***

Примечание – Статистическая значимость: *значимо на уровне 10%, **значимо на уровне 5% и ***значимо на уровне 1%.

Из результатов моделирования можно заметить, что влияние EVI на количество случаев смерти от инсульта увеличивается с возрастом. Анализ статистического моделирования показал, что увеличение на одну единицу среднегодового EVI может привести к снижению смертности от инсульта на $9,18 \pm 6,45$ смертей на 100 000 человек в возрасте от 20 до 29 лет, в то время как это число уменьшается на $2333,86 \pm 705,98$ смертей на 100 000 человек в возрасте старше 80 лет. Эта тенденция проявляется и в отношении других загрязнителей воздуха, таких как $\text{ТЧ}_{2,5}$ и SO_2 . Кроме того, O_3 , по-видимому (без статистической значимости, р-значение $> 0,05$), увеличивает смертность от инсульта в возрастной группе от 20 до

69 лет, а также снижает смертность в возрастной группе от 70 лет и старше (статистической значимо, p -значение $< 0,05$). Для концентраций СО это явление обратимо, хотя статистической значимости для оценок СО для всех возрастных групп нет.

4.3 Сокращение продолжительности жизни из-за загрязнения воздуха

Ожидаемая продолжительность жизни при рождении часто используется как показатель общего показателя здоровья населения. Удобство базовых медицинских услуг, повышение рождаемости, конкретные действия, направленные на снижение материнской и детской смертности, а также достижения в сокращении инфекционных заболеваний — все это способствовало увеличению продолжительности здоровой жизни в африканских странах (WHO, 2022). Однако продолжительность жизни человека в странах Африки к югу от Сахары по-прежнему ниже, чем в других частях мира (Liou и др., 2020). Используя тот же набор данных, что и в разделе 3.5, мы оценили сокращение ожидаемой продолжительности жизни при рождении среди населения Восточной Африки в результате стрессовых факторов окружающей среды, чтобы выявить роль плохого качества воздуха в зарегистрированной продолжительности жизни. Мы использовали стандартную методологию составления таблиц продолжительности жизни и рассчитали сокращённые таблицы продолжительности жизни при сценарии «как обычно», а затем использовали сценарий устранения смертей, вызванных загрязнением воздуха и другими экологическими стрессорами. Исходя из гипотезы, что полное устранение некоторых причин смерти является маловероятным событием, мы предположили одновременное и постепенное устранение соответствующих причин смерти и рассчитали итоговые таблицы жизни.

4.3.1 Стандартные функции таблицы смертности

Мы приняли стандартную методологию таблиц смертности (Tsai, Lee, Hardy, 1978) и рассчитали сокращённые таблицы смертности с возрастными интервалами

от 0 до 1, от 1 до 4, а затем с интервалами в 5 лет (от 5 до 100 лет). Для каждого возрастного интервала мы оценили вероятность смерти в течение возрастного интервала продолжительностью n лет между возрастом x и возрастом $x + n$ используя уравнение (9).

$${}_nq_x = \frac{{}_nm_x \times n}{1 + (1 - \alpha_x) \times {}_nm_x \times n} \quad (9)$$

где ${}_nm_x$ обозначает коэффициент смертности для внутреннего возраста x и $x + n$; и α_x представляет собой долю продолжительности возрастного интервала, в течение которой средний умирающий член группы выживает в возрасте x . Мы предположили, что это происходит в середине каждого возрастного интервала ($\alpha_x = 0,5$).

Число выживших l_x от исходной группы таблицы смертности в 100 000 живорождений к началу каждого возрастного интервала рассчитывалось с использованием уравнения (10).

$$l_x = \begin{cases} 100\,000 ; & \text{for } x = 0 \\ l_{x-1}(1 - {}_nq_x) ; & \text{for } x > 0 \end{cases} \quad (10)$$

Соотношение, выраженное в уравнении 10, подразумевает, что популяция, которая ещё жива в начале возрастного интервала x , зависит от количества особей, которые были живы в начале предыдущего возрастного интервала ($x - n$), и доли членов, переживших следующий возраст. интервал. Число прожитых человеко-лет в когорте таблицы смертности с возрастным интервалом x до $x + n$ определяется уравнением 11. Это общее количество лет, прожитых между двумя указанными днями рождения всеми людьми, достигшими более раннего дня рождения.

$${}_nL_x = \frac{{}_nd_x}{{}_nm_x} \quad (11)$$

где ${}_nd_x$ – количество смертей, происходящих между возрастами x и $x + n$.

Наконец, ожидаемая продолжительность жизни в данном возрастном интервале оценивалась путём деления общего числа человеко-лет, которые будут прожиты старше возраста, x на количество людей, доживших до этого возрастного интервала (уравнение 12).

$$e_x = \frac{\sum nL_x}{l_x} \quad (12)$$

Чтобы вычислить таблицы смертности, исключая конкретные причины смерти, мы сначала оценили вероятности выживания с i^{th} исключённой причиной, используя уравнение 13:

$${}_np_x^i = {}_np_x^{(1-\pi_i \cdot {}_nr_x)} \quad (13)$$

где π_i – это коэффициент улучшения ($0 \leq \pi_i \leq 1$), а ${}_nr_x$ – это отношение уровня смертности от i^{th} интересующего фактора риска к уровню смертности от всех факторов, математически выраженное в уравнении 14.

$${}_nr_x = \frac{{}_nd_x^i}{{}_nd_x} \quad (14)$$

Коэффициент улучшения позволил нам оценить частичное ($\pi_i < 1$) или полное ($\pi_i = 1$) устранение причины факторов риска (Tsai, Lee, Hardy, 1978). После оценки вероятности смерти между возрастными x и $x + n$, мы применили методологию, предложенную Ариас и др. (2013) (Arias, Heron, Tejada-Vera, 2013) для расчёта таблиц смертности с устранением причин и всех других связанных функций. Используя этот подход, мы оценили влияние стрессоров окружающей среды на сокращение продолжительности жизни человека в каждой стране. Увеличение ожидаемой продолжительности жизни рассчитывалось путём создания разницы между таблицей смертности по всем причинам и таблицей смертности после исключения конкретной причины смерти.

4.3.2 Оценка ожидаемой продолжительности жизни при рождении с учётом причин смертности

Ожидаемая продолжительность жизни при рождении без устранения причины, по оценкам на 2021 год, составила 66,38 года в Руанде, 65,46 – в Кении, 64,70 – в Танзании, 63,36 – в Бурунди и 62,23 – в Уганде (рисунок 23). Это представляет собой снижение по сравнению с 2019 годом, когда соответствующие показатели оценивались в 68,58 лет в Руанде, 67,03 – в Танзании, 66,50 – в Кении, 66,08 – в Уганде и 63,76 – в Бурунди, в основном из-за воздействия пандемии COVID-19. Эти результаты в среднем на 99,8% совпадают с оценками ИНМЕ (Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), 2024), хотя использовались разные подходы.

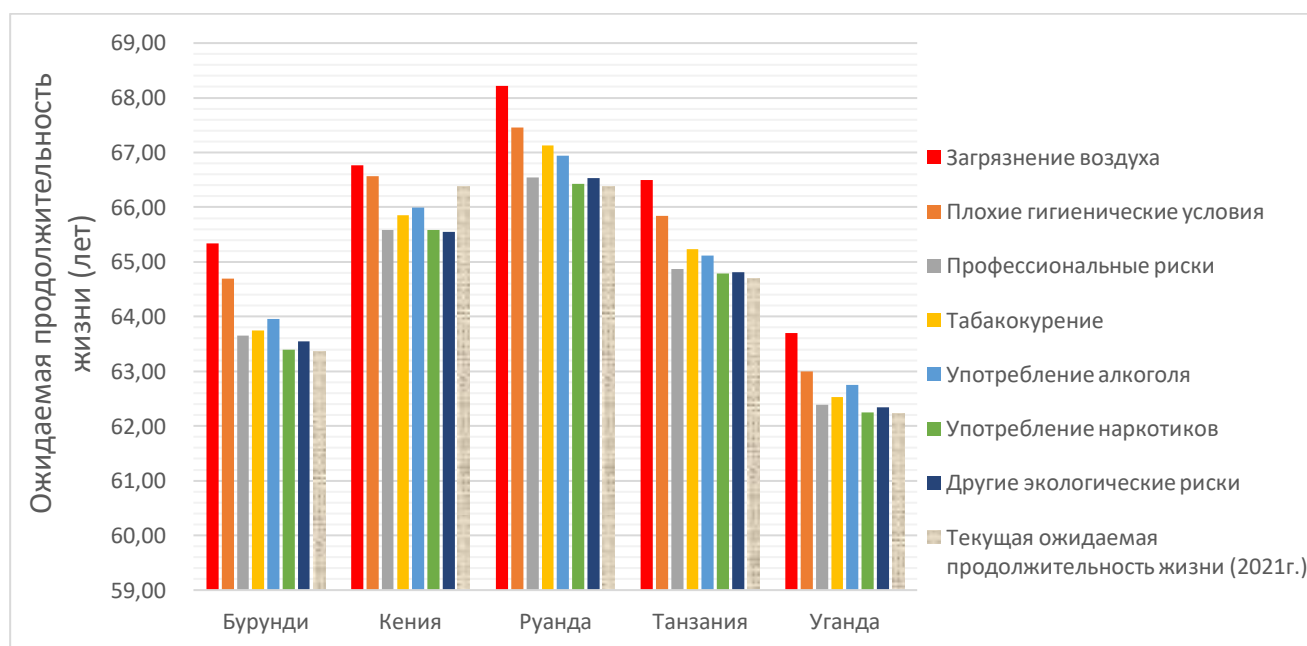


Рисунок 23 – Прогнозируемая ожидаемая продолжительность жизни при рождении после 100% устранения конкретных причин смерти

В таблице 13 представлены ожидаемая продолжительность жизни при рождении и количество лет, набранных всем населением после полного исключения смертей, обусловленных экологическими и поведенческими

факторами. Потенциальное увеличение продолжительности жизни во всех странах будет происходить за счёт полного устранения смертности, связанной с загрязнением воздуха (окружающие твёрдые частицы, окружающий озон и бытовое загрязнение воздуха); за которыми следуют плохая гигиена (небезопасные источники воды, небезопасные санитарные условия и отсутствие доступа к средствам для мытья рук) и употребление табака.

Таблица 13 – Увеличение продолжительности жизни благодаря устранению экологических и поведенческих факторов риска (лет)

Факторы риска	Бурунди		Кения		Руанда		Танзания		Уганда	
	<i>ПЖ</i>	Δ <i>ПЖ</i>	<i>ПЖ</i>	Δ <i>ПЖ</i>	<i>ПЖ</i>	Δ <i>ПЖ</i>	<i>ПЖ</i>	Δ <i>ПЖ</i>	<i>ПЖ</i>	Δ <i>ПЖ</i>
Загрязнение воздуха	65,34	1,97	66,76	1,31	68,22	1,84	66,50	1,80	63,70	1,48
Плохие гигиенические условия	64,69	1,32	66,57	1,11	67,45	1,07	65,84	1,14	62,99	0,77
Профессиональные риски	63,65	0,29	65,58	0,13	66,54	0,16	64,87	0,17	62,39	0,17
Употребление табака	63,75	0,39	65,85	0,40	67,13	0,74	65,24	0,53	62,53	0,31
Употребление алкоголя	63,96	0,59	66,00	0,54	66,95	0,56	65,11	0,41	62,75	0,52
Употребление наркотиков	63,39	0,03	65,58	0,13	66,42	0,04	64,79	0,09	62,25	0,02
Другие экологические риски	63,55	0,18	65,55	0,10	66,54	0,15	64,82	0,11	62,35	0,12

Примечание – Здесь, *ПЖ* представляет собой ожидаемую продолжительность жизни и, Δ *ПЖ* представляет собой изменение ожидаемой продолжительности жизни.

Если бы можно было полностью исключить смертность от бытового загрязнения воздуха, твёрдых частиц и озона, то прирост ожидаемой продолжительности жизни при рождении должен был бы составить в Бурунди – 1,94 года, в Руанде – 1,84 года, в Танзании – 1,80 года, в Уганде – 1,48 года и Кении – 1,31 года, соответственно, как показано в таблице 13.

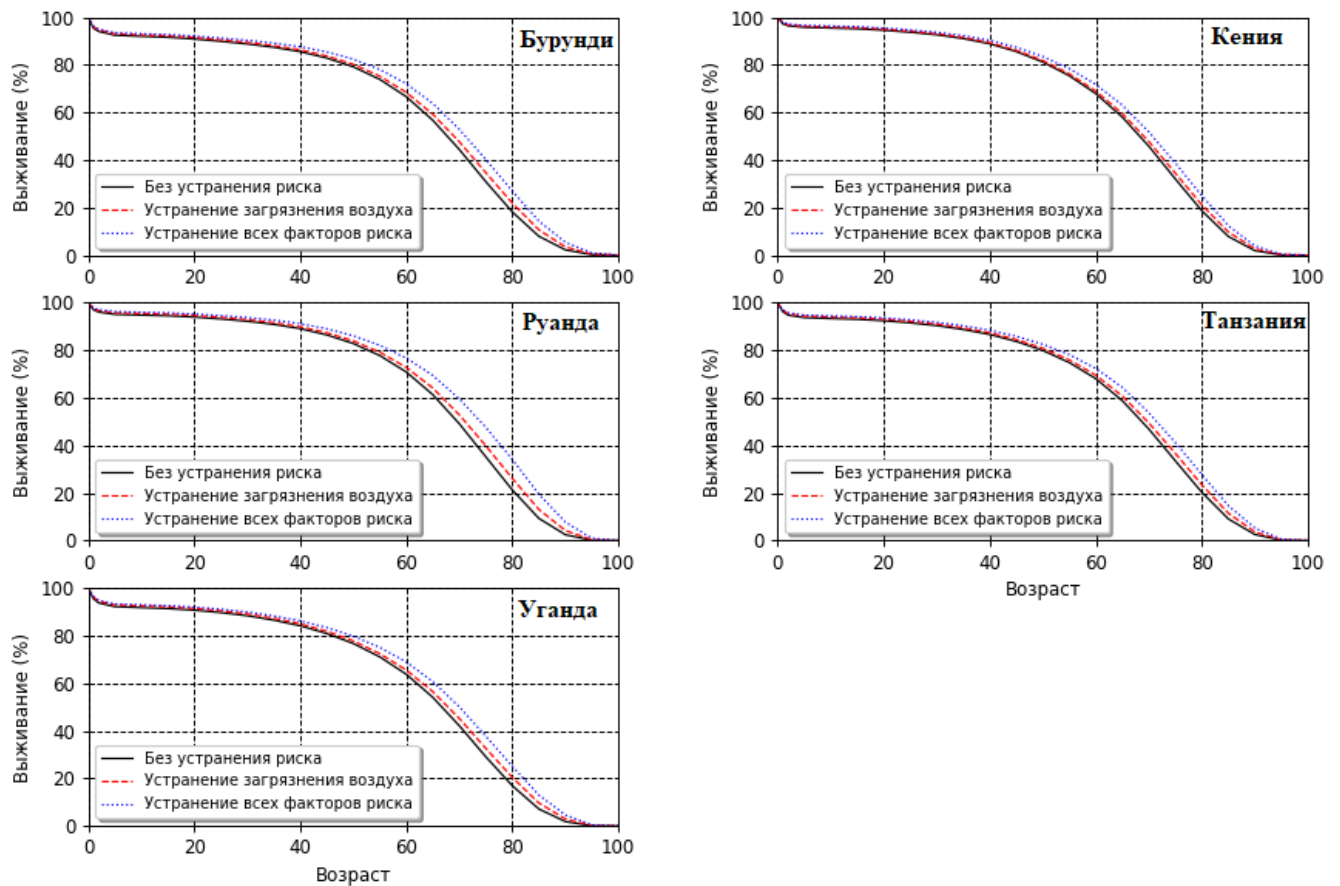


Рисунок 24 – Типичные кривые выживаемости для обычного сценария развития событий (сплошные черные линии), исключения смертей, связанных с загрязнением воздуха (пунктирные красные линии) и устранения всех причин (пунктирные синие линии) в пяти исследованиях в Восточной Африке

Чтобы устранить эти ограничения, мы предположили сценарий, при котором происходит устранение на 25% и 50% каждого из рассматриваемых факторов риска. В таблице 14 представлены приросты ожидаемой продолжительности жизни при рождении после устранения 25% и 50% рассматриваемых причин смерти соответственно. Например, результаты показали, что прирост может составить 0,47 года (т.е. 172 дня) в Бурунди, 0,44 года (161 день) в Руанде, 0,43 (157 дня) год в Танзании, 0,36 года (131 день) в Уганде и 0,32 года (117 дней) в Кении после 25% снижение смертности, связанной с загрязнением воздуха.

