

*На правах рукописи*

**БАХАРАНЕ ВАЛЕРИЕН**

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

1.5.15. Экология

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата биологических наук

Москва - 2025

Работа выполнена в департаменте экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

**Научный руководитель:**

**Шаталов Андрей Борисович,**

Кандидат технических наук, доцент, доцент департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции института экологии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

**Официальные оппоненты:**

**Суржиков Дмитрий Вячеславович,**

доктор биологических наук, доцент, заведующий лабораторией экологии человека и гигиены окружающей среды ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем гигиены и профессиональных заболеваний»

**Белякова Ольга Ивановна,**

кандидат биологических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды механико-технологического факультета ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

**Ведущая организация:**

ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека

Защита диссертации состоится 20 января 2026 года в 16:00 на заседании диссертационного совета ПДС 0800.002 ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: 115093, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8/5, к. 1096.

С диссертацией можно ознакомиться в УНИБЦ (Научной библиотеке) ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 6 и на сайте <http://dissovet.rudn.ru>.

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах: <http://vak2.ed.gov.ru> и <http://dissovet.rudn.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

ПДС 0800.002,

кандидат биологических наук

Аникина Елизавета Вячеславовна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), загрязнение воздуха является одной из важнейших экологических причин при заболевании человека (World Health Organization, 2024) и в ряде заболеваний – один из основных факторов риска, приводящих к увеличению 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 количество 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, источников загрязнения воздуха, связанных с технологиями, 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 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 Мировом, 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 на континенте (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 смертности и заболеваемости людей в регионе (Clarke и др., 2022). Кроме того, восточная Африка в настоящее время переживает быстрый эпидемиологический переход, с переходом от преобладания инфекционных заболеваний к растущей нагрузке неинфекционными заболеваниями (НИЗ). Этот переход в значительной степени обусловлен урбанизацией, изменениями в образе жизни и экологическими факторами, включая плохое качество воздуха, которое усугубляет заболеваемость и тяжесть НИЗ в регионе (Misganaw и др., 2023; Taghian и др., 2024). 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 точным 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** – оценка уровней 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 (НАР), мелкодисперсные частицы (ТЧ<sub>2,5</sub>), озон (O<sub>3</sub>), диоксид серы (SO<sub>2</sub>) 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<sub>x</sub>) являются сжигание биомассы, тогда как, SO<sub>2</sub> 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 методику повторного анализа 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 основных статистических 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 ТЧ<sub>2,5</sub>, бытовом загрязнении воздуха (Household Air Pollution, HAP), O<sub>3</sub>, CO, SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>. 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), программой Медико-демографических исследований (МДИ) (Demographic and Health Surveys, DHS), Институтом показателей и оценки состояния здоровья (Institute of Health Metrics and Evaluation, IHME). Возможные последствия 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 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 «Обобщенный метод моментов» (General Method of Moment, GMM). Статистический анализ и модели были выполнены с использованием программного обеспечения Python, R (версия 4.3.1) и данных операторов климатических данных (Climate Data Operators, CDO).

**Степень достоверности и апробации результатов.** Степень достоверности результатов проведённых исследований обеспечивается использованием современных методов исследования, а результаты анализа проводятся по общепринятым методикам, что гарантирует их воспроизводимость и проверяемость. Результаты исследований доложены на пяти международных научных конференциях.

**Защищаемые положения:**

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 влиянию 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 Ежегодной международной научно–практической конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования» (АПЭП-2023), Москва (Россия); 22–24 апреля 2022 г; Молодёжный форум «Россия-Африка: Ядерное образование для устойчивого развития» (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 (АПЭП-2024), «Международная научно-практическая конференция», Москва (Россия), 26–27 апреля 2024 г; Конференция «Экологический мониторинг и исследование антропогенных воздействий на окружающую среду» состоялась 18–19 марта 2025 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

**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 материалах симпозиумов и конференций, и 2 статьи в научных журналах, 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 228 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 добился бы успеха без поддержки Инезы Эллы Дарин, Бвизы Эллы Варды и ее прекрасной матери Ныираманы Жаклин, которые поддерживали его в течение всего периода, когда он находился вдали от них.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1 Обзор Литературы

В первой главе представлен обзор литературы по загрязнению воздуха в контексте экологических проблем, описываются потенциальные загрязнители, уделяется особое внимание их комплексному и индивидуальному влиянию на здоровье и анализируются исследования, проведённые в странах Восточной Африки, с целью выявления пробелов в существующей литературе по региону.

### Глава 2 Материал и методология исследования

**2.1 Описание территории исследования.** Анализ сосредоточен на пяти странах Восточной Африки (Бурунди, Кения, Объединённая Республика Танзания, Руанда и Уганда). В этих странах проживает население, которое имеет схожие антропологические, культурные и генетические особенности и сопоставимые источники загрязнения воздуха. В 2023 году общая численность населения этих стран составляла более 184 926 876 человек на площади 1 823 390 км<sup>2</sup> (UN Statistics Division, 2025). Уникальный рельеф и разнообразные климатические условия региона влияют на растительность, биоразнообразие и занятия людей.