Таблица 14 – Прирост ожидаемой продолжительности жизни от различных экологических и поведенческих рисков (25% и 50% устранение рисков)

Факторы риска	Бурунди		Кения		Руанда		Танзания		Уганда	
	25%	50%	25%	50%	25%	50%	25%	50%	25%	50%
Загрязнение воздуха	0,47	0,95	0,32	0,64	0,44	0,89	0,43	0,88	0,36	0,72
Плохие гигиенические условия	0,33	0,66	0,28	0,55	0,27	0,53	0,28	0,57	0,19	0,38
Профессиональные риски	0,07	0,14	0,03	0,06	0,04	0,08	0,04	0,08	0,04	0,08
Употребление табака	0,10	0,19	0,10	0,20	0,18	0,36	0,13	0,26	0,08	0,15
Употребление алкоголя	0,15	0,29	0,13	0,27	0,14	0,28	0,10	0,20	0,13	0,26
Употребление наркотиков	0,01	0,02	0,03	0,06	0,01	0,02	0,02	0,05	0,01	0,01
Другие экологические риски	0,05	0,09	0,02	0,05	0,04	0,08	0,03	0,06	0,03	0,06

Наконец, мы предположили экстремальный сценарий, при котором все факторы риска постепенно и одновременно устраняются. Результаты постепенного и одновременного устранения причин смерти представлены на рисунке 25. Рисунок 25 (а) показывает, что ожидаемая продолжительность жизни при рождении увеличится соответственно с 66,38 до 71,44 лет, с 64,70 до 69,32 лет, с 62,23 до 65,87, с 65,46 до 69,45 лет и с 63,36 до 68,68 лет в Руанде, Танзании, Уганде, Кении и Бурунди. Эти величины отражают прирост в 5,31 года в Бурунди, 5,05 года в Руанде, 4,62 года в Танзании, 3,99 года в Кении и 3,64 года в Уганде, как показано на рисунке 25 (б). Эти результаты показывают, что чем выше прирост, тем больший стресс вызывает экологический или поведенческий риск.

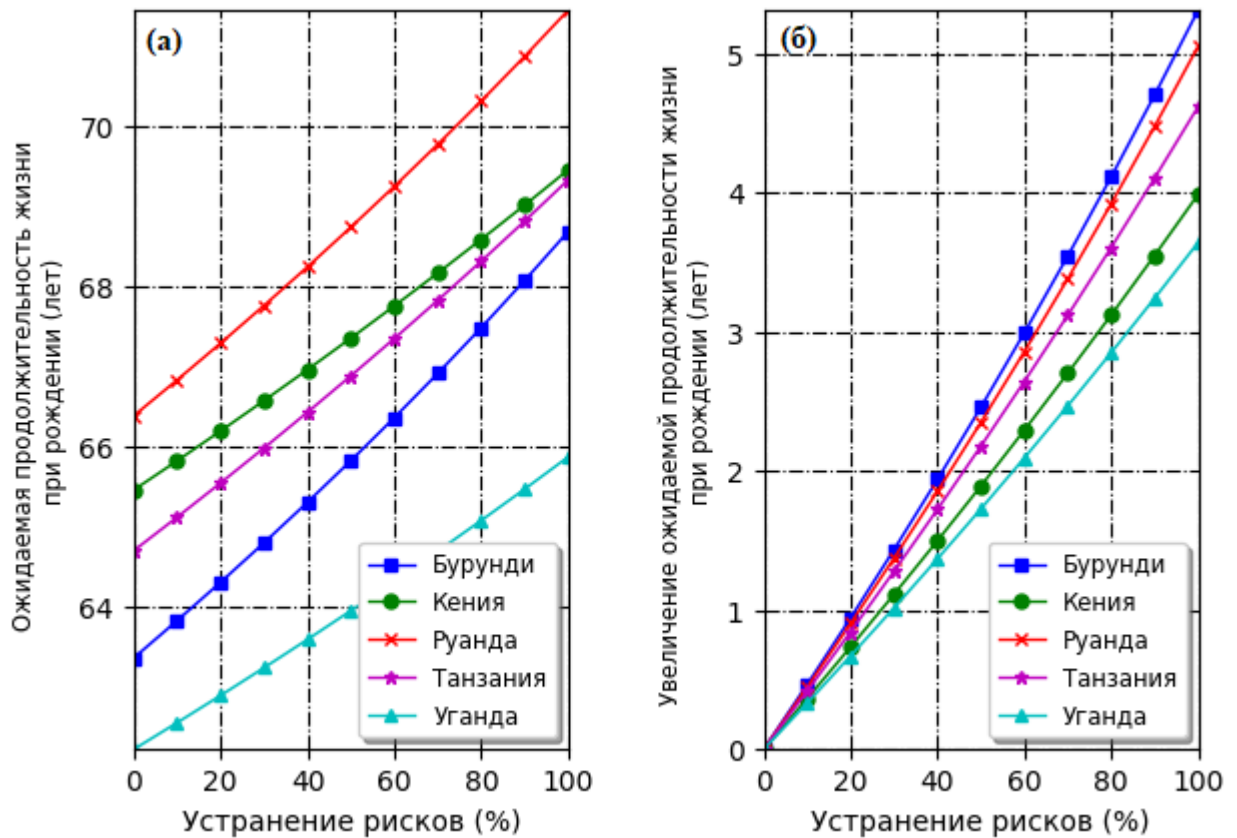


Рисунок 25 – Взаимосвязь прогрессирует, устраняя риски и увеличивая ожидаемую продолжительность жизни при рождении

4.3.3 Зависимость продолжительности жизни от различных причинно-следственных связей. Роль загрязнения воздуха

Анализ, проведённый в предыдущем разделе (раздел 3.6.2), показал, что загрязнение воздуха является одной из причин сокращения продолжительности жизни в странах Восточной Африки среди других факторов экологического стресса. Проблема взаимозависимости между определяющими факторами оказалась одним из ограничений нашего анализа. Цели данного раздела – определить направление взаимодействия между загрязнением окружающей среды, социально-экономическими и поведенческими характеристиками на продолжительность жизни, а также количественно оценить влияние загрязнения воздуха среди других детерминант. Достижения в области медицины, значительный рост производительности сельского хозяйства, а также улучшение

санитарных условий и доступа к чистой воде – все это связано с наблюдаемым улучшением продолжительности жизни во всем мире. К сожалению, риски для здоровья, связанные с загрязнением воздуха и бедствиями, вызванными изменением климата, становятся все более постоянными, особенно в странах с низким и средним уровнем дохода, где стратегии смягчения последствий и адаптации к ним недостаточны. На рисунке 26 представлено сравнение улучшения ожидаемой продолжительности жизни в различных регионах мира с 1950 по 2023 год согласно прогнозам ООН в области мирового населения. Используя «Индикаторы мирового развития» (World Bank, 2024), мы выбрали факторы, которые, влияют на продолжительность жизни человека, и объединили их в категории. Взвешенное по численности населения количество $TC_{2,5}$ было получено от ACAG (Donkelaar Van и др., 2021). Все данные были собраны за период 15 лет (2008–2022 гг.) и проанализированы с использованием метод анализа пути (Path analysis method).

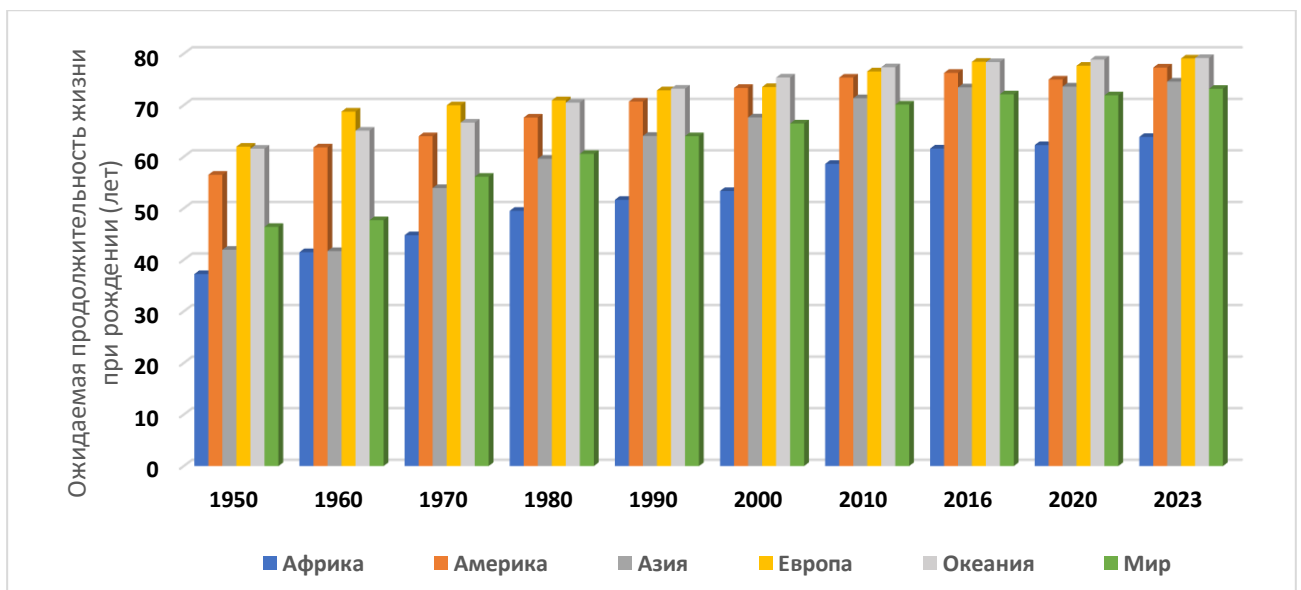


Рисунок 26 – Сравнение улучшения продолжительности жизни в разных регионах мира (World Bank, 2024)

Анализ пути — это статистический метод, используемый в первую очередь для изучения сравнительных оценок прямых и косвенных связей между переменными (Streiner, 2005). Мы оценили направление воздействия социально-

экономических факторов, факторов экологического стресса и поведенческих установок на ожидаемую продолжительность жизни при рождении в пяти странах Восточной Африки. Социально-экономические показатели были представлены Валовым национальным доходом (ВНД) на душу населения в долларах США, уровнем безработицы и общими государственными расходами на здравоохранение. Взвешенные по населению показатели $ТЧ_{2,5}$ и базового уровня доступа к чистой воде для каждой страны были введены в модели как репрезентативные показатели состояния загрязнения окружающей среды, а потребление алкоголя (в литрах чистого спирта) обозначало как рискованный поведенческий стрессор для здоровья. В таблице 15 представлена сводная статистика переменных, выключенных в наш анализ. Согласно данным ГВБ (World Bank, 2024), за 15 лет (2008-2022 гг.) ожидаемая продолжительность жизни при рождении улучшилась во всех заинтересованных странах с 53 лет до 62 лет в Бурунди, с 57 до 63 лет в Кении, с 57 до 66 лет в Руанде, с 56 до 67 лет в Танзании, и от 53 до 63 лет в Уганде, до спада, в основном из-за пандемии COVID-19 (рисунок 27).

Таблица 15 – Описательная статистика переменных, включённых в анализ

Переменные	Средний	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
Расходы домохозяйств на здравоохранение (%)	7,65	1,86	3,14	13,51
Уровень безработицы (%)	4,43	3,71	1,03	11,93
Взвешенные по численности населения $ТЧ_{2,5}$ (мкг/м ³)	30,03	0,94	18,20	43,10
Базовый доступ к воде (%)	51,87	7,60	33,04	62,41
Потребление алкоголя (литров чистого спирта)	8,69	4,19	1,01	15,69
Валовой национальный доход (долл. США на душу населения)	654,14	47,38	74,95	1890,00
Ожидаемая продолжительность жизни при рождении (лет)	60,53	3,46	52,98	66,99

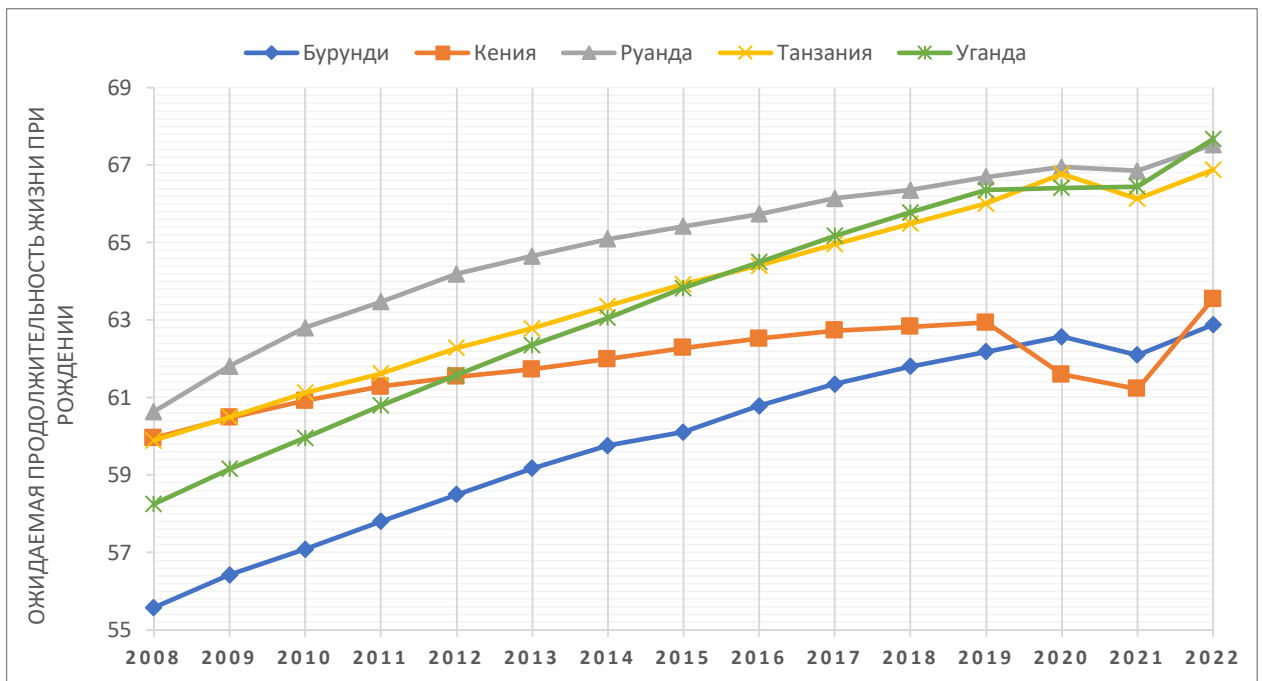


Рисунок 27 – Сравнение улучшения ожидаемой продолжительности жизни при рождении в странах Восточной Африки (World Bank, 2024)

Государственные расходы на здравоохранение являются важнейшим показателем, требующим отслеживания распределения ресурсов, разработки политики в области здравоохранения и обеспечения подотчётности и открытости систем здравоохранения. Достижение всеобщего охвата услугами здравоохранения гарантирует, что каждый человек будет иметь доступ к высококачественному медицинскому обслуживанию, не сталкиваясь с финансовыми трудностями, что в значительной степени зависит от финансирования здравоохранения (Цели в области устойчивого развития (ЦУР 3.8) Цели в области устойчивого развития (ЦУР) Уровень занятости представляет собой долю лиц трудоспособного возраста, которые не имеют работы, ищут работу и прилагают усилия для её поиска. Статус занятости является мерой удовлетворённости стилем благосостояния и здоровья, которые улучшают благосостояние населения и, таким образом, увеличивают его продолжительность жизни. И наоборот, высокий уровень безработицы может наблюдаться в странах с низким уровнем бедности и высоким уровнем экономического развития, тогда как низкий уровень безработицы может скрывать значительную бедность в стране. ВНД представляет собой сумму добавленной

стоимости всех производителей – резидентов, налогов на продукцию (за вычетом субсидий) и чистых поступлений базового дохода (компенсации работникам и доходы от собственности) из-за границы. Существует сильная положительная корреляция между продолжительностью жизни и доходом нации (Скипин и др., 2022).

4.3.3.1 Функции анализа пути

Анализ путей используется для разложения двумерного анализа и измерения различных эффектов путём исследования связи между переменной ответа и более чем одной независимой переменной. Он представляет собой разновидность стандартизированного множественного регрессионного анализа и в основном используется для разложения коэффициента корреляции на прямой, косвенный и общий эффекты, чтобы проверить относительную важность каждой причинной переменной и проверить концептуальную модель пути на адекватность и простоту. Анализ коэффициентов пути измеряет все величины и взаимосвязи между переменными. В двумерном анализе коэффициент корреляции Пирсона используется для анализа линейной связи между переменными и определяется уравнением (15).

$$r = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (15)$$

где x_i, y_i отдельные точки выборки индексируются i , и n – это размер выборки.

Коэффициент варьируется между -1 и +1, где +1 указывает на сильную положительную корреляцию и -1 сильную отрицательную корреляцию, но 0 подразумевает отсутствие связи между переменными. При анализе путей корреляция Пирсона между предиктивными переменными и предсказываемыми представляет собой общую связь эффекта и бивариационного анализа между экзогенными переменными. Таким образом, коэффициенты корреляции Пирсона

используются для изучения направления, силы и значимости линейных связей между переменными. В таблице 16 представлена матрица корреляции между оцениваемыми переменными. Согласно результатам, ожидаемая продолжительность жизни значительно положительно коррелирует с расходами на здравоохранение, базовым доступом к чистой воде и валовым национальным доходом. В то время как взвешенные по населению показатели $ТЧ_{2,5}$ и потребления алкоголя демонстрируют отрицательную связь с ожидаемой продолжительностью жизни при рождении. В то же время валовой национальный доход значительно отрицательно коррелирует с потреблением алкоголя и воздействием загрязнения воздуха.

Таблица 16 – Корреляционная матрица (Полная ассоциация анализа пути)

Переменные	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
Расходы домохозяйств на здравоохранение (X ₁)	1						
Уровень безработицы (X ₂)	0,164	1					
Взвешенные по численности населения $ТЧ_{2,5}$ (X ₃)	-0,111	0,410**	1				
Базовый доступ к чистой воде (X ₄)	-0,080	0,195	0,177	1			
Потребление алкоголя (X ₅)	-0,077	0,088	0,336 **	-0,580**	1		
Валовой национальный доход (X ₆)	-0,042	-0,206	-0,526**	0,476	-0,487*	1	
Ожидаемая продолжительность жизни при рождении (X ₇)	0,147*	0,380	-0,180*	0,561	-0,122**	0,502 **	1

Примечание – Статистически значимо: **p < 0,01, *p < 0,05.

Однако в таких странах, как Кения и Руанда, уровень безработицы высок, но и ожидаемая продолжительность жизни выше, в то время как в других странах, таких как Бурунди, где отмечается более низкая ожидаемая продолжительность жизни, уровень безработицы также ниже. Это привело к тому, что уровень

безработицы положительно коррелирует с ожидаемой продолжительностью жизни при рождении. Эта взаимосвязь между ожидаемой продолжительностью жизни и уровнем безработицы требует дополнительных исследований, чтобы выявить ее реальные причины. Ещё одно наблюдение должно также касаться того факта, что воздействие загрязнения воздуха отрицательно коррелирует с жизненно важными показателями благосостояния и здоровья, такими как валовой национальный доход, расходы на здравоохранение и ожидаемая продолжительность жизни при рождении. Исходя из причинно-следственных отношений переменных, зависимые переменные были разделены на экзогенные и эндогенные. К экзогенным переменным относились расходы на здравоохранение, уровень безработицы, взвешенное по населению содержание $\text{ТЧ}_{2,5}$, базовый доступ к чистой воде и потребление алкоголя. Эндогенной переменной был валовой национальный доход.

Основная цель данного анализа заключалась в построении модели путей, которая визуализирует причины и взаимосвязи между загрязнением воздуха, поведенческими стрессорами и социально-экономическими и медицинскими детерминантами продолжительности жизни в регионе Восточной Африки. Предполагается, что каждая переменная в модели рекурсивного пути зависит от каждой предыдущей переменной-причины. В целом модель определяется уравнением (16) (Alwin, Hauser, 1975).

$$\begin{cases} X_6 = R_{6,1}X_1 + R_{6,2}X_2 + R_{6,3}X_3 + R_{6,4}X_4 + R_{6,5}X_5 + R_{6,u}Q_u \\ X_7 = R_{7,1}X_1 + R_{7,2}X_2 + R_{7,3}X_3 + R_{7,4}X_4 + R_{7,5}X_5 + R_{7,6}X_6 + R_{7,v}Q_v \end{cases} \quad (16)$$

где: $R_{i,j}$ ($i = 6; 7$; и $j = 1; 2; 3; 4; 5$) – коэффициенты пути, и

Q_k – члены возмущения.

Отношение стандартного отклонения эффекта, относящегося к конкретному источнику, к общему стандартному отклонению эффекта определяется как коэффициент пути. Как случайные возмущения, так и их предикторы независимы друг от друга (Wilcox, 2001). Остаток коэффициентов пути также можно

определить из уравнения регрессии как $\sqrt{1 - R^2}$, с R^2 является нескорректированным коэффициентом множественной корреляции уравнения регрессии для эндогенной переменной, к которой привязан остаточный путь.

4.3.3.2 Оценки коэффициентов анализа пути

На рисунке 28 представлена схематическая диаграмма, влияющая на ожидаемую продолжительность жизни при рождении, смоделированная в этом исследовании. Модели путей состоят из зависимых и независимых переменных, представленных в прямоугольниках. Взаимосвязь между экзогенными переменными обозначена двунаправленными стрелками с коэффициентом, обозначающим ковариацию между ними. Эндогенные переменные имеют прямые стрелки, указывающие на них, и по крайней мере одну прямую стрелку, выходящую на них, в то время как у зависимой переменной все стрелки сходятся к ней, отражая прямой эффект. В результате анализа путей было получено прямое, непосредственное и общее влияние объясняющих переменных, а также различные коэффициенты путей. В Таблице 13 представлена интерпретация влияния этих компонентов на продолжительность жизни. Результаты моделирования показывают, что все прямые эффекты статистически значимы, за исключением влияния потребления алкоголя на валовой национальный доход. Взаимосвязь значима только между валовым национальным доходом (X_1) и расходами на здравоохранение, взвешенными по численности населения $ТЧ_{2,5}$ (X_3) и потреблением алкоголя (X_5).

Следуя моделям путей, представленным на рисунке 23, мы вывели уравнения модели (уравнение (17)), приведённые ниже.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_6 = -0,141X_1 + 0,427X_2 - 0,981X_3 + 0,277X_4 + 0,167X_5 \\ R_{6,12345}^2 = 0,899 \\ X_7 = 0,172X_1 + 0,291X_2 - 0,498X_3 + 0,966X_4 + 0,666X_5 + 0,259X_6 \\ R_{7,123456}^2 = 0,969 \end{array} \right. \quad (17)$$

В таблице 17 показана связь между переменными и влиянием экзогенных и эндогенных переменных на остаточную переменную, которая является ожидаемая продолжительность жизни при рождении. В ней также представлено влияние экзогенной переменной на остаточную переменную через эндогенную переменную. Прямая связь с ожидаемой продолжительностью жизни статистически значима для всех переменных s , а общая связь не является статистически значимой для расходов на здравоохранение (X_1) и потребления алкоголя (X_5).

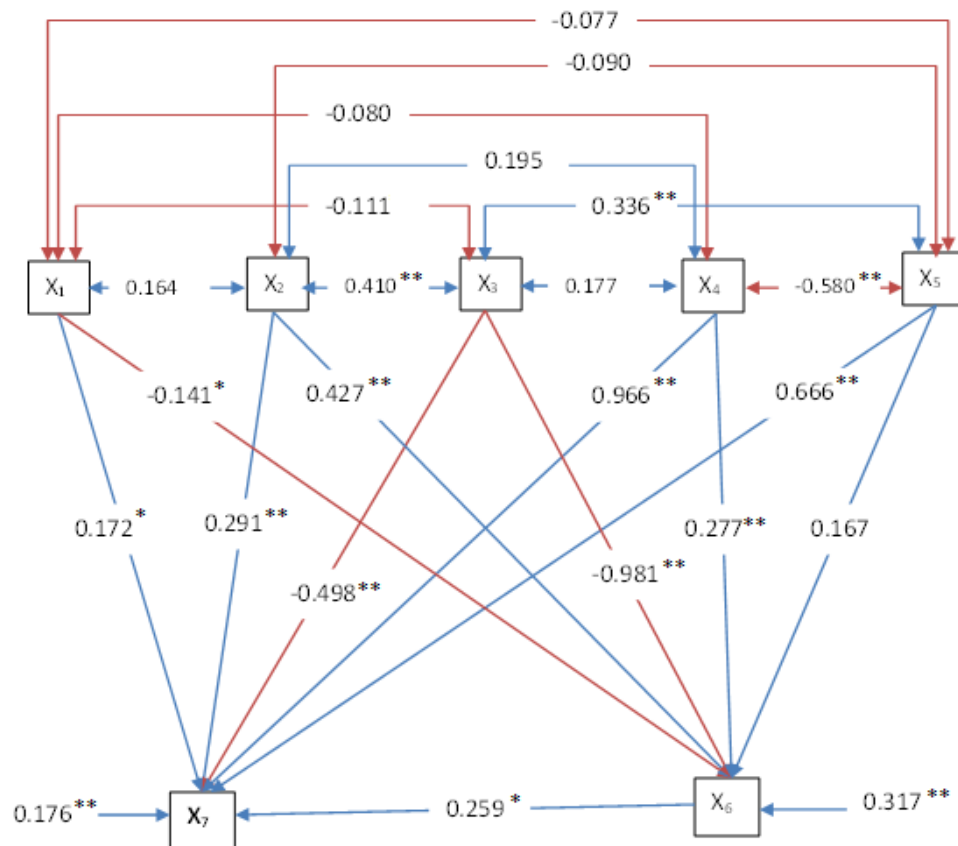


Рисунок 28 – Анализ пути для отношений зависимости. X_1 : расходы на здравоохранение в домашних хозяйствах; X_2 : Уровень безработицы; X_3 :

Взвешенные по численности населения ТЧ_{2,5}; X₄: Базовый уровень доступа к чистой воде; X₅: Употребление алкоголя; X₆: Валовой национальный доход; X₇: Ожидаемая продолжительность жизни рождение. Статистически значимо: **p < 0,001, *p < 0,05

Таблица 17– Влияние независимых переменных на ожидаемую продолжительность жизни при рождении

Эндогенные переменные	Экзогенные переменные	Общий эффект	Непричинный эффект	Косвенный эффект	Прямой эффект	Полная ассоциация
X ₆	X ₁	-0,141*	-0,144	-	-0,141*	0,003
	X ₂	0,427**	0,357	-	0,427**	0,070
	X ₃	-0,981**	-0,296	-	-0,981**	-0,685 **
	X ₄	0,277**	0,176	-	0,277**	0,101
	X ₅	0,167	0,443	-	0,167	-0. 276**
X ₇	X ₁	0,135	-0,012	-0,037	0,172*	0,147
	X ₂	0,402	0,022	0,111	0,291**	0,380 *
	X ₃	-0,752	-0,572	-0,254	-0,498**	-0,180**
	X ₄	1,038	0,477	0,072	0,966**	0,561**
	X ₅	0,709	0,831	0,043	0,666**	-0,122
	X ₆	0,259*	-0,243	-	0,259*	0,502**

Примечание – Коэффициенты эффекта для анализа траектории: X₁: расходы на здравоохранение в домашних хозяйствах; X₂: Уровень безработицы; X₃: Взвешенные по численности населения ТЧ_{2,5}; X₄: Базовый уровень доступа к чистой воде; X₅: Употребление алкоголя; X₆: Валовой национальный доход; X₇: Ожидаемая продолжительность жизни рождение. Статистически значимо: **p < 0,01, *p < 0,05; R²_{ЛЕБ} = 0,825; R²_{ВНД} = 0,683

Результаты анализа путей динамики показывают, что взвешенные по численности населения ТЧ_{2,5} (X₃) оказывают различное прямое влияние на продолжительность жизни (X₇), в то время как все остальные переменные оказывают благоприятное прямое воздействие. Поскольку коэффициенты пути отличаются от коэффициентов корреляции, типичная интерпретация, которую мы

можем дать этим результатам, состоит в том, что увеличение на 1 мкг/м³ среднегодового взвешенного по численности населения ТЧ_{2,5} приведёт к сокращению на 0,498 лет ожидаемая жизнь при рождении. Остальные эффекты можно интерпретировать аналогичным образом. Более того, потребление алкоголя и взвешенные по численности населения ТЧ_{2,5} оказывают различное прямое влияние на валовой национальный доход и косвенное влияние на ожидаемую продолжительность жизни через валовой национальный доход. Ещё одно наблюдение следует сделать в отношении влияния доступа к базовой чистой воде на ожидаемую продолжительность жизни: доступ к базовой питьевой чистой воде сильно и значительно увеличивает ожидаемую продолжительность жизни при рождении.

Анализ пути был проведён для изучения взаимной корреляции между независимыми переменными (экзогенными), выявления их влияния на зависимые переменные (эндогенные) и, таким образом, определения роли воздействия загрязнения воздуха в сокращении ожидаемой продолжительности жизни в восточноафриканском регионе. Двумерный анализ показал, что взвешенный по численности населения показатель ТЧ_{2,5} значимо коррелирует с уровнем безработицы. Расходы на здравоохранение и валовой национальный доход положительно коррелировали с ожидаемой продолжительностью жизни при рождении. Государственные расходы на строительство и поддержку медицинских учреждений вносят значительный вклад в улучшение показателей здоровья, особенно в снижение уровня смертности матерей, новорождённых и детей в возрасте до пяти лет (Vein и др., 2017).

Очевидно, что валовой национальный доход благоприятствует улучшению здоровья и, следовательно, увеличению ожидаемой продолжительности жизни при рождении, что подтверждается двумерным анализом. Кроме того, загрязнение воздуха, а также употребление алкоголя продемонстрировали отрицательную связь с ожидаемой продолжительностью жизни. В то время как население с неблагоприятным социально-экономическим статусом в основном проживает в

местах с более высоким уровнем концентрации загрязнителей воздуха, связанных с горением, включая $\text{TC}_{2,5}$. Исследователи часто подчёркивают защитный эффект умеренного употребления алкоголя от некоторых заболеваний, например, сердечно-сосудистых; однако в большинстве случаев алкоголь усугубляет существующие медицинские расстройства, особенно когда употребление алкоголя связано с рискованным поведением (Yang и др., 2016) и, соответственно, влияет на продолжительность жизни людей.

В итоге наш анализ показал, что воздействие загрязнения воздуха оказывает значительное прямое негативное воздействие как на валовой национальный доход, так и на ожидаемую продолжительность жизни при рождении, а также косвенное негативное влияние на ожидаемую продолжительность жизни за счёт снижения валового национального дохода. Статистически, увеличение взвешенного по численности населения $\text{TC}_{2,5}$ на 1 мкг/м^3 привело к прямому снижению валового национального дохода и ожидаемой продолжительности жизни при рождении на 0,981 доллара США и 0,498 года соответственно. Ожидается, что косвенное воздействие на продолжительность жизни уменьшится на 0,254 года на каждый 1 мкг/м^3 увеличения взвешенного по населению $\text{TC}_{2,5}$, что приведёт к общему уменьшению продолжительности жизни при рождении на 0,752 года на каждый 1 мкг/м^3 увеличения взвешенного по населению $\text{TC}_{2,5}$.