**2.2 Источники данных.** Потенциальные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу были оценены для 2022 года с использованием пакета программ HEMCO (Harmonized Emission Component). Для адаптации пакета программ HEMCO к региону Центральной и Восточной Африки антропогенные выбросы были рассчитаны на основе данных DICE-Africa (Diffuse and Inefficient Combustion Emissions in Africa). Антропогенные выбросы, отсутствующие в базе данных DICE-Africa, были дополнены с помощью базы данных EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research). Выбросы от сжигания биомассы были получены из GFAS (Global Fire Assimilation System). Выбросы вулканов были собраны NASA Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). Выбросы самолётов были оценены на основе регламентов AEIC2019 (Aircraft Emissions Inventory Code, AEIC). Кроме того, данные о выбросах с судов были получены из CEDS (Community Emissions Data Systems). Помимо оценки выбросов с помощью программного пакета HEMCO, были проанализированы источники и тенденции антропогенных выбросов по данным EDGAR за период с 1998 по 2022 год (European Commission, 2024). Более 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). Для анализа уровня загрязнения воздуха в регионе данные по NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> получены из MERRA-2, а по TCH<sub>2,5</sub> в компании ACAG (Atmospheric Composition Analysis Group). Данные наземного мониторинга TCH<sub>2,5</sub> были получены в рамках проекта AirQo (инновационный проект, инициированный исследователями из Университета Макерере, направлен на улучшение мониторинга качества воздуха, сбора данных и управления ими, особенно в условиях нехватки ресурсов по всей Африке) для всех стран, кроме Танзании, где AirQo не проводит мониторинг.



Используя данные организации Global Burden of Disease, (GBD), мы проанализировали последствия для здоровья, связанные с загрязнением воздуха в регионе Восточной Африки. Данные по этим странам с 1992 год, касающиеся общей смертности, жизни с приобретенной инвалидностью, DALYs (Disability-Adjusted Life Years) и сокращения продолжительности жизни, YLLs (Years of Life Lost), связанных с загрязнением воздуха, для всех возрастов и полов. Мы сосредоточились на отдельных данных по оценке заболеваемости и смертности, связанных с ишемической болезнью сердца (ИБС), инсультом, хронической обструктивной болезнью лёгких (ХОБЛ), раком трахеи, бронхов и лёгких (РТБЛ), Инфекциями нижних дыхательных путей (ИНДП) и сахарным диабетом 2-го типа (СД2).

Растительный покров региона оценивался с помощью расширенного индекса растительности, EVI (Enhanced Vegetation Index). Данные EVI получены с помощью прибора MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на спутнике дистанционного зондирования окружающей среды Terra. Индексы растительности Terra/MODIS (MODIS13A3) версии 6.1 предоставляются ежемесячно с пространственным разрешением 1 км в виде сетки уровня 3 в синусоидальной проекции.

Данные из отчёта GBD также использовались для оценки роли воздействия загрязнения воздуха и других стрессовых факторов, влияющих на здоровье окружающей среды, в сокращении ожидаемой продолжительности жизни в регионе. Для оценки взаимозависимости факторов в снижении ожидаемой продолжительности жизни мы собрали показатели мирового развития (World Development Indicators, WDI) из базы данных Всемирного банка и данные о загрязнении твёрдыми частицами поверхности, взвешенной по численности населения, из ACAG (Atmospheric Composition Analysis Group).

**2.3 Методологии анализа данных.** В данном исследовании проведён анализ потенциальных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в экваториальном регионе Восточной Африки с использованием автономной модели НЕМСО. Анализ источников выбросов проводился с использованием описательной статистики, меры центральной тенденции, а для определения временной изменчивости оценивались месячные и сезонные выбросы. Анализ тенденций проводился с помощью теста Манна-Кендалла. Уровень загрязнения воздуха оценивался путём усреднения суточных проб к среднемесячным и годовым показателям. Последствия загрязнения воздуха для здоровья оценивались с помощью многоуровневой логистической регрессии (Multilevel logistic regression) и мультилинейных регрессионных моделей (Multi linear regression models). Модель линейной регрессии также использовалась для оценки взаимодействия между загрязнением воздуха и растительным покровом, поскольку они влияют на наблюдаемые показатели связанной с инсультом смертности в регионе. Роль загрязнения воздуха в сокращении продолжительности жизни, наряду с другими экологическими и поведенческими факторами, оценивалась путём построения стандартных таблиц смертности. Для проверки и количественной оценки направления эффектов и причинно-следственных зависимостей между переменными, определяющими продолжительность жизни, использовалась методология анализа пути (Path analysis). Взаимосвязь между

загрязнением воздуха и уровнем смертности взрослого населения в регионе была смоделирована с использованием общего метода моментов (OMM) (General Method of Moments, GMM). Статистический анализ и модели были выполнены с использованием программного обеспечения Python, R (версия 4.3.1), ArcGIS Pro и CDO (Climate Data Operators) в дополнение к Microsoft Excel.

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

#### 3.1 Выбросы загрязняющих воздуха в регионе Центральной Восточной Африки

Общий поток выбросов, смоделированный с помощью пакета программ NEMCO (в  $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$ )  $\text{SO}_2$ , CO, NO и твёрдых частиц (пыли), представлен на рисунке 1. Годовые выбросы CO,  $\text{SO}_2$  и NO выше в районе экватора с севера на юг, причём южные выбросы более значительны, чем северные. В частности, выбросы  $\text{SO}_2$  были оценены сначала путём удаления вулканических источников, а затем путём их включения в конфигурацию модели. Выбросы  $\text{NO}_2$  наиболее высоки на юго-востоке Уганды и в центральной части Эфиопии. Регион вулкана Ньярагонго в Восточной Демократической Республике Конго является основным источником выбросов  $\text{SO}_2$ , как отмечают исследователи, Опио, Мугуме и Накатумба-Набенде (2021).

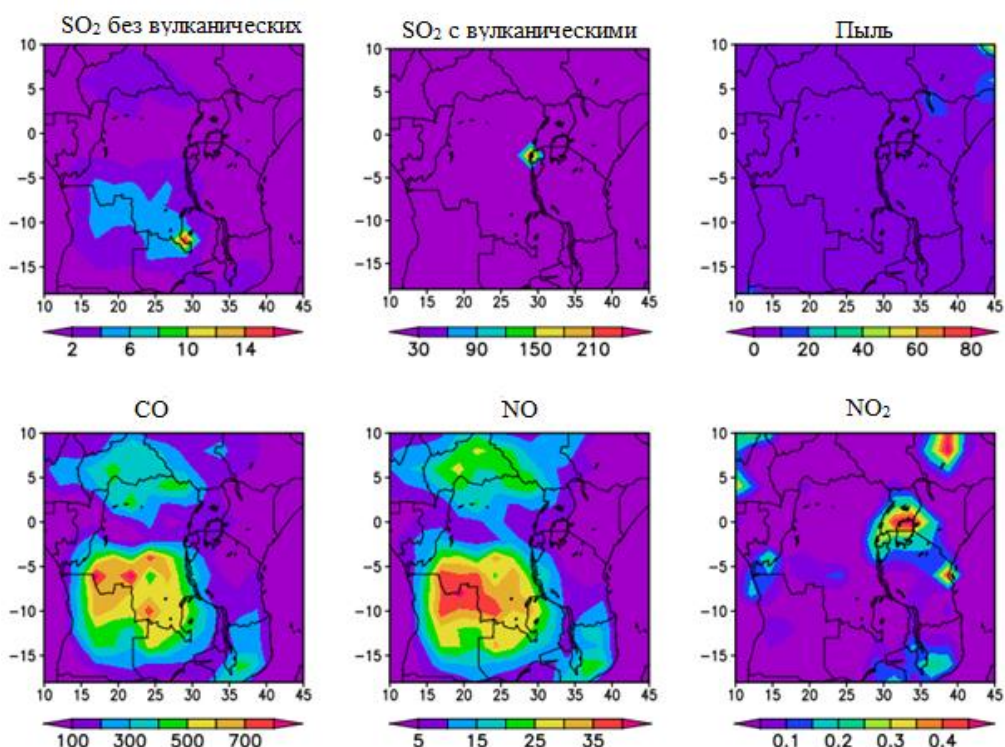


Рисунок 1 – Пространственные изменения выбросов загрязнения воздуха в странах Экваториальной Восточной Африки в 2022 году (цветные полосы указаны в  $\text{кг}/\text{м}^2/\text{год}$ ).

Количественная оценка выбросов была проведена путём суммирования общих годовых выбросов для каждого вида загрязняющих веществ и использования базы данных NEMCO для определения наиболее влиятельных секторов на 2022 год. Сжигание

биомассы является основным источником CO и NO, в то время как вулканические источники доминируют в выбросах SO<sub>2</sub> (Таблица 1).

Таблица 1 – Выбросы по секторам и загрязняющим веществам за 2022 год (в гигаграммах видов)

| Источник          | SO <sub>2</sub> | CO        | NO <sub>2</sub> | 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   | -        |

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 рисунке 2. С 1998 по 2022 год антропогенные выбросы CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> и TCH<sub>2,5</sub> из всех вместе взятых стран увеличились на 191,7%; 52,7%; 180,1% и 74,6% с ежегодным темпом прироста 4,4%; 1,7%; 4,2% и 2,4% соответственно. Наш анализ показал, что Эфиопия является лидером в регионе по выбросам CO и TCH<sub>2,5</sub>, в то время как самые высокие средние показатели по выбросам SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> у Замбии и Судана, соответственно (рисунок 2).