4.4 Воздействие загрязнения воздуха и уровень смертности взрослого населения в странах Восточной Африки

Связь загрязнения воздуха с различными причинами смертности людей всех возрастов и полов очевидна. Мы уже показали, что загрязнение воздуха является причиной вреда для здоровья в регионе, вызываемого различными заболеваниями, включая ишемическую болезнь сердца, инсульт, хроническую обструктивную болезнь лёгких и инфекции нижних дыхательных путей и другие. Позже было обнаружено, что загрязнение воздуха является ключевым фактором, снижающим ожидаемую продолжительность жизни при рождении, поскольку оно напрямую влияет на вред здоровья или ухудшает другие детерминанты здоровья. Основывая

наш анализ на статистике смертности, опубликованной Всемирной организацией здравоохранения за пятнадцать лет (2008-2022 гг.), и показатели развития мировых банков и их партнёров (World Bank, 2024), влияние загрязнения воздуха на смертность взрослого населения было проанализировано с использованием Обобщенного Метода Моментов (ОММ). ОММ оказался предпочтительнее других статистических подходов, так как рассматривалось моделирование с фиксированным эффектом, линейная регрессия или другие статистические методы, известные для анализа панельных данных, из-за присутствия эффекта конкретной страны и запаздывания зависимой переменной или потенциальной эндогенной объясняющих переменных. ОММ оценивает параметр исхода на основе моментов исследуемой популяции и устраняет значительную ошибку, связанную с ненаблюдаемыми неоднородностями или ненаблюдаемыми эффектами в популяции (Wooldridge, 2001), которые часто остаются позади других моделей регрессионного анализа.

ОММ оценивает параметры в статистической модели, где интересующий параметр является конечномерным, тогда как форма функции распределения данных может быть неизвестна и поэтому оценка максимального правдоподобия неприменима (Hansen, 2010). С математической точки зрения выделяют два типа ОММ – оценок: дифференциальный ОММ и системный ОММ. Дифференциальный ОММ анализируется после дифференцирования данных для устранения фиксированных эффектов, в то время как системный ОММ дополняет разностный ОММ, оценивая одновременные различия и уровни (Roodman, 2009). Эндогенные переменные и зависимые переменные с запаздыванием в оригинальном ОММ – оценки, могут быть инструментированы на основе их уровней запаздывания, а экзогенные переменные могут стать инструментами в развитии теории. Поскольку объясняющие факторы постоянны, а запаздывающие уровни переменных являются слабыми инструментами, могут возникнуть смещённые оценки параметров на малых выборках и асимптотически большая дисперсия. (Alonso-Borrego, Arellano, 1999). В отличие от дифференциального ОММ, систематический ОММ-оценки

способен уменьшить систематические ошибки и неточности за счёт использования как запаздывающих уровней, так и запаздывающих разностей (Blundell, Bond, 1998).

Основной объясняющей переменной были мелкие твёрдые частицы ($ТЧ_{2,5}$) как показатель плохого качества воздуха (ПКВ) (World Health Organization, 2020b), но, согласно данным, другие переменные, влияющие на уровень смертности, включают социально-экономические показатели населения. Состояние и динамика Валового внутреннего продукта (ВВП) на душу населения отражают тенденции общего экономического развития страны и образа жизни её населения (Dědeček, Dudzich, 2022). Например, положительное изменение уровня смертности, наблюдаемое в бывшем СССР с середины 1960-х годов, было результатом экономического роста и индустриализации (Andreev, Biryukov, Shaburov, 1994). Несколько исследований связывают данные показатели с изменением доступа к чистой питьевой воде и санитарно-техническим средствам с увеличением ожидаемой продолжительности жизни (Rahman, Rana, Khanam, 2022). Аналогичным образом, уровень смертности в странах с низким и средним уровнем дохода также тесно связан с доступом к чистой питьевой воде и санитарии (Gaffan и др., 2023). Чтобы учесть этот факт, мы включили в нашу модель данные о базовом доступе к санитарии (БДС). Плохие санитарные условия, а также социально-экономическое развитие региона снижают благосостояние людей из-за таких последствий, как тревожность, риск сексуального насилия и упущенные возможности для получения образования и работы (WHO, 2023). Кроме того, существуют данные, подтверждающие связь между уровнем смертности населения и средним уровнем образования (Yasuda, Kinugasa, 2022). Для этого уровень грамотности в стране был представлен в модели как среднее количество лет школьного образования (КЛО).

Предыдущие исследования показали, что страны с более сильным управлением будут проводить политику здравоохранения, благоприятствующую социальным переменам здоровья и потребность в лучшем управлении для

улучшения показателей здоровья растёт (Kaufmann, Kraay, 2014). Мы использовали глобальные показатели управления, а именно: право голоса и подотчётность, политическая стабильность, ненасилие, эффективность правительства, качество регулирования, верховенство закона и борьба с коррупцией. Все эти компоненты оцениваются на основе набора переменных и в конечном итоге преобразуются в стандартизированные индексы в диапазоне от -2,5 до +2,5. Чтобы получить репрезентативную переменную для показателя управления из всех этих показателей, мы применили метод Анализа главных компонентов (АГК) и агрегировали их в один индекс качества управления (ИКУ) вместо того, чтобы сосредоточиться на том или ином конкретном показателе среди шести. Сводная статистика переменных, использованных в этом анализе, представлена в Таблице 18.

Таблица 18 – Краткое описание переменных, использованных в данном анализе

Переменные (единицы измерения)	Наблюдения	Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
Взвешенные по численности населения ТЧ _{2,5} (ПКВ)	120	26,21	8,12	13,60	41,60
Базовый доступ к санитарии (БДС)	119	30,40	16,04	32264,00	71,21
Среднее количество лет обучения КЛО)	120	4,77	1,51	2,03	7,19
Валовой внутренний продукт (ВВП)	116	1056,04	947,64	216,97	5083,83
Индекс качества управления (ИКУ)	120	-0,43	2,08	-3,71	4,54
Уровень женской смертности (УЖС)	120	264,44	48,13	171,20	377,88
Уровень мужской смертности (УМС)	120	344,46	49,46	240,13	448,88

В отличие от предыдущей оценки загрязнения воздуха при определении продолжительности жизни среди других экологических стрессоров (раздел 4.2), в этом разделе анализируется вред смертности, связанный с загрязнением воздуха, в сравнении с другими социально-экономическими показателями.

Корреляционный анализ представлен в таблице 19. Взвешенный по численности населения показатель $ТЧ_{2,5}$ положительно коррелирует с уровнем смертности (оба пола), тогда как все остальные переменные положительно коррелируют с уровнем смертности (оба пола). Все остальные показатели корреляции находятся в ожидаемом направлении, за исключением корреляции между доступом к базовым санитарным услугам и индексом качества управления. Например, существует отрицательная корреляция между $ТЧ_{2,5}$ и базовым доступом к санитарным услугам, средним сроком обучения, валовым внутренним продуктом и индексом качества управления.

Таблица 19 – Корреляционный анализ переменных, рассматриваемых в этом исследовании

Переменные (сокращения)	ПКВ	БДС	КЛО	ВВП	ИКУ	УЖС	УМС
Взвешенные по численности населения $ТЧ_{2,5}$ (ПКВ)	1						
Базовый доступ к санитарии (БДС)	-0,370*	1					
Среднее количество лет обучения КЛО)	-0,494	0,502*	1				
Валовой внутренний продукт (ВВП)	-0,069	0,058	0,176*	1			
Индекс качества управления (ИКУ)	-0,094	-0,035*	0,178	-0,131*	1		
Уровень женской смертности (УЖС)	0,591*	-0,625*	-0,842*	-0,200	-0,297*	1	
Уровень мужской смертности (УМС)	0,470*	-0,519*	-0,831*	-0,223*	-0,200	0,837*	1

Примечание – *Статистическая значимость 5%,

При построении модели ОММ мы предположили, что линейная зависимость между уровнем смертности взрослого населения и загрязнением воздуха определяется уравнением (18).

$$\log(\text{CBH})_{it} = \alpha_i + \beta_1 \log(\text{CBH})_{it-1} + \beta_2 \log(\text{ПКВ})_{it} + \epsilon_{it} \quad (18)$$

где CBH_{it} – представляют уровень смертности взрослого населения в стране i , ПКВ_{it} – взвешенное по численности населения загрязнение мелкими твёрдыми частицами ($\text{ТЧ}_{2,5}$) в стране i в течение периода t , α_i и β_i являются точкой пересечения модели ОММ и коэффициентом объясняющей переменной, соответственно и ϵ_{it} обозначают члены ошибки. Чтобы избежать идеальной мультиколлинеарности между переменными, в модель был добавлен член $(\text{CBH})_{it-1}$ представляющий запаздывающие значения зависимой переменной, был добавлен в качестве независимой переменной.

Чтобы учесть все влияющие переменные, мы модифицировали уравнение (18) до более конкретного соотношения, представленной в уравнении (14).

$$\log(\text{CBH})_{it} = \alpha_i + \log(\text{CBH})_{it-1} + \beta_1 \log(\text{ПКВ})_{it} + \beta_2 \log(\text{ВВП})_{it} + \beta_3 \log(\text{ВДС}) + \beta_4 \log(\text{КЛО})_{it} + \beta_5 \log(\text{ИКУ})_{it} + \epsilon_{it} \quad (19)$$

Эффективность ОММ–оценки проверяется с помощью ограничений Хансена на избыточную идентификацию и тестов на серийную корреляцию ($\text{AR}(2)$). Инструменты являются легитимными, и смещение эндогенности может быть смягчено в ситуациях, когда нулевая гипотеза о завышенных показателях идентификации не может быть отвергнута. ОММ–оценка надёжна и эффективна, если J-тест Хансена и гипотеза о наличии корпуса $\text{AR}(2)$ не отвергаются (Blundell, Bond, 1998).

Результаты оценок ОММ регрессии представлены в Таблицах 20, 21 и 22. Сначала мы старались выявить единый эффект загрязнения воздуха, изолировав другие ковариантные показатели в двумерном анализе, а затем скорректировали модель с помощью социально-экономических показателей, чтобы проследить их

влияние на определение смертности взрослого населения в регионе. Для всех моделей результаты теста Хансена J свидетельствуют о достоверности динамической модели, поскольку р-значения теста Хансена во всех моделях не являются статистически значимыми, нулевая гипотеза не может быть отвергнута. Критерии моментов моделей удовлетворяются, согласно AR (2), так как р-значения не являются статистически значимыми. В результате тест Хансена показывает, что проблема вмешательства минимизируется во всех испытаниях, а тест Ареллано-Бонда подтверждает наличие проблемы серийной корреляции второго порядка, что подтверждает гипотезу о том, что оценённые модели прошли диагностические тесты.

Таблица 20 – Оценки параметров для динамического ОММ–анализа влияния загрязнения воздуха на уровень смертности взрослого населения (оба пола)

Переменные	Модель 1	Модель 2
Запаздывающая смертность взрослых (CBH_{i-1})	0,993 (0,029) ***	0,928 (0,199) ***
Взвешенные по численности населения $TЧ_{2,5}$ (ПКВ)	0,018 (0,007) *	0,028 (0,012) **
Валовой внутренний продукт (ВВП)		-0,016 (0,031)
Базовый доступ к санитарии (БДС)		-0,132 (0,093) **
Среднее количество лет обучения (КЛО)		-0,108 (0,122)
Индекс качества управления (ИКУ)		-0,0056 (0,003) **
Постоянный коэффициент	-0,020 (0,078)	0,975 (0,651)
Количество наблюдений	60	56
Количество инструментов	5	41
Тест Хансена J: р-значение	0,842	0,082
AR (2): р-значение	0,303	0,914

Примечание – *** значимо при 1%, **значимо при 5%, *значимо при 10%

Результаты базовой регрессии согласуются с результатами более ранних эмпирических исследований. Двумерная регрессия показала, что $TЧ_{2,5}$ имеет

значительный положительный коэффициент для общей смертности и смертности взрослых мужчин, что указывает на то, что увеличение уровня загрязнения мелкими частицами способствует повышению смертности в регионе. Анализ показывает, что увеличение уровня ТЧ_{2,5} на 10 % приводит к росту смертности взрослого населения на 0,18 % и 0,28 % для обоих полов (Таблица 20). Кроме того, полностью скорректированные модели для показателей смертности женщин и мужчин показывают, что увеличение уровня на 10 % приводит к росту смертности женщин и мужчин на 0,37 % и 0,51 % соответственно. Все остальные показатели показали отрицательную связь с уровнем смертности среди взрослого населения, при этом оценки доступа к базовым санитарным услугам и среднее количество лет школьного образования внесли больший вклад.

Таблица 21 – Оценки параметров для динамического ОММ–анализа влияния загрязнения воздуха на уровень смертности взрослых женщин

Переменные	Модель 1	Модель 2
Запаздывающая смертность взрослых (CBH _{i-1})	1,061 (0,032) ***	0,626 (0,406) **
Взвешенные по численности населения ТЧ _{2,5} (ПКВ)	0,031 (0,010) **	0,037 (0,026)
Валовой внутренний продукт (ВВП)		-0,092 (0,061) **
Базовый доступ к санитарии (БДС)		-0,188 (0,245)
Среднее количество лет обучения (КЛО)		-0,167 (0,221)
Индекс качества управления (ИКУ)		-0,015 (0,017)
Постоянный коэффициент	-0,203 (0,078) **	1,490 (1,622)
Количество наблюдений	48	92
Количество инструментов	6	39
Тест Хансена J: р-значение	0,119	0,108
AR (2): р-значение	0,371	0,594

Примечание – *** значимо при 1%, **значимо при 5%, *значимо при 10%

Таблица 22 – Оценки параметров для динамического ОММ–анализа влияния загрязнения воздуха на уровень смертности взрослых мужчин

Переменные	Модель 1	Модель 2
Запаздывающая смертность взрослых (CBH_{i-1})	1,031 (0,042) ***	0,716 (0,657) *
Взвешенные по численности населения $ТЧ_{2,5}$ (ПКВ)	0,021 (0,008) **	0,051 (0,015) **
Валовой внутренний продукт (ВВП)		-0,040 (0,143)
Базовый доступ к санитарии (БДС)		-0,035 (0,135)
Среднее количество лет обучения (КЛО)		-0,171 (0,260)
Индекс качества управления (ИКУ)		-0,003 (0,014)
Постоянный коэффициент	-0,115 (0,113)	1,115 (2,452)
Количество наблюдений	60	80
Количество инструментов	5	38
Тест Хансена J: р-значение	0,795	0,545
AR (2): р-значение	0,210	0,367

Примечание – *** значимо при 1%, **значимо при 5%, *значимо при 1%

Этот анализ показал, что увеличение воздействия загрязнения воздуха повышает уровень смертности взрослого населения в регионе. Загрязнение воздуха является источником ущерба для здоровья из-за различных причин заболеваемости и смертности. Кроме того, мы показали, что экономическое развитие страны, уровень грамотности, доступ к санитарно-гигиеническим объектам и эффективное управление государством снижают уровень смертности среди взрослого населения. Наше исследование выявило значительную корреляцию между смертностью взрослого населения в районе и загрязнением воздуха, в то время как доступ к основным санитарным удобствам и уровень образования, по-видимому, сдерживали эту связь. Несмотря на недостатки таких экологических исследований, как это, по сравнению с обычными эпидемиологическими исследованиями (Richardson, Monfort, 2000), у них есть и ряд преимуществ, в том числе возможность решать вопросы экологического здоровья, прежде чем прибегать к дорогостоящим и интенсивным исследованиям методом случай-контроль или групповым исследованиям (Walter, 1991).