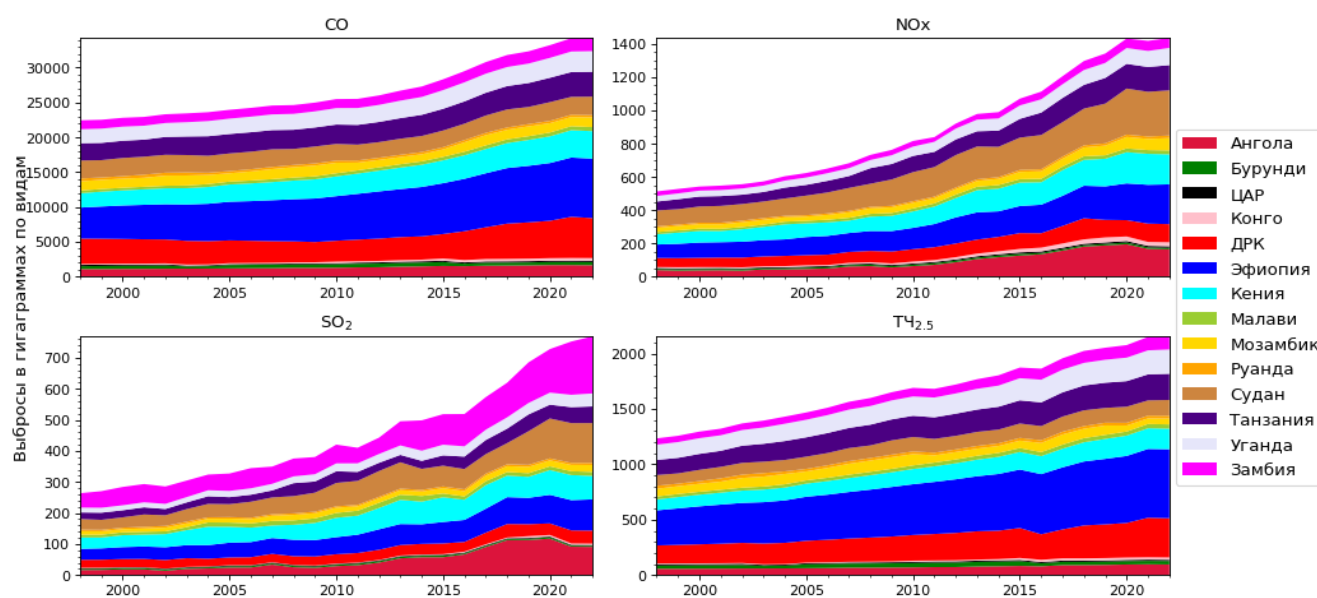


Рисунок 2 – Динамика выбросов по странам с 1998 по 2022 год по данным EDGAR

Профиль страны показал, что выбросы SO<sub>2</sub> увеличились вдвое в Анголе, Замбии, Южном Судане и Республике Конго (Рисунок 3). Удвоение выбросов произошло также для NO<sub>x</sub>, поступающих из Анголы, Республики Конго и Уганды. В то время как выбросы TCH<sub>2,5</sub> удвоились в Республике Конго. Такие страны, как Бурунди, Центральноафриканская

Республика (ЦАР) и Руанда, продемонстрировали снижение выбросов  $\text{SO}_2$  в Бурунди,  $\text{ТЧ}_{2,5}$  в Центральноафриканской Республике (ЦАР), Мозамбике и Руанде и  $\text{CO}$  в Мозамбике и Руанде.

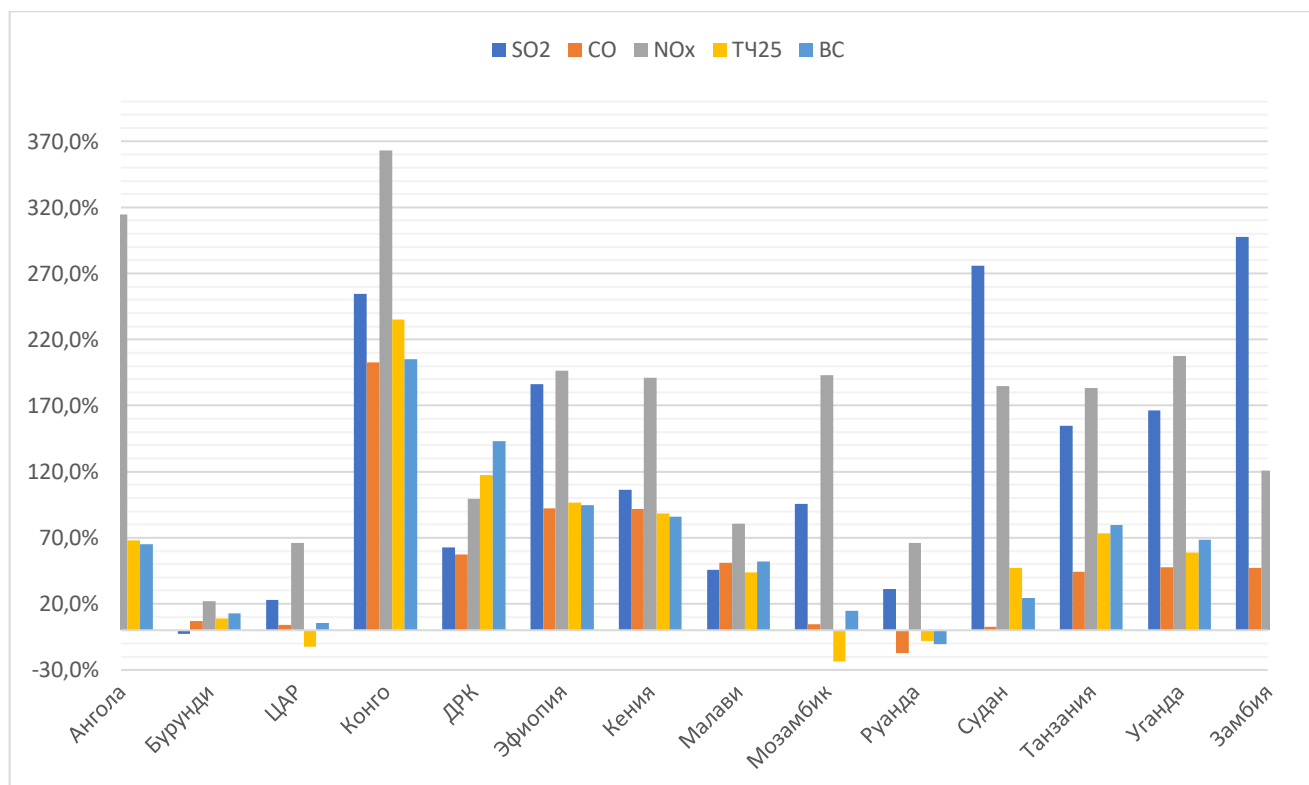


Рисунок 3 – Изменение антропогенных выбросов по странам за 25 лет (1998–2022)

Среди источников выбросов  $\text{CO}$  преобладают бытовые источники (в среднем за 25 лет 62,0%), за ними следуют летучие выбросы от твёрдого топлива (23,6%). Выбросы  $\text{NO}_x$  в основном связаны с автомобильным транспортом (25,9%), жилым сектором (20,3%), промышленным производством и строительством (13,9%). Основными источниками  $\text{SO}_2$  являются жилой сектор, тепло- и электроэнергетика, обрабатывающая промышленность и производство металлов – 31,7%, 25,9%, 22,9% и 13,1%, соответственно. В выбросах твёрдых частиц ( $\text{ТЧ}_{2,5}$ ) преобладает жилой сектор (в среднем за 26 лет 78,3%), затем следуют летучие выбросы от твёрдого топлива (7,1%).

### 3.2 Уровень загрязнения воздуха в регионе Восточной Африки

После оценки и анализа выбросов в регионе Центральной Восточной Африки, мы оценили уровень и изменение загрязнения воздуха в странах Восточной Африки, сосредоточив внимание на  $\text{ТЧ}_{2,5}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{SO}_2$ , агрегируя данные за последние десять лет (2013–2022) (Таблица 2). Среднегодовое значение  $\text{ТЧ}_{2,5}$  превышало директивы ВОЗ по среднегодовому уровню на всех территориях. Жители Уганды и Кении особенно подвержены воздействию высокого уровня  $\text{ТЧ}_{2,5}$  по сравнению с другими странами.  $\text{CO}$  и

SO<sub>2</sub> высоки в Руанде и Бурунди, в то время как самые низкие концентрации этих загрязнителей (CO и SO<sub>2</sub>) наблюдаются в Танзании и Кении.

Таблица 2 – Средние (и стандартное отклонение в *скобках*) по стране концентрации загрязняющих веществ в воздухе на период 2013–2022 гг.

| Загрязнители                                               | Бурунди            | Кения             | Руанда            | Танзания           | Уганда             | Средний            |
|------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| ТЧ <sub>2,5</sub> (мкг/м <sup>3</sup> )                    | 71,83<br>(34,08)   | 77,81<br>(33,64)  | 70,63<br>(33,13)  | 66,04<br>(26,05)   | 88,57<br>(45,75)   | 72,92<br>(31,30)   |
| CO (мкг/м <sup>3</sup> )                                   | 146,79<br>(44,29)  | 88,07<br>(9,40)   | 150,80<br>(48,46) | 105,07<br>(22,90)  | 128,27<br>(37,69)  | 104,02<br>(21,25)  |
| NO <sub>2</sub> (×10 <sup>15</sup><br>мкг/м <sup>2</sup> ) | 487,91<br>(215,70) | 362,54<br>(44,35) | 408,09<br>(98,22) | 505,37<br>(253,31) | 490,80<br>(166,72) | 456,30<br>(172,52) |
| SO <sub>2</sub> (мкг/м <sup>3</sup> )                      | 0,748<br>(0,201)   | 0,232<br>(0,023)  | 0,953<br>(0,278)  | 0,139<br>(0,068)   | 0,414<br>(0,146)   | 0,226<br>(0,069)   |

Используя данные проекта AirQo (AirQo, 2022), мы оценили и среднюю дневную и еженедельную концентрацию ТЧ<sub>2,5</sub>, в четырёх из пяти столиц региона (Таблица 3). Самый высокий (почасовая выборка) уровень составил 203,60 мкг/м<sup>3</sup>, наблюдавшийся в городе Кампала, 156,20 мкг/м<sup>3</sup> в Кигали, 118,20 мкг/м<sup>3</sup> в Найроби и 90,41 мкг/м<sup>3</sup> в городе Бужумбура. Дневные концентрации ТЧ<sub>2,5</sub> варьировались от 26,61 до 31,38 мкг/м<sup>3</sup>; 14,35–22,23 мкг/м<sup>3</sup>; 41,35–50,82 мкг/м<sup>3</sup> и от 46,91 до 52,96 мкг/м<sup>3</sup> в городах Бужумбура, Найроби, Кигали и Кампала, соответственно. Самая высокая среднесуточная концентрация наблюдалась в Кигали (45,89 ± 25,14 мкг/м<sup>3</sup>), а самая низкая — в Найроби (15,57 ± 10,02 мкг/м<sup>3</sup>).