4.5 Заключение четвертой главы

В данной главе были оценены влияние загрязнения воздуха на здоровье человека. Оценка уровней загрязнения воздуха и его воздействия на распространённость неинфекционных заболеваний показала, что за период с 1992 по 2022 год общее число смертей, связанных с воздействием загрязнённого воздуха, увеличилось на 8,52%. Основными причинами такой смертности остаются инфекции нижних дыхательных путей (ИНДП) и инсульт. Инфекция Нижних Дыхательных Путей (ИНДП) также является основной причиной DALYs, в то время как наименьшей причиной является Хроническая Обструктивная Болезнь Лёгких (ХОБЛ). Модель многолинейной регрессии показала, что, несмотря на усилия по сокращению использования твёрдого топлива (Household Air Pollution from solid fuels, HAP), он остаётся наиболее значительным загрязнителем, вызывающим беспокойство в регионе. Увеличение региональных использования твёрдого топлива (HAP) и $TC_{2,5}$ на 10% приводит к увеличению потерянных годы жизни на 151,0% и 4,2% соответственно.

Анализ взаимосвязи загрязнения воздуха и озелененностью с уровнем смертности от инсульта показал, что воздействие озеленения поверхности снижает риск смерти от инсульта, в то время как воздействие $TC_{2,5}$ и SO_2 повышают показатели смертности, связанной с инсультом. Результаты нашего исследования подтверждают насущную необходимость смягчения воздействия загрязнения воздуха с помощью контроля выбросов для снижения заболеваемости и смертности от инсультов, а также содействия развитию рекреационных зелёных зон.

Вред загрязнения воздуха для здоровья также оценивалось путём взвешивания его вклада в ожидаемую продолжительность жизни при рождении и других экологических стрессоров. По оценкам, ожидаемая продолжительность жизни при рождении в 2021 году варьировалась от 66,38 лет в Руанде до 62,23 лет в Уганде. В качестве основных причин снижения ожидаемой продолжительности жизни при рождении были названы плохое качество воздуха, табакокурения и неадекватность санитарно-гигиенической инфраструктуры.

Хотя количественная оценка изменений в ожидаемой продолжительности жизни, связанных с отдельными факторами риска, является сложной задачей из-за многопричинности и конкурирующих факторов риска, данное исследование показало, что усилия по одновременному устранению всех соответствующих экологических рисков могут привести к минимальному увеличению в Уганде по крайней мере на 1,73 года при 50% устранении причин и на 3,64 года при 100% устранении причин.

Анализ взаимосвязи между факторами при определении ожидаемой продолжительности жизни при рождении показал, что воздействие загрязнения воздуха оказывает значительное прямое негативное воздействие как на ВНД, так и на ожидаемую продолжительность жизни при рождении, а также косвенное негативное влияние на ожидаемую продолжительность жизни через снижение ВНД. По Статистике, увеличение на 1 мкг/м³ взвешенного по средневзвешенному показателю ТЧ_{2,5} привело к прямому снижению ожидаемой продолжительности жизни при рождении на 0,498 года. Косвенное влияние на ожидаемую продолжительность жизни через ухудшения других факторов, определяющих продолжительность жизни, ожидается в виде снижения на 0,254 года при каждом увеличении на 1 мкг/м³ взвешенного по численности населения ТЧ_{2,5}, что в сумме приведёт к общему сокращению ожидаемой продолжительности жизни при рождении на 0,752 года при каждом увеличении на 1 мкг/м³ взвешенных по численности населения ТЧ_{2,5} выше средней региональной концентрации.

Используя в нашем анализе статистические данные о смертности, публикуемые Всемирной организацией здравоохранения за пятнадцать лет (2008–2022 гг.), и показатели мирового развития из репозитория данных Группы Всемирного банка, мы применили обобщённый метод моментов для оценки влияния воздействия загрязнения воздуха на уровень смертности взрослого населения в пяти странах Восточной Африки. Наш анализ показал, что:

- Воздействие мелких твёрдых частиц (ТЧ_{2,5}) положительно коррелирует с показателями смертности среди обоих полов.

- Двумерный анализ (загрязнения воздуха и уровень смертности) показал, что увеличение уровня $\text{ТЧ}_{2,5}$ на 10% приводит к росту смертности взрослого населения от 0,18% до 0,28% среди обоих полов.
- Кроме того, полностью скорректированный обобщённый метод моментов показал, что увеличение на 10% привело к росту смертности женщин и мужчин на 0,37% и 0,51%, соответственно. Наша модель также показала, что экономическое развитие страны, уровень грамотности, доступ к санитарным объектам и надлежащее управление странами способствуют снижению распространённости смертности среди взрослого населения.

Общее заключение

Данное исследование посвящено оценке воздействию загрязнения воздуха и его влияние на здоровье человека в странах Восточной Африки. Проведен обзор литературы по загрязнению воздуха и последствиям для здоровья в регионе Восточной Африки с целью определения текущей ситуации и выявления направлений исследований. Проблема загрязнения воздуха в Восточной Африке является весьма актуальной и в большинстве исследований сообщается о концентрациях $\text{ТЧ}_{2,5}$ и О_3 , превышающих рекомендации ВОЗ в большинстве стран. Основной причиной ухудшения состояния окружающей среды в регионе является, в частности, непропорциональная урбанизация по сравнению с существующей инфраструктурой, использование традиционных источников энергии для отопления жилых помещений и приготовления пищи, а также практика подсечно-огневого земледелия для подготовки земли.

В дополнение к описанию оценок уровня загрязняющих веществ и их влияния на здоровье человека особое внимание было уделено состоянию каждой из пяти заинтересованных стран в данном исследовании, а именно: Бурунди, Кения, Руанда, Танзания и Уганда. К числу общих проблем, с которыми сталкиваются страны Восточной Африки, относятся практически полное отсутствие и/или неадекватность сети мониторинга на всей их территории.

Отсутствие данных о качестве воздуха приводит к слепым научным исследованиям с использованием неколичественных опросов и в большей степени, к использованию некалиброванных недорогих датчиков. Мы также отметили необходимость наращивания потенциала для проведения исследований по оценке воздействия, включая связь плохого качества воздуха с ущербом для здоровья в странах Восточной Африки.

Характеристика потенциальных источников загрязнения воздуха показала, что сжигание биомассы в результате естественных лесных пожаров и подготовки сельскохозяйственных земель является основным источником диоксидов азота и оксида углерода, в то время как вулканическая деятельность доминирует в выбросах диоксида серы. Оценка потенциальных источников выбросов с использованием программы HEMCO (Harmonized Emissions Component) показал, что в 2022 году выбросы от сжигания биомассы составили 50,46%; 45,12% и 23,71% от общего объёма выбросов CO, NO и SO₂ соответственно. Анализ показал, что сезонная изменчивость выбросов в регионе следует за сменой сезонов, при этом в засушливые сезоны выбросы выше, чем во влажные.

Кроме того, особое внимание было уделено антропогенным выбросам путём сравнения 25-летнего анализа базы данных о выбросах с базой данных о выбросах для глобальных атмосферных исследований (Emissions Database for Global Research, EDGAR). Наш анализ показал, что согласно типу загрязняющих веществ, в антропогенных выбросах преобладают жилой сектор и автомобильный транспорт. В течение 1998–2022 гг. содержание CO; NO_x; SO₂ и TЧ_{2,5} увеличилось на 191,7%; 52,7%; 180,1% и 74,6% с годовым темпом роста 4,4%; 1,7%; 4,2% и 2,37% соответственно.

Хотя выбросы загрязнителей воздуха демонстрируют тенденцию к их увеличению в большинстве стран региона, оценка уровней их концентрации в воздухе помогла выявить загрязняющие вещества, вызывающие наибольшую озабоченность как в пространственном, так и во временном измерении. Уровень загрязнения воздуха превышает рекомендуемую ВОЗ концентрацию, особенно

загрязнение ТЧ, в ключевых городах соответствующих стран. Кроме того, наш анализ показал, что концентрация загрязняющих веществ в воздухе в регионе определяется местными выбросами в сочетании с перестановкой сезонов сухости и влажности.

Более того, анализ показал, что общее число смертей, связанных с загрязнением воздуха, увеличилось на 8,52% за 30 лет с 1992 года, при этом инфекция нижних дыхательных путей и инсульт являются основными причинами смертности, связанной с загрязнением воздуха. Инфекция нижних дыхательных путей также является основной причиной DALYs, в то время как наименьшей причиной является хроническая обструктивная болезнь лёгких. Модель многолинейной регрессии показала, что, несмотря на усилия по сокращению использования твёрдого топлива, он остаётся наиболее значительным загрязнителем, вызывающим беспокойство в регионе. Увеличение региональных использования твёрдого топлива и ТЧ_{2,5} на 10% приводит к увеличению потерянные годы жизни на 151,0% и 4,2% соответственно.

Анализ взаимосвязи загрязнения воздуха и зелёных насаждений с уровнем смертности от инсульта показал, что воздействие озеленения поверхности снижает риск смерти от инсульта, в то время как воздействие ТЧ_{2,5} и SO₂ повышают показатели смертности, связанной с инсультом. Результаты нашего исследования подтверждают насущную необходимость смягчения воздействия загрязнения воздуха с помощью контроля выбросов для снижения заболеваемости и смертности от инсультов, а также содействия развитию рекреационных зелёных зон.

Вред загрязнения воздуха для здоровья также оценивалось путём взвешивания его вклада в ожидаемую продолжительность жизни при рождении и других экологических стрессоров. По оценкам, ожидаемая продолжительность жизни при рождении в 2021 году варьировалась от 66,38 лет в Руанде до 62,23 лет в Уганде. В качестве основных причин снижения ожидаемой продолжительности жизни при рождении были названы плохое качество воздуха, табакокурение и неадекватность санитарно-гигиенической инфраструктуры.

Хотя количественная оценка изменений в ожидаемой продолжительности жизни, связанных с отдельными факторами риска, является сложной задачей из-за многопричинности и конкурирующих факторов риска, данное исследование показало, что усилия по одновременному устранению всех соответствующих экологических рисков могут привести к минимальному увеличению в Уганде по крайней мере на 1,73 года при 50% устранении причин и на 3,64 года при 100% устранении причин. Анализ взаимосвязи между факторами при определении ожидаемой продолжительности жизни при рождении показал, что воздействие загрязнения воздуха оказывает значительное прямое негативное воздействие как на Валовой Национальный Доход, так и на ожидаемую продолжительность жизни при рождении, а также косвенное негативное влияние на ожидаемую продолжительность жизни через снижение Валовой Национальный Доход.

По статистике, увеличение на 1 мкг/м^3 взвешенного по средневзвешенному показателю $\text{ТЧ}_{2,5}$ привело к прямому снижению ожидаемой продолжительности жизни при рождении на 0,498 года. Косвенное влияние на ожидаемую продолжительность жизни через ухудшения других факторов, определяющих продолжительность жизни, ожидается в виде снижения на 0,254 года при каждом увеличении на 1 мкг/м^3 взвешенного по численности населения $\text{ТЧ}_{2,5}$, что в сумме приведёт к общему сокращению ожидаемой продолжительности жизни при рождении на 0,752 года при каждом увеличении на 1 мкг/м^3 взвешенных по численности населения $\text{ТЧ}_{2,5}$ выше средней региональной концентрации.

Кроме того, анализ показал, что увеличение показателей загрязнения воздуха повышает уровень смертности взрослого населения в регионе. Загрязнение воздуха является источником ущерба для здоровья из-за различных причин заболеваемости и смертности. Мы показали, что экономическое развитие страны, уровень грамотности, доступ к санитарно-гигиеническим объектам и эффективное управление государством снижают уровень смертности среди взрослого населения. Наше исследование выявило значительную корреляцию между смертностью взрослого населения в этом районе и загрязнением воздуха, в то время как доступ

к основным санитарным удобствам и уровню образования, по-видимому, смягчает эту связь. С учётом того, что среднегодовая концентрация $\text{ТЧ}_{2,5}$ в пять раз превышает рекомендованное ВОЗ значение в 5 мкг/м^3 в регионе, рекомендуется принять адекватные меры для ограничения последствий, вызванных этим воздействием.

Основные результаты диссертационной работы

1) Охарактеризованы потенциальные источники и уровни загрязняющих веществ в воздухе региона. Выявлено, что:

- Сжигание биомассы доминирует в выбросах оксида углерода и оксидов азота, а вулканическая деятельность – в выбросах диоксида серы;

- В 2022 году выбросы от сжигания биомассы составили 50,43%; 45,25% и 23,71% от общего объёма выбросов CO ; NO и SO_2 , соответственно;

- Коммунальные выбросы, производство энергии и автомобильный транспорт являются основными секторами, вносящими вклад в антропогенные выбросы в регионе;

- Уровень концентраций загрязняющих веществ, особенно твёрдых частиц, превышает нормативы ВОЗ в столицах исследуемых стран;

- На уровень и динамику загрязнителей воздуха в регионе влияют местные выбросы и сезонное чередование сухих и влажных периодов.

2) Проведен анализ заболеваемости и смертности, связанных с загрязнением воздуха, в результате которого выявлено, что общее число смертей, за 30 лет с 1992 года по 2021 год увеличилось на 8,52%, при этом инфекции нижних дыхательных путей и инсульт являются основными причинами заболеваемости и смертности.

3) Результаты моделирования показали, что более низкие показатели смертности от инсульта обусловлены более высоким уровнем развитости растительного покрова, в то время как увеличение смертности от инсульта связано с повышенными концентрациями $\text{ТЧ}_{2,5}$ и SO_2 . Установлено, что:

- увеличение EVI на одну единицу приводит к снижению смертности от инсульта на $845,57 \pm 295,96$ смертей на 100 000 человек;

- увеличение концентрации SO_2 на 1 г/м^3 приводит к увеличению числа смертей на $139,28 \pm 64,33$ на 100 000 человек, а повышение концентрации $\text{TCH}_{2,5}$ на 1 г/м^3 на $3,06 \pm 1,25$ смертей на 100 000 человек;

4) Построены таблицы жизни, исключая причины смерти, связанные с условиями окружающей среды. Выявлено, что уменьшение количества смертей, вызванных загрязнением воздуха в коммунальной застройке, твёрдыми частицами и озоном, приведёт к значительному увеличению ожидаемой продолжительности жизни при рождении: 1,97 года в Бурунди, 1,84 года в Руанде, 1,80 года в Танзании, 1,48 года в Уганде и 1,31 года в Кении.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

В работе указано на необходимость активизации усилий по борьбе с загрязнением воздуха, улучшению инфраструктуры здравоохранения и сокращению социально-экономического неравенства, которое усугубляет вред для здоровья, вызванный загрязнением воздуха.

Кроме того, показана необходимость усилить роль регионального сотрудничества и бизнеса в организации научных исследований для устранения последствий для здоровья и стимулирования коллективных действий по борьбе с плохим качеством воздуха.

Установлена степень пагубного влияния загрязнения воздуха на здоровье человека в странах Восточной Африки. Однако существенным ограничением для данного исследования является неопределённость, возникающая в результате понижения глобальных кадастров выбросов до местного масштаба. Для преодоления этого обстоятельства в дальнейшем планируется разработать всеобъемлющие кадастры выбросов загрязняющих веществ, которые точно определяют потенциальные источники выбросов в регионе. Эти усилия должны

подкрепляться надёжными системами мониторинга на местах для понимания динамики загрязнения воздуха с целью создания эффективных условий и средств противодействия.

Список сокращений и условных обозначений

ACAG – Atmospheric Composition Analysis Group

AEIC – Aircraft Emissions Inventory Code

AIC – Akaike Information Criterion.