Таблица 3 – Средние значения (ТЧ<sub>2,5</sub> в мкг/м<sup>3</sup>) в городах Восточной Африки

| Город     | Доступность данных    | Среднечасовое значение ТЧ <sub>2,5</sub> (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 <sup>3</sup> в среднем за год, 15 мкг/м <sup>3</sup> среднее значение за 24 часа (World Health Organization, 2021). |
| 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 (203,60)                                      |                                                                                                                             |

## **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 здоровью, связанного с загрязнением воздуха, для пяти стран Восточной Африки с использованием данных из доклада GBD-2024 (Institute for Health Metrics and Evaluation (ИМЭ), 2024). Мы сосредоточились на отдельных данных оценок заболеваемости и смертности, связанных с ишемической болезнью сердца (ИБС), инсультом, хронической обструктивной болезнью лёгких (ХОБЛ), раком трахеи, бронхов и лёгких (РТБЛ), инфекциями нижних дыхательных путей (ИНДП) и сахарным диабетом второго типа (СД2). 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 инфекции нижних дыхательных путей и инсульт, которые в среднем соответственно составляли 43,43% и 26,55% в год за этот период в 30 лет.

Суммарное количество лет, потерянных с поправкой на инвалидность (DALYs) по пяти странам, составило 3 297 961 года, что на 26,47% 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 инфекции нижних дыхательных путей (Рисунок 4 и 5). Основной причиной DALYs в этот период была инфекция нижних дыхательных путей (65,88%), а наименьшей - 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.

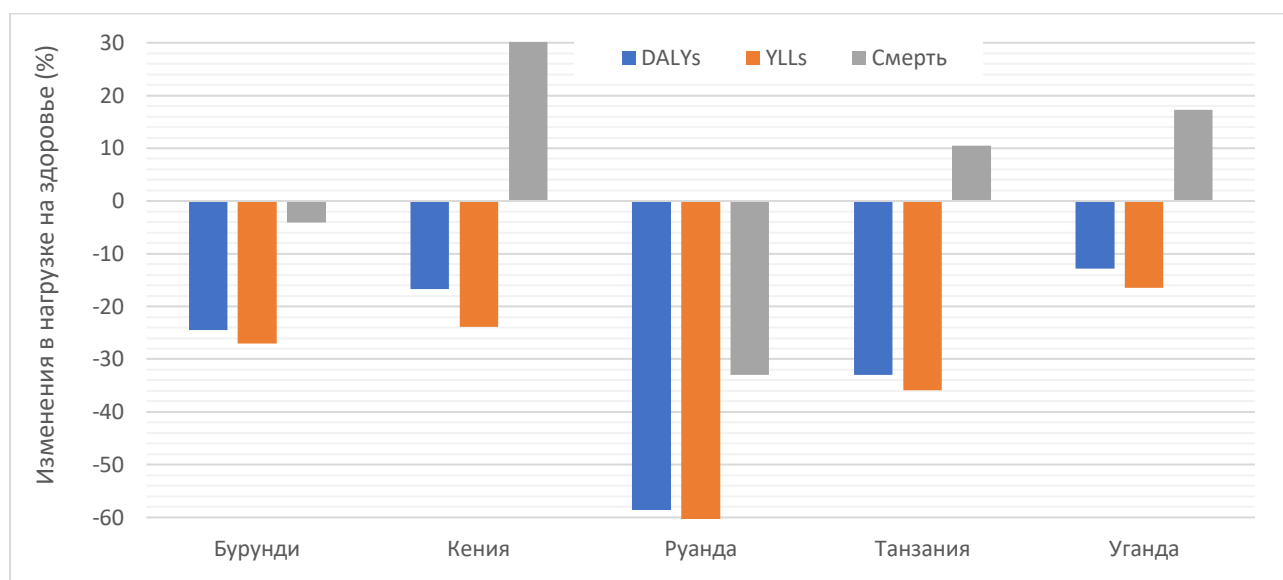


Рисунок 4 – Процентное изменение количества смертей, DALYs и YLLs, связанных с загрязнением воздуха, в 2021 году по сравнению с 1992 годом