CDO – Climate Data Operators

CEDS – Community Emissions Data System

CH₄ – Метан

CO – Оксид углерода

DAAC – Distribution Active Archive Center

DALY – Disability-Adjusted Life Year (Годы жизни с поправкой на инвалидность)

DHS – Demographic and Health Surveys

EAC – East African Community

EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research

ENSO – El Niño-Southern Oscillation

EVI – Enhanced Vegetation Index

GAM – Generalized Additive Models

GBD – Global Burden of Disease

GFAS – Global Fire Assimilation System

GHDx – Global Health Data Exchange

GIOVANNI – Geospatial Interactive Online Visualization and Analysis Infrastructure

GMAO – NASA Global Modeling and Assimilation Office

GMM – Generalized Method of Moments

GPS – Global Positioning System

HAP – Household Air Pollution from solid fuel

HEMCO – Harmonized Emissions Component

IHME – Institute for Health Metrics and Evaluation

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

MERRA-2 – Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NO₂ – Диоксид азота

NO_x – Оксиды азота

O₃ – Озон

OBPE – Office Burundais pour la Protection de l'Environnement

OMI – Ozone Monitoring Instrument

ppb – частей на миллион

ppm – частей на миллиард

REMA – Rwanda Environmental Management Authority

SO₂ – Диоксид серы

NO – Оксид азота

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

YLL – Years of life lost from mortality (Годы, потерянные из-за преждевременной смертности)

АГК – Анализа Главных Компонентов

БДС – Базовый Доступ к Санитарии

ВВП – Валовой Внутренний Продукт

ВИЧ/СПИД – Вирус иммунодефицита человека/ Синдром приобретённого иммунного дефицита

ВНД – Валовой Национальный Доход

ВОЗ – Всемирной Организации Здравоохранения

ГББ – Глобальное бремя болезней

ГВБ – Группа Всемирного Банка

ДИ – Доверительный Интервал

ДРК – Демократической Республике Конго

ДЯФ – Декабрь-январь-февраль

ЕКА – Европейского Космического Агентства

ИБС – Ишемическая болезнь сердца

ИИА – Июнь-Июль-Август

ИКУ – Индекс Качества Управления

ИМТ – Индекс Массы Тела

ИНДП – Инфекция Нижних Дыхательных Путей

ККЧВ – Коалиция по Климату и Чистому Воздуху

КЛО – Количество Лет школьного Образования

ЛОС – Летучих Органических Соединений

МАИР – Международное Агентство по Исследованию Рака

МAM – Март-Апрель-Май

МГЭИК – Межправительственная Группа Экспертов по Изменению Климата

МДИ – Медико-Демографические Исследования

МЛР – Множественной линейной регрессий

ММЛР – Модели Множественной Линейной Регрессии

НАСА – Национальное управление США по Аэронавтике и исследованию космического пространства

НМЛОС – Неметановые Летучие Органические Соединения

ОММ – Обобщенный метод моментов

ОН – Гидроксильный Радикал

ПКВ – Плохого Качества Воздуха

РКИК ООН – Рамочная конвенция Организации Объединённых Наций об изменении климата

РТБЛ – Рак трахеи, бронхов и лёгких

СВН – Смертность Взрослого Населения

СД2 – Сахарный диабет 2 типа

СОН – Сентябрь-Октябрь-Ноябрь

СССР – Союз Советских Социалистических Республик

США – Соединённые Штаты Америки

ТМ – Тяжёлые Металлы

ТЧ – Твёрдые Частицы

ХОБЛ – Хроническая обструктивная болезнь лёгких

ЦАР – Центральноафриканской Республике

ЦУР – Цели в области устойчивого развития

ЭНЮК – Эль-Ниньо-Южное колебание

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abera A., Friberg J., Isaxon C., Jerrett M., Malmqvist E., Sjöström C., Taj T., Vargas A. M. Air Quality in Africa: Public Health Implications // *Annu. Rev. Public Health*. 2021. Т. 42. № 1. С. 193–210.
2. Aalst van R., Edwards L., Pulles T., Saeger E. De, Tombrou M., Tonnesen D. Guidance report on preliminary assessment under EC air quality directives. Brussels–Belgium: European Environmental Agency, 1998.
3. Abbafati C. и др. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // *Lancet*. 2020. Т. 396. № 10258. С. 1204–1222.
4. Adeloye D. An estimate of the incidence and prevalence of stroke in Africa: A systematic review and meta-analysis // *PLoS One*. 2014. Т. 9. № 6. С. e100724.
5. African Development Bank, African Economic Outlook. Africa Economic Outlook. Abidjan-Côte d’Ivoire: African Development Bank, 2023. 72 с.
6. Agbo K. E., Walgraeve C., Eze J. I., Ugwoke P. E., Ukoha P. O., Langenhove H. Van. A review on ambient and indoor air pollution status in Africa // *Atmos. Pollut. Res*. 2021. Т. 12. № 2. С. 243–260.
7. AirQo. Clean Air for All African Cities [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.airqo.net/> (дата обращения: 02.04.2023).

8. Akinyemi R. O. и др. Stroke in Africa: profile, progress, prospects and priorities // Nat. Rev. Neurol. 2021. Т. 17. № 10. С. 634–656.
9. Al-Kindi S. G., Brook R. D., Biswal S., Rajagopalan S. Environmental determinants of cardiovascular disease: lessons learned from air pollution // Nat. Rev. Cardiol. 2020. Т. 17. № 10. С. 656–672.
10. Alahacoon N., Edirisinghe M., Simwanda M., Perera E. N. C., Nyirenda V. R., Ranagalage M. Rainfall variability and trends over the African continent using tamsat data (1983–2020): Towards climate change resilience and adaptation // Remote Sens. 2022. Т. 14. № 1. С. 1–26.
11. Alonso-Borrego C., Arellano M. Symmetrically normalized instrumental-variable estimation using panel data // J. Bus. Econ. Stat. 1999. Т. 17. № 1. С. 36–49.
12. Alwin D. F., Hauser R. M. The Decomposition of Effects in Path Analysis // Am. Sociol. Rev. 1975. Т. 40. № 1. С. 37–47.
13. Amegah A. K., Agyei-Mensah S. Urban air pollution in Sub-Saharan Africa: Time for action. // Environ. Pollut. 2017. Т. 220. С. 738–743.
14. Anderson J. O., Thundiyil J. G., Stolbach A. Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health // J. Med. Toxicol. 2012. Т. 8. № 2. С. 166–175.
15. Andreev E. M., Biryukov V. A., Shaburov K. J. Life Expectancy in the Former USSR and Mortality Dynamics by Cause of Death: Regional Aspects // Eur. J. Popul. / Rev. Eur. Démographie. 1994. Т. 10. № 3. С. 275–285.
16. Andres L., Bryson J. R., Bakare H., Pope F. Institutional logics and regional policy failure: Air pollution as a wicked problem in East African cities // Environ. Plan. C Polit. Sp. 2022.

17. Arellano S., Yalire M., Galle B., Bobrowski N., Dingwell A., Johansson M., Norman P. Long-term monitoring of SO₂ quiescent degassing from Nyiragongo's lava lake // J. African Earth Sci. 2017. T. 134. C. 866–873.
18. Arias E., Heron M., Tejada-Vera B. United States life tables eliminating certain causes of death, 1999-2001. // Natl. vital Stat. reports. 2013. T. 61. № 9. C. 1–128.
19. ASAP-East Africa Research Team. Air Quality Briefing Note: Nairobi (Kenya). Nairobi: ASAP EAST Africa, 2019.
20. Ault A. P., Axson J. L. Atmospheric Aerosol Chemistry: Spectroscopic and Microscopic Advances // Anal. Chem. 2017. T. 89. № 1. C. 430–452.
21. Backes C. H., Nelin T., Gorr M. W., Wold L. E. Early life exposure to air pollution: How bad is it? // Toxicol. Lett. 2013. T. 216. № 1. C. 47–53.
22. Baharane V., Shatalov A. B. Ambient air pollution level in the East African region based on satellite remote sensing of NO₂, CO, and Aerosol optical depth // Web Conf. 2023. T. 407. № 02003.
23. Bakwin P. S., Tans P. P., Novelli P. C. Carbon monoxide budget in the northern hemisphere // Geophys. Res. Lett. 1994. T. 21. № 6. C. 433–436.
24. Barry R. G., Chorley R. J. Tropical weather and climate // Atmosphere, Weather and Climate. Landon EC4P 4EE: Routledge, 2021. Вып. Eighth. C. 342–412.
25. Bein M. A., Unlucan D., Olowu G., Kalifa W. Healthcare spending and health outcomes: Evidence from selected East African countries // Afr. Health Sci. 2017. T. 17. № 1. C. 247–254.
26. Berrick S. W., Leptoukh G., Farley J. D., Rui H. Giovanni: A web service workflow-based data visualization and analysis System // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. T. 47. № 1. C. 106–113.
27. Block M. L., Calderón-Garcidueñas L. Air pollution: mechanisms of

- neuroinflammation and CNS disease // *Trends Neurosci.* 2009. T. 32. № 9. C. 506–516.
28. Blundell R., Bond S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models // *J. Econom.* 1998. T. 87. № 1. C. 115–143.
29. Bower J. и др. Monitoring ambient air quality for health impact assessment // *World Heal. Organ. Reg. Publ. - Eur. Ser.* 1999. T. 85. № 85.
30. Brugha R., Grigg J. Urban air pollution and respiratory infections // *Paediatr. Respir. Rev.* 2014. T. 15. № 2. C. 194–199.
31. Carey I. M., Atkinson R. W., Kent A. J., Staa T. Van, Cook D. G., Anderson H. R. Mortality associations with long-term exposure to outdoor air pollution in a national English cohort // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2013. T. 187. № 11. C. 1226–1233.
32. Chen T. M., Gokhale J., Shofer S., Kuschner W. G. Outdoor air pollution: Ozone health effects // *Am. J. Med. Sci.* 2007a. T. 333. № 4. C. 244–248.
33. Chen T. M., Gokhale J., Shofer S., Kuschner W. G., Tze-ming C., Janaki G., Scott S., Kuschne G. W. Outdoor air pollution: Nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and carbon monoxide health effects // *Am. J. Med. Sci.* 2007b. T. 333. № 4. C. 249–256.
34. Chuvieco E., Pettinari M. L., Roteta E., Storm T., Boettcher M. ESA Fire Climate Change Initiative (Fire_cci): Small Fire Database (SFD) Burned Area grid product for Sub-Saharan Africa, version 2.0 // *NERC EDS Cent. Environ. Data Anal.* 2021.
35. Clarke K., Ash K., Coker E. S., Sabo-Attwood T., Bainomugisha E. A Social Vulnerability Index for Air Pollution and Its Spatially Varying Relationship to PM_{2.5} in Uganda // *Atmosphere (Basel)*. 2022a. T. 13. № 8. C. 1169.
36. Clarke K., Rivas A. C., Milletich S., Sabo-Attwood T., Coker E. S. Prenatal Exposure to Ambient PM_{2.5} and Early Childhood Growth Impairment Risk in East Africa // *Toxics*. 2022b. T. 10. № 11. C. 705.
37. Copernicus. CAMS global biomass burning emissions based on fire radiative power

(GFAS): data documentation [Электронный ресурс]. URL:

<https://confluence.ecmwf.int/x/to1CBQ> (дата обращения: 11.11.2022).

38. Crouse D. L., Goldberg M. S., Ross N. A., Chen H., Labrèche F. Postmenopausal breast cancer is associated with exposure to traffic-related air pollution in Montreal, Canada: A case-control study // *Environ. Health Perspect.* 2010. T. 118. № 11. С. 1578–1583.

39. Dales R. E., Cakmak S., Vidal C. B. Air pollution and hospitalization for headache in Chile // *Am. J. Epidemiol.* 2009. T. 170. № 8. С. 1057–1066.

40. Daly A., Zannetti P. Air Pollution Modeling – An Overview // *Ambient Air Pollut.* 2007. T. I. № 2003. С. 15–28.

41. Dědeček R., Dudzich V. Exploring the limitations of GDP per capita as an indicator of economic development: a cross-country perspective // *Rev. Econ. Perspect.* 2022. T. 22. № 3. С. 193–217.

42. deSouza P. Air pollution in Kenya: a review // *Air Qual. Atmos. Heal.* 2020. T. 13. № 12. С. 1487–1495.

43. DeWitt H. L., Gasore J., Rupakheti M., Potter K. E., Prinn R. G., Ndikubwimana J. de D., Nkusi J., Safari B. Seasonal and diurnal variability in air pollutants and short-lived climate forcers measured at the Rwanda Climate Observatory // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2018. № May 2018.

44. Didan K. MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center [Электронный ресурс]. URL: [s://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.061](https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.061) (дата обращения: 17.06.2024).

45. Dionisio K. L., Phillips K., Price P. S., Grulke C. M., Williams A., Biryol D., Hong T., Isaacs K. K. Data Descriptor: The Chemical and Products Database, a resource for exposure-relevant data on chemicals in consumer products // *Sci. Data.* 2018. T. 5.

46. Donkelaar A. Van и др. Monthly Global Estimates of Fine Particulate Matter and Their Uncertainty // *Environ. Sci. Technol.* 2021. Т. 55. № 22. С. 15287–15300.
47. EAC. East African Community (EAC) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eac.int/eac-partner-states/burundi> (дата обращения: 30.04.2024).
48. Eastham S. D., Fritz T. Technical guidance for the AEIC 2019 aircraft emissions inventory. Massachusetts: MIT, 2019. 9 с.
49. EPA. Managing Air Quality - Ambient Air Monitoring | Air Quality Management Process | US EPA [Электронный ресурс]. URL: <https://www.epa.gov/air-quality-management-process/managing-air-quality-ambient-air-monitoring> (дата обращения: 13.02.2023).
50. European Commission. Emissions Database for Global Atmospheric Research // EU Open Data portal. 2024.
51. Ezzati M., Kammen D. M. Indoor air pollution from biomass combustion and acute respiratory infections in Kenya: An exposure-response study // *Lancet*. 2001. Т. 358. № 9282. С. 619–624.
52. Fajersztajn L., Veras M., Barrozo L. V., Saldiva P. Air pollution: A potentially modifiable risk factor for lung cancer // *Nat. Rev. Cancer*. 2013. Т. 13. № 9. С. 674–678.
53. Feigin V. L., Brainin M., Norrving B., Martins S., Sacco R. L., Hacke W., Fisher M., Pandian J., Lindsay P. World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2022 // *Int. J. Stroke*. 2022. Т. 17. № 1. С. 18–29.
54. Fisher S., Bellinger D. C., Cropper M. L., Kumar P., Binagwaho A., Koudenoukpo J. B., Park Y., Taghian G., Landrigan P. J. Air pollution and development in Africa: impacts on health, the economy, and human capital // *Lancet Planet. Heal.* 2021. Т. 5. № 10. С. e681–e688.

55. Forouzanfar M. H. и др. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015 // *Lancet*. 2016. Т. 388. № 10053. С. 1659–1724.
56. Fox-Rushby J. A., Hanson K. Calculating and presenting disability adjusted life years (DALYs) in cost-effectiveness analysis // *Health Policy Plan*. 2001. Т. 16. № 3. С. 326–331.
57. Fuller G., Friedman S., Mudway I. Impacts of air pollution across the life course – evidence highlight note. London: Imperial College London, 2023. 1–20 с.
58. Fuller R. и др. Pollution and health: a progress update // *Lancet Planet. Heal.* 2022. Т. 6. № 6. С. e535–e547.
59. Gaffan N., Kpozehouen A., Degbey C., Ahanhanzo Y. G., Paraïso M. N. Effects of household access to water, sanitation, and hygiene services on under-five mortality in Sub-Saharan Africa // *Front. Public Heal.* 2023. Т. 11. С. 1136299.
60. Gangiah S. Pollution from cooking in rural and poor urban households of Africa: A methodological review // *HTS Teol. Stud. / Theol. Stud.* 2022. Т. 78. № 2.
61. Ganguly N. D., Ranjan R. R., Joshi H. P., Iyer K. N. Diurnal and seasonal variation of columnar ozone at Rajkot // *Indian J. Radio Sp. Phys.* 2006. Т. 35. № 3. С. 181–186.
62. Gasore J., DeWitt L., Safari B., Irankunda E. First National Scale Measurements of Ambient and Indoor Air Pollution in Rwanda // *AGU Fall Meeting Abstracts*. Washington, D.C.: , 2018. С. A44B-03.
63. Gatari M. J. и др. High airborne black carbon concentrations measured near roadways in Nairobi, Kenya // *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2019. Т. 68. С. 99–109.
64. Gatoto P., Athanase Dalson G., Roddy Lollchund M. Low Electricity Access Rate

as a Barrier to Achieving the Global Goal of Providing Affordable and Cleaner Energy for all in Burundi // Proceedings of the 2020 International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change, ICUE 2020. : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020.

65. Gaubert B. и др. Chemical Feedback From Decreasing Carbon Monoxide Emissions // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Т. 44. № 19. С. 9985–9995.

66. Gelaro R. и др. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Clim.* 2017. Т. 30. № 14. С. 5419–5454.

67. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). MERRA-2 instM_3d_asm_Np: 3d,Monthly mean,Instantaneous,Pressure-Level,Assimilation,Assimilated Meteorological Fields V5.12.4 // Goddard Earth Sci. Data Inf. Serv. Cent. (GES DISC). 2015a.

68. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). MERRA-2 tavgM_2d_aer_Nx: 2d,Monthly mean,Time-averaged,Single-Level,Assimilation,Aerosol Diagnostics V5.12.4.

69. GoB, World Bank. Burundi Country Environmental analysis: Understanding the Environment within the Dynamics of a Complex World: Linkages to Fragility, Conflict and Climate Change. Washington, D.C.: World Bank Group, 2017.

70. Goss C. H., Newsom S. A., Schildcrout J. S., Sheppard L., Kaufman J. D. Effect of ambient air pollution on pulmonary exacerbations and lung function in cystic fibrosis // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2004. Т. 169. № 7. С. 816–821.

71. Guan W. J., Zheng X. Y., Chung K. F., Zhong N. S. Impact of air pollution on the burden of chronic respiratory diseases in China: time for urgent action // *Lancet.* 2016. Т. 388. № 10054. С. 1939–1951.

72. Guldmann J.-M., Kim H.-Y. Modeling Air Quality in Urban Areas: A Cell-Based Statistical Approach // *Geogr. Anal.* 2010. Т. 33. № 2. С. 156–180.

73. Hansen L. P. Generalized method of moments estimation // *Macroeconometrics and Time Series Analysis*. : Palgrave Macmillan, London, 2010. C. 105–118.
74. Health Effects Institute. State of Global Air 2019. Special Report. Boston, MA: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME), 2019. 24 c.
75. Health Effects Institute. The State of Air Quality and Health Impacts in Africa. A Report from the State of Global Air Initiative. Boston; MA: , 2022. 1–23 c.
76. Health Effects Institute. State of Global Air 2024. The State of Global Air 2024 reports provides a comprehensive analysis of data for air quality and health impacts for countries around the world in 2021. Boston, MA: , 2024. 25 c.
77. Henricson D. Air Pollution by Motor Traffic in Dar-es Salaam Measurements and state of the art description // *KFB - Swedish Transp. Commun. Res. Board*. 1999.
78. Hoesly R. M. и др. Historical (1750--2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS) // *Geosci. Model Dev*. 2018. T. 11. № 1. C. 369–408.
79. Hussain M., Mahmud I. pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. // *J. Open Source Softw*. 2019. T. 4. № 39. C. 1556.
80. Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). Global Burden of Disease 2021: Findings from the GBD 2021 Study. Seattle, WA: IHME, 2024.
81. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
82. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B. B., Beeregowda K. N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // *Interdiscip. Toxicol*. 2014. T. 7. № 2. C. 60–72.
83. Järup L. Hazards of heavy metal contamination // *Br. Med. Bull*. 2003. T. 68. № 1. C. 167–182.

84. Jbaily A., Zhou X., Liu J., Lee T. H., Kamareddine L., Verguet S., Dominici F. Air pollution exposure disparities across US population and income groups // *Nature*. 2022. T. 601. № 7892. C. 228–233.
85. Kalisa E., Nagato E. G., Bizuru E., Lee K. C., Tang N., Pointing S. B., Hayakawa K., Archer S. D. J., Lacap-Bugler D. C. Characterization and Risk Assessment of Atmospheric PM 2.5 and PM 10 Particulate-Bound PAHs and NPAHs in Rwanda, Central-East Africa // *Environ. Sci. Technol.* 2018. T. 52. № 21. C. 12179–12187.
86. Kalisa E., Sudmant A., Ruberambuga R., Ujeneza Y., Bower J., Li S. The case for clean air in Kigali: An assessment of sources and solutions, economic impacts, and implications for policy // *Int. growth Cent.* 2022.
87. Kalisa W., Zhang J., Igbawua T., Henchiri M., Mulinga N., Nibagwire D., Umuhoza M. Spatial and temporal heterogeneity of air pollution in East Africa // *Sci. Total Environ.* 2023. T. 886. № December 2022. C. 163734.
88. Kammila S., Kappen J. F., Rysankova D., Hyseni B., Putti V. R. Clean and improved cooking in Sub-Saharan Africa : a landscape report (English). , 2014.
89. Kampa M., Castanas E. Human health effects of air pollution // *Environ. Pollut.* 2008. T. 151. № 2. C. 362–367.
90. Kaufmann D., Kraay A. Worldwide Governance Indicators // *Choice Rev. Online*. 2014. T. 52. № 03. C. 52-1636-52–1636.
91. Kebacho L. L. Large-scale circulations associated with recent interannual variability of the short rains over East Africa // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2022. T. 134. № 1. C. 1–19.
92. Keita S., Liousse C., Assamoi E. M. E.-M., Doumbia T., N'Datchoh E. T., Gnamien S., Elguindi N., Granier C., Yoboué V. African anthropogenic emissions inventory for gases and particles from 1990 to 2015 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. T. 13. № 7. C. 3691–3705.

93. Keller C. A., Long M. S., Yantosca R. M., Silva A. M. Da, Pawson S., Jacob D. J. HEMCO v1.0: a versatile, ESMF-compliant component for calculating emissions in atmospheric models // *Geosci. Model Dev.* 2014. T. 7. № 4. C. 1409–1417.
94. Kenya National Bureau of Statistics. Economic Survey 2017. Nairobi: Kenya National Bureau of Statistics, 2017.
95. Kim K. H., Kabir E., Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter // *Environ. Int.* 2015. T. 74. C. 136–143.
96. Kimutai S. K., Talai S. M. Household Energy Utilization Trends in Kenya: Effects of Peri Urbanization // *Eur. J. Energy Res.* 2021. T. 1. № 2. C. 7–11.
97. Kulick E. R., Kaufman J. D., Sack C. Ambient Air Pollution and Stroke: An Updated Review // *Stroke.* 2023. T. 54. № 3. C. 882–893.
98. Kurmi O. P., Semple S., Simkhada P., Cairns S Smith W., Ayres J. G. COPD and chronic bronchitis risk of indoor air pollution from solid fuel: A systematic review and meta-analysis // *Thorax.* 2010. T. 65. № 3. C. 221–228.
99. Lee I. M. и др. Effect of physical inactivity on major non-communicable diseases worldwide: An analysis of burden of disease and life expectancy // *Lancet.* 2012. T. 380. № 9838. C. 219–229.
100. Lee K. K., Miller M. R., Shah A. S. V. V. Air pollution and stroke // *J. stroke.* 2018. T. 20. № 1. C. 2–11.
101. Leelőssy Á., Molnár F., Izsák F., Havasi Á., Lagzi I., Mészáros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review // *Cent. Eur. J. Geosci.* 2014. T. 6. № 3. C. 257–278.
102. Lelieveld J., Pozzer A., Pöschl U., Fnais M., Haines A., Münzel T. Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective // *Cardiovasc. Res.* 2020. T. 116. № 11. C. 1910–1917.

103. Levy R. J. Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: A public health concern // *Neurotoxicol. Teratol.* 2015. T. 49. C. 31–40.
104. Li H., Qian X., Wang Q. Heavy metals in atmospheric particulate matter: A comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation // *Environ. Sci. Technol.* 2013. T. 47. № 23. C. 13210–13211.
105. Li J. xiao, Zhong Q. qiong, Yuan S. xiang, Zhu F. Trends in deaths and disability-adjusted life-years of stroke attributable to low physical activity worldwide, 1990–2019 // *BMC Public Health.* 2023. T. 23. № 1. C. 1–14.
106. Li Z., Bi R., Sun S., Chen S., Chen J., Hu B., Jin H. The Role of Oxidative Stress in Acute Ischemic Stroke-Related Thrombosis // *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2022. T. 2022.
107. Lin H. и др. Harmonized Emissions Component (HEMCO) 3.0 as a versatile emissions component for atmospheric models: Application in the GEOS-Chem, NASA GEOS, WRF-GC, CESM2, NOAA GEFS-Aerosol, and NOAA UFS models // *Geosci. Model Dev.* 2021. T. 14. № 9. C. 5487–5506.
108. Liou L., Joe W., Kumar A., Subramanian S. V. Inequalities in life expectancy: An analysis of 201 countries, 1950–2015 // *Soc. Sci. Med.* 2020. T. 253. C. 112964.
109. Liousse C., Assamoi E., Criqui P., Granier C., Rosset R. Explosive growth in African combustion emissions from 2005 to 2030 // *Environ. Res. Lett.* 2014. T. 9. № 3. C. 035003.
110. Liu C. и др. Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities // *N. Engl. J. Med.* 2019. T. 381. № 8. C. 705–715.
111. Liu Z., Acker J. Giovanni: The bridge between data and science // *Eos (Washington. DC).* 2017. T. 98.
112. Lodge J. P. Selected methods of measuring air pollutants // *Atmos. Environ.* 2003.

T. 11. № 8. C. 788.

113. Maheswaran R. Air pollution and stroke – an overview of the evidence base // *Spat. Spatiotemporal. Epidemiol.* 2016. T. 18. C. 74–81.

114. Makoni M. Air pollution in Africa // *Lancet. Respir. Med.* 2020. T. 8. № 7. C. e60–e61.

115. Makri A., Stilianakis N. I. Vulnerability to air pollution health effects // *Int. J. Hyg. Environ. Health.* 2008. T. 211. № 3–4. C. 326–336.

116. Mammino L. Biomass burning in sub-saharan africa: Chemical issues and action outreach. Netherlands: Springer Nature, 2020. 1–162 c.

117. Manirakiza N., Bisore S., Ndiokubwayo N., Niyuhire E., Bigumandondera P., Nimbona G. Caractérisation des déchets solides municipaux // *Afrique Sci.* 2023. T. 22. № 5. C. 10–21.

118. Marais E. A., Wiedinmyer C. Air Quality Impact of Diffuse and Inefficient Combustion Emissions in Africa (DICE-Africa) // *Environ. Sci. Technol.* 2016. T. 50. № 19. C. 10739–10745.

119. Marchant R., Mumbi C., Behera S., Yamagata T. The Indian Ocean dipole - The unsung driver of climatic variability in East Africa // *Afr. J. Ecol.* 2007. T. 45. № 1. C. 4–16.

120. Marković D. M., Marković D. A., Jovanović A., Lazić L., Mijić Z. Determination of O₃, NO₂, SO₂, CO and PM₁₀ measured in Belgrade urban area // *Environ. Monit. Assess.* 2008. T. 145. № 1–3. C. 349–359.

121. Mazzeo A., Burrow M., Quinn A., Marais E. A., Singh A., Ng'ang'a D., Gatari M. J., Pope F. D. Evaluation of the WRF and CHIMERE models for the simulation of PM_{2.5} in large East African urban conurbations // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. T. 22. № 16. C. 10677–10701.

122. Mbuligwe S. E., Kassenga G. R. Automobile air pollution in Dar es Salaam City, Tanzania // *Sci. Total Environ.* 1997. T. 199. № 3. C. 227–235.
123. Mfinanga D. Challenges and Opportunities for the Integration of Commuter Minibus Operators Into the Dar Es Salaam City Brt System // *Codatu Xv.* 2012.
124. Miller R., Davis G., Lavoie G., Newman C., Gardner T. A Super-Extended Zel'dovich Mechanism for No_x Modeling and Engine Calibration // *SAE Trans.* 1998. T. 107. C. 1090–1100.
125. Mmari A. G., Hassan H. A., Bencs L. Daytime concentrations of minor and trace elements in atmospheric aerosols at four sampling sites of Dar es Salaam, Tanzania // *Air Qual. Atmos. Heal.* 2020. T. 13. № 6. C. 739–750.
126. Mozumder C., Reddy K. V., Pratap D. Air Pollution Modeling from Remotely Sensed Data Using Regression Techniques // *J. Indian Soc. Remote Sens.* 2013. T. 41. № 2. C. 269–277.
127. Muigua K. Safeguarding the Environment through Effective Pollution Control in Kenya Kariuki Muigua Safeguarding the Environment through Effective Pollution Control in Kenya Safeguarding the Environment through Effective Pollution Control in Kenya // 2019.
128. Mungyereza B. P. Uganda Bureau of Statistics. Kampala: Uganda Bureau of Statistics, 2016.
129. Mwaanga P., Silondwa M., Kasali G., Banda P. M. Preliminary review of mine air pollution in Zambia // *Heliyon.* 2019. T. 5. № 9. C. e02485.
130. Naré H., Kamakaté F. Developing a roadmap for the adoption of clean fuel and vehicle standards in Southern and Western Africa // *ICCT.* 2017.
131. National Environment Management Authority. Kenya State of Environment Report 2019-2021: Environment and Natural Resources Governance // 2021. № May. C.

pp220.

132. National Environment Management Authority (NEMA). Supporting Transition to a Middle Income Status and Delivery of Sustainable Development Goals. Kampala: NEMA, 2016.

133. Ngo Tho Hung. Urban air quality modelling and management in Hanoi, Vietnam. HANOI, VIETNAM: National Environmental Research Institute, 2010. 211 c.

134. Nicholson S. E. A Review of Climate Dynamics and Climate Variability in Eastern Africa // *The Limnology, Climatology and Paleoclimatology of the East African Lakes*. : Routledge, 2019. C. 25–56.

135. Nowak D. J., Crane D. E., Stevens J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States // *Urban For. Urban Green*. 2006. T. 4. № 3–4. C. 115–123.

136. Nsengimana H., Bizimana J. P., Sezirahiga Y. A Study on Air Pollution in Rwanda With Reference To Kigali City and Vehicular Emissions. Kigali–Rwanda: REMA, 2011. 1–129 c.

137. Okello G., Nantanda R., Awokola B., Thondoo M., Okure D., Tatah L., Bainomugisha E., Oni T. Air quality management strategies in Africa: A scoping review of the content, context, co-benefits and unintended consequences // *Environ. Int.* 2023. T. 171. C. 107709.

138. Opio R., Mugume I., Nakatumba-Nabende J. Understanding the trend of NO₂, SO₂ and CO over East Africa from 2005 to 2020 // *Atmosphere (Basel)*. 2021. T. 12. № 10. C. 1283.

139. Perera F. P. и др. Early-life exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and ADHD behavior problems // *PLoS One*. 2014. T. 9. № 11. C. e111670.

140. Phillip E., Langevin J., Davis M., Kumar N., Walsh A., Jumbe V., Clifford M., Conroy R., Stanistreet D. Improved cookstoves to reduce household air pollution

exposure in sub-Saharan Africa: A scoping review of intervention studies // PLoS One. 2023. T. 18. № 4 April.

141. Pope D. P., Mishra V., Thompson L., Siddiqui A. R., Rehfuess E. A., Weber M., Bruce N. G. Risk of low birth weight and stillbirth associated with indoor air pollution from solid fuel use in developing countries // Epidemiol. Rev. 2010. T. 32. № 1. C. 70–81.

142. Power M. C., Kioumourtzoglou M. A., Hart J. E., Okereke O. I., Laden F., Weisskopf M. G. The relation between past exposure to fine particulate air pollution and prevalent anxiety: Observational cohort study // BMJ. 2015. T. 350.

143. Power M. C., Adar S. D., Yanosky J. D., Weuve J. Exposure to air pollution as a potential contributor to cognitive function, cognitive decline, brain imaging, and dementia: A systematic review of epidemiologic research // Neurotoxicology. 2016. T. 56. C. 235–253.