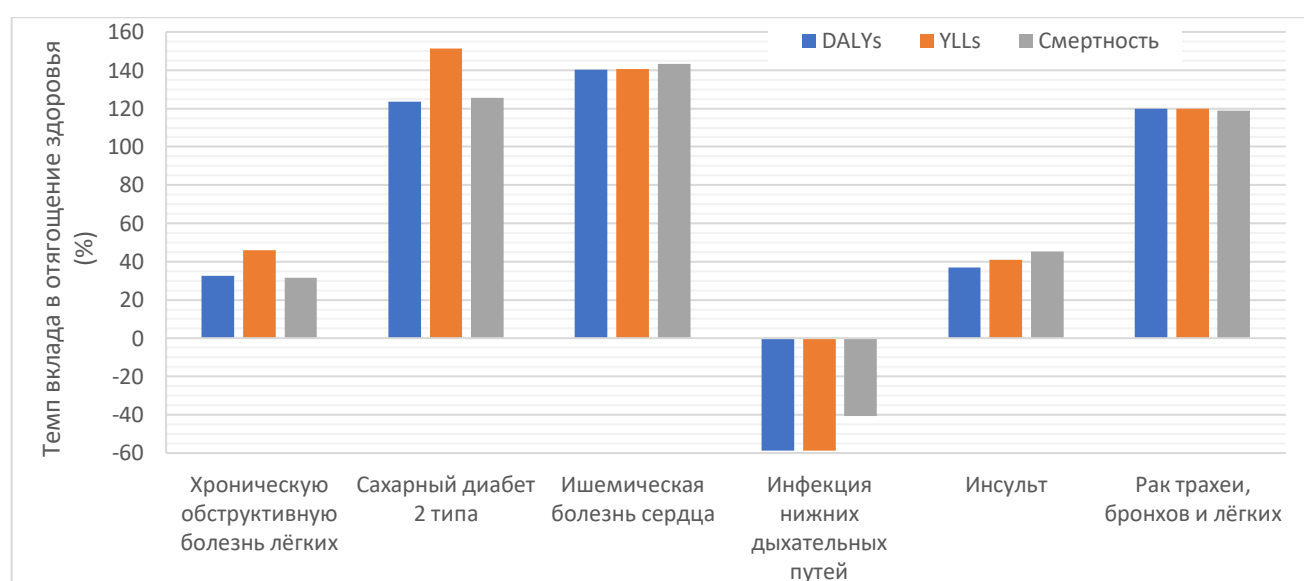


Рисунок 5 – Процентное изменение числа смертей от причин, связанных с загрязнением воздуха, в 2021 году по сравнению с 1992 годом.

Чтобы количественно исследовать влияние загрязнения воздуха на YLLs и оценить загрязняющие вещества в большинстве районов 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 (НАР). Результаты моделирования представлены в таблице 4. 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 (НАР) 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 4 – Результаты анализа модели множественной линейной регрессии (MLR)

| 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         | $\log(YLLs) = 6,10 + 180,01\log(HAP)$                     | 0,75  | 49,2 (0,000)              |
| Танзания       | $\log(YLLs) = 6,78 + 14,35\log(HAP)$                      | 0,53  | 8,20 (0,011)              |

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

Помимо профиля страны, приведены оценки региональных случаев возникновения YLLs с помощью модели множественной линейной регрессии. Показано, что загрязнение воздуха внутри помещений от твёрдого топлива (HAP) и  $TC_{2,5}$  в значительной степени влияют на региональные случаи YLLs ( $R^2 = 0,84$ ;  $p < 0,05$ ) за исследуемый период, при этом увеличение на 10% регионального уровня HAP и  $TC_{2,5}$  приведёт к увеличению YLLs на 151,0% и 4,2% соответственно (уравнение 1).

$$\log(YLLs) = 11,79 + 15,10 \times \log(HAP) + 0,42 \times \log(TC_{2,5}) \quad (1)$$

#### 4.2 Взаимосвязь между загрязнением воздуха, озелененностью и распространённостью инсульта в Восточной Африке

В работе приведены оценки изменения экологических переменных (Улучшенный вегетационный индекс, EVI (Enhanced Vegetation Index) и загрязнителей воздуха) с интервалом в пять лет в период с 2003 по 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. Кроме того, мы использовали модель мультилинейной регрессии для оценки вероятности смертности от инсульта в зависимости от EVI и загрязнителей воздуха, представляющих интерес. В таблице 5 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  $O_3$ , 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  $\text{ТЧ}_{2,5}$  и  $\text{SO}_2$  в регионе. В то же время EVI отрицательно коррелирует с  $\text{O}_3$  и  $\text{SO}_2$ , и положительно – с остальными концентрациями загрязнителей воздуха в регионе.

Таблица 5 – Корреляционная матрица для переменных, использованных в данном исследовании

|                   | Инсульт   | EVI     | $\text{ТЧ}_{2,5}$ | $\text{SO}_2$ | $\text{O}_3$ | CO     | Температура | Осадки |
|-------------------|-----------|---------|-------------------|---------------|--------------|--------|-------------|--------|
| Инсульт           | 1         |         |                   |               |              |        |             |        |
| EVI               | -0,351*   | 1       |                   |               |              |        |             |        |
| $\text{ТЧ}_{2,5}$ | 0,468**   | 0,090   | 1                 |               |              |        |             |        |
| $\text{SO}_2$     | 0,345*    | -0,055  | -0,244            | 1             |              |        |             |        |
| $\text{O}_3$      | -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%.