144. Provençal S., Buchard V., Silva A. M. da, Leduc R., Barrette N. Evaluation of PM surface concentrations simulated by Version 1 of NASA's MERRA Aerosol Reanalysis over Europe // Atmos. Pollut. Res. 2017. T. 8. № 2. C. 374–382.

145. Raaschou-Nielsen O. и др. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: Prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE) // Lancet Oncol. 2013. T. 14. № 9. C. 813–822.

146. Rahman M. M., Rana R., Khanam R. Determinants of life expectancy in most polluted countries: Exploring the effect of environmental degradation // PLoS One. 2022. T. 17. № 1 January.

147. Raub J. A. Health effects of exposure to ambient carbon monoxide // Chemosph. - Glob. Chang. Sci. 1999. T. 1. № 1–3. C. 331–351.

148. REMA. Inventory of Sources of Air Pollution in Rwanda // 2018. № January. C. 176.

149. Richardson S., Monfort C. Ecological correlation studies // *Spat. Epidemiol. methods Appl.* 2000. C. 205–220.
150. Roodman D. Practitioners' corner: A note on the theme of too many instruments // *Oxf. Bull. Econ. Stat.* 2009. T. 71. № 1. C. 135–158.
151. Royal Society. Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. London SW1Y 5AG: Techset Composition Limited, 2008. 148 с.
152. Sarfo J. O. и др. Acute lower respiratory infections among children under five in Sub-Saharan Africa: a scoping review of prevalence and risk factors // *BMC Pediatr.* 2023. T. 23. № 1.
153. Schlesinger R. B., Lippmann M. Nitrogen oxides // *Environmental Toxicants: Human Exposures and Their Health Effects.* : wiley, 2020. C. 721–781.
154. Schraufnagel D. E. и др. Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 2: Air Pollution and Organ Systems. : Chest, 2019.
155. Seinfeld J. H., Pandis S. H. Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change. : Willey, 2016. Вып. Third. 1149 с.
156. Shayo F. K., Bintabara D. Household Air Pollution from Cooking Fuels Increases the Risk of Under-Fives Acute Respiratory Infection: Evidence from Population-Based Cross-Sectional Surveys in Tanzania // *Ann. Glob. Heal.* 2022. T. 88. № 1. C. 1–13.
157. Singh A. и др. Air quality assessment in three east african cities using calibrated low-cost sensors with a focus on road-based hotspots // *Environ. Res. Commun.* 2021. T. 3. № 7. C. 075007.
158. Soppelsa M. E., Lozano-Gracia N., Xu L. C. The Effects of Pollution and Business Environment on Firm Productivity in Africa. : World Bank, Washington, DC, 2019.
159. Southerland V. A., Brauer M., Mohegh A., Hammer M. S., Donkelaar A. van,

- Martin R. V., Apte J. S., Anenberg S. C. Global urban temporal trends in fine particulate matter (PM_{2.5}) and attributable health burdens: estimates from global datasets // *Lancet Planet. Heal.* 2022. T. 6. № 2. C. e139–e146.
160. State of Global Air Report, HEI, IHME. State of Global Air Report 2024. , 2024.
161. Staudt A. C., Jacob D. J., Ravetta F., Logan J. A., Bachiochi D., Sandholm S., Ridley B., Singh H. B., Talbot B. Sources and chemistry of nitrogen oxides over the tropical Pacific // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2003. T. 108. № 2. C. 8239.
162. Steven Pawson J. G. GMAO - Global Modeling and Assimilation Office Research Site [Электронный ресурс]. URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 07.02.2023).
163. Stevens C. J., Bell J. N. B., Brimblecombe P., Clark C. M., Dise N. B., Fowler D., Lovett G. M., Wolseley P. A. The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation: Air pollution impacts on vegetation // *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2020. T. 378. № 2183.
164. Stordal F., Bekki S., Hauglustaine D., Millan M., Sausen R., Schuepbach E., Stevenson D., Dorland R. Van, Volz-Thomas A. Climate impact of tropospheric ozone changes. , 2003. C. 73–95.
165. Streiner D. L. Finding our way: An introduction to path analysis // *Can. J. Psychiatry.* 2005. T. 50. № 2. C. 115–122.
166. Subramanian R. и др. Air pollution in Kigali, Rwanda: spatial and temporal variability, source contributions, and the impact of car-free Sundays // *Clean Air J.* 2020. T. 30. № 2.
167. Sunil Dahiya, Andreas Anhäuser, Aidan Farrow, Hubert Thieriot, Avinash Chanchal L. M. Ranking the World's Sulfur Dioxide (SO₂) Hotspots: 2019-2020 A closer look at the colourless gas that is poisoning our air and health. : Center for Research on Energy and Clean Air & Greenpeace India, 2020. 1–48 с.

168. Sunyer J. и др. Chronic bronchitis and urban air pollution in an international study // Occup. Environ. Med. 2006. Т. 63. № 12. С. 836–843.
169. Tesema G. A., Teshale A. B., Tessema Z. T. Incidence and predictors of under-five mortality in East Africa using multilevel Weibull regression modeling // Arch. Public Heal. 2021. Т. 79. № 1. С. 1–13.
170. The World Bank Group. Tanzania 2019 Country Environmental Analysis. : World Bank, Washington, DC, 2019.
171. Thompson J. E. Airborne Particulate Matter: Human Exposure and Health Effects // J. Occup. Environ. Med. 2018. Т. 60. № 5.
172. Tsai S. P., Lee E. S., Hardy R. J. The effect of a reduction in leading causes of death: potential gains in life expectancy // Am. J. Public Health. 1978. Т. 68. № 10. С. 966–971.
173. Tsati E. и др. WHO Ambient Air Quality Database: 2022 Status Report // 2022. С. 28.
174. UN Statistics Division. Demographic and Social Statistics [Электронный ресурс]. URL: <https://unstats.un.org/unsd/demographic-social/products/vitstats/> (дата обращения: 24.06.2025).
175. UNEP. Air pollution hurts the poorest most // United Nations Environ. Program. 2019. № May. С. 19–21.
176. UNICEF. The impact of climate, energy, and environment on children and their families in Burundi. Bujumbura-Burundi: UNICEF Burundi, 2021. 1–24 с.
177. USAID. Burundi Foreign Assistance Act Sections 118/119. Tropical Forests and Biodiversity Analysis. Waltham, MA 02451 USA: Agency for International Development (USAID), 2022. 101 с.
178. Vandyck T., Ebi K. L., Green D., Cai W., Vardoulakis S. Climate change, air

pollution and human health // Environ. Res. Lett. 2022. T. 17. № 10. C. 100402.

179. Viau C., Hakizimana G., Bouchard M. Indoor exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons and carbon monoxide in traditional houses in Burundi // Int. Arch. Occup. Environ. Health. 2000. T. 73. № 5. C. 331–338.

180. Walmsley B., Husselman S. Handbook on Environmental Assessment Legislation in Selected Countries in Sub-Saharan Africa // Dev. Bank South. Africa. Unpubl. 2019.

181. Walter S. D. The ecologic method in the study of environmental health. I. Overview of the method. // Environ. Health Perspect. 1991. T. 94. C. 61–65.

182. Wang S., Ma X., Smith J. Bridging the gap: Enhancing prominence and provenance of NASA datasets in research publications // Data Sci. J. 2024. T. 23. C. 1.

183. Wang Z. Energy and Air Pollution // Compr. Energy Syst. 2018. T. 1–5. C. 909–949.

184. WBK & Associates Inc. Sulphur dioxide: environmental effects, fate and behaviour. Edmonton, Alberta: Alberta Environment, 2003. 1–73 c.

185. WHO. Tracking Universal Health Coverage in the WHO African Region, 2022 | WHO | Regional Office for Africa. : WHO Press, 2022.

186. WHO. Burden of disease attributable to unsafe drinking-water, sanitation and hygiene. Geneva–Switzerland: WHO Press, 2023.

187. Wilcox R. R. Modern Insights about Pearson’s Correlation and Least Squares Regression // Int. J. Sel. Assess. 2001. T. 9. № 1–2. C. 195–205.

188. Wipfli H., Kumie A., Atuyambe L., Ouge O., Rugigana E., Zacharias K., Simane B., Samet J., Berhane K. The GEOHealth Hub for Eastern Africa: Contributions and Lessons Learned // GeoHealth. 2021. T. 5. № 6. C. e2021GH000406.

189. Wooldridge J. M. Applications of generalized method of moments estimation // J.

Econ. Perspect. 2001. T. 15. № 4. C. 87–100.

190. World Bank. Burundi Country Environmental Analysis. Bujumbura, Burundi: World Bank, 2017. 170 c.

191. World Bank. World Development Indicators | Data Catalog // Washingt. World Bank. 2024.

192. World Health Organization. Global action plan for the prevention and control of noncommunicable diseases 2013-2020. : World Health Organization, 2013.

193. World Health Organization. Preventing noncommunicable diseases (NCDs) by reducing environmental risk factors. Geneva–Switzerland: WHO Press, 2017.

194. World Health Organization. Air quality, energy and health // World Heal. Organ. 2020a.

195. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. Geneva–Switzerland: World Health Organization, 2020b. 6–8 c.

196. World Health Organization. 7 Million Premature Deaths Annually Linked to Air Pollution // World Heal. Organ. 2024.

197. Wu M. и др. Effects of African BaP emission from wildfire biomass burning on regional and global environment and human health // Environ. Int. 2022. T. 162. № March. C. 107162.

198. Yan T., Leng H., Yuan Z. Construction of the “Full Path” of restorative effects on older adults’ mental health in parks under seasonal differences: taking Changchun as an example // Front. Public Heal. 2024. T. 12.

199. Yang C., Zhao W., Deng K., Zhou V., Zhou X., Hou Y. The association between air pollutants and autism spectrum disorders // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. T. 24. № 19. C. 15949–15958.

200. Yang S. C., Lin F. Y., Wu T. I., Wu C. Da, Wang J. Der. PM2.5 exposure and risk of lung adenocarcinoma in women of Taiwan: A case–control study with density sampling // *Respirology*. 2022. T. 27. № 11. C. 951–958.
201. Yang Y. и др. Alcohol consumption and risk of coronary artery disease: A dose-response meta-analysis of prospective studies // *Nutrition*. 2016. T. 32. № 6. C. 637–644.
202. Yasuda K., Kinugasa T. Effects of adult mortality rate on educational attainment: empirical analysis using cross-country panel data // *Int. J. Econ. Policy Stud.* 2022. T. 16. № 2. C. 409–422.
203. Ye Y., Tao Q., Wei H. Public health impacts of air pollution from the spatiotemporal heterogeneity perspective: 31 provinces and municipalities in China from 2013 to 2020 // *Front. Public Heal.* 2024. T. 12. C. 1422505.
204. Yi W. Y., Lo K. M., Mak T., Leung K. S., Leung Y., Meng M. L. A survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems // *Sensors (Switzerland)*. 2015. T. 15. № 12. C. 31392–31427.
205. Zannetti P., Daly A. An Introduction to Air Pollution – Definitions, Classifications, and History. California–USA: The Arab School for Science and Technology and The EnviroComp Institute, 2007. 14 с.
206. Zanobetti A., Schwartz J. The effect of particulate air pollution on emergency admissions for myocardial infarction: A multicity case-crossover analysis // *Environ. Health Perspect.* 2005. T. 113. № 8. C. 978–982.
207. Zhang R., Wang G., Guo S., Zamora M. L., Ying Q., Lin Y., Wang W., Hu M., Wang Y. Formation of Urban Fine Particulate Matter // *Chem. Rev.* 2015. T. 115. № 10. C. 3803–3855.
208. Березин И. И., Сергеев А. К. Загрязнение атмосферного воздуха как фактор развития болезней дыхательной системы // *Здоровье населения и среда обитания*.

2018. № 1 (298).

209. Всемирная организация здравоохранения. Загрязнение атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (дата обращения: 18.10.2023а).

210. Всемирная организация здравоохранения. Загрязнение воздуха внутри жилых помещений [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health> (дата обращения: 17.10.2023b).

211. Зенченко С. А., Горбачев Н. Н. Мониторинг окружающей среды // Общество с ограниченной ответственностью «Медисонт». 2018. Т. С. С. 158–189.

212. Иванов М. Ф., Киверин А. Д., Клумов Б. А., Фортов В. Е. От горения и детонации к окислам азота // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 3. С. 247–264.

213. Кислицына В. В., Ликонцева Ю. С., Суржиков Д. В., Голиков Р. А. Сравнительная оценка риска нарушения здоровья населения двух промышленных центров Кузбасса от воздействия атмосферных загрязнений // Медицина труда и промышленная экология. 2023. Т. 63. № 7. С. 468–473.

214. Котельников С. Н. Основные механизмы взаимодействия озона с живыми системами и особенности проблемы приземного озона для России // Труды ИОФАН. 2015. Т. 71. С. 10–41.

215. Кузнецов В. А. Разработка способов интегральной оценки влияния городов на состояние окружающей среды и технических решений по минимизации приоритетных факторов химического воздействия // 2009.

216. Куркудилова А. В., Макарова А. С., Тарасова Н. П., Лапченко В. А., Евстафьева Е. В. Процессы образования тропосферного озона в условиях Крымского полуострова // Безопасность в техносфере. 2018. Т. 7. № 1. С. 13–19.

217. Ларионов В. Г., Безрукова Т. Л. Тревожные факторы экологической безопасности при обеспечении здоровья нации // Экологические и биологические основы повышения продуктивности и устойчивости природных и искусственно возобновленных лесных экосистем. , 2018. С. 347–355.
218. Макаров Е. О. Обзор существующих вегетационных индексов при выполнении анализа земной поверхности [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2023/06/100430> (дата обращения: 23.05.2024).
219. Малышева А. Г., Калинина Н. В., Юдин С. М. Химическое загрязнение воздушной среды жилых помещений как фактор риска здоровью населения // Анализ риска здоровью. 2022. Т. 8. № 3. С. 72–82.
220. Мухаметжанова З. Т. Современное состояние проблемы загрязнения окружающей среды // Гигиена труда и медицинская экология. 2017. № 2 (55).
221. Петрович Ч. В., Алексеевич С. С., Борисович Г. А., Николаевна П. О., Юрьевич В. А. Воздействие промышленных загрязнений атмосферного воздуха на организм работников, выполняющих трудовые операции на открытом воздухе в условиях холода // Медицина труда и промышленная экология. 2014. № 9.
222. Реброва С. А., Сергеева Г. Р., Асатиани Н. З. Клиническое значение оксида азота выдыхаемого воздуха, назального оксида азота, эозинофилов периферической крови как маркеров воспаления дыхательных путей при бронхиальной астме и аллергическом рините // Российская оториноларингология. 2023. Т. 22. № 1. С. 122.
223. Рыбакова О. Г. Анализ биологических маркеров бронхиальной астмы у детей, перенесших острый обструктивный бронхит, и детей с впервые выявленной бронхиальной астмой // Научные исследования от теории к практике. 2015. Т. 1. № 4. С. 100–104.
224. Сериккановна Ж. К., Әмірханқызы А. С. Атмосфера и влияние ее на детей //

Universum медицина и фармакология. 2024. № 4 (109).

225. Скипин Д. Л., Юхтанова Ю. А., Крыжановский О. А., Токмакова Е. Г.

Ожидаемая продолжительность жизни в регионах России // Экономические и социальные перемены факты, тенденции, прогноз. 2022. Т. 15. № 2. С. 156–171.

226. Теплая Г. А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 1 (23). С. 182–192.

227. Фахриддиновна Ф. Ф., Қизи А. А. А., Ўғли К. Ф. Б. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ КАК ГЛОБАЛЬНАЯ УГРОЗА БЕЗОПАСНОСТИ. // J. Univers. Sci. Res. 2023. Т. 1. № 10. С. 389–395.

228. Швыряев А. А., Меньшиков В. В. Оценка риска воздействия загрязнения атмосферы в исследуемом регионе // М. Изд-во МГУ. 2022. С. 1–124.