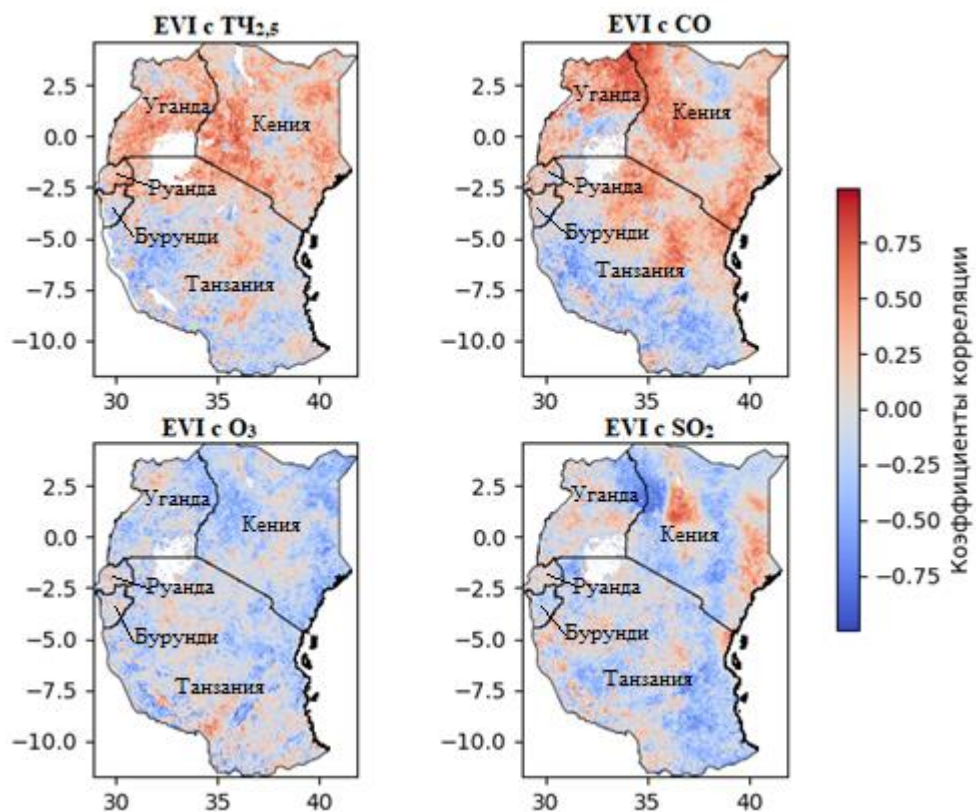


Рисунок 6 – Пространственная корреляция между EVI и загрязнителями воздуха

Пространственные корреляции между EVI и загрязнителями воздуха, представляющими интерес в данном исследовании, показаны на рисунке 6. На большей части территории Восточной Африки концентрации  $\text{ТЧ}_{2,5}$  и  $\text{СО}$  положительно коррелируют с EVI. Наибольшая положительная корреляция между  $\text{ТЧ}_{2,5}$  и EVI наблюдается на юго-востоке Уганды, юго-западе Кении и в восточной части Руанды.  $\text{СО}$  в основном положительно коррелирует в северной части Танзании и почти на всей территории Кении, Уганды и Руанды.  $\text{О}_3$  и EVI отрицательно коррелируют почти на всех точках территории.  $\text{SO}_2$  и EVI не демонстрируют пространственной корреляции на большей части территории.

Оценка влияния загрязнения воздуха и озеленённости территории на уровень смертности от инсульта далее была проведена с помощью линейных регрессионных моделей. Согласно результатам моделирования (таблица 6), 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  $\text{SO}_2$  прогнозируют увеличение смертности от инсульта. Увеличение концентрации  $\text{SO}_2$  на  $1 \text{ мкг/м}^3$  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  $1 \text{ мкг/м}^3$  приведёт к  $3,06 \pm 1,25$  смертей на 100 000 человек. Более того,  $\text{О}_3$  действует в пользу снижения смертности, в то время как  $\text{СО}$  не оказывает значительного влияния на распространённость смертности от инсульта в регионе.

Таблица 6 – 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        |
| $\text{SO}_2$     | 139,28  | 64,33      | 2,17    | 0,05    | 1,31     | 277,26      |
| $\text{O}_3$      | -4,53   | 2,64       | -1,71   | 0,11    | -10,20   | 1,14        |
| $\text{СО}$       | 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%.

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 7 приведены результаты коэффициентов линейной регрессии для каждой возрастной группы и переменной.

Таблица 7 – Коэффициенты линейной регрессии для оценки влияния загрязнения воздуха и озеленённости территории на частоту смертности от инсульта в разных возрастных группах

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

Результаты показывают, что смертность от инсульта отрицательно связана с EVI во всех возрастных группах, с концентрацией CO для возрастной группы от 40 до 59 лет, концентрацией O<sub>3</sub> для возрастной группы от 70 и старше; и положительно связана с другими загрязнителями воздуха. Эта связь статистически значима для ТЧ<sub>2,5</sub> и SO<sub>2</sub> для всех возрастных групп и значима для EVI у пожилых и старых людей (60 лет и старше). Из результатов моделирования видно, что влияние EVI на количество случаев смерти от инсульта увеличивается с возрастом. Анализ результатов 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, и с повышением возраста влияние EVI на снижение смертности еще более заметно (уменьшается на  $2\,333,86 \pm 705,98$  смертей на 100 000 человек в возрасте старше 80 лет). Обратная тенденция проявляется в отношении таких загрязнителей воздуха, как ТЧ<sub>2,5</sub> и SO<sub>2</sub>: при повышении их концентрации смертность от инсульта увеличивается, и количество смертей на 100 000 растет с увеличением возраста. Кроме того, O<sub>3</sub>, 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, р-значение < 0,05). Для CO наблюдается другая закономерность: повышении его концентрации не влияет на смертность от инсульта в молодом возрасте (от 20 до 39 лет), уменьшается в среднем возрасте (от 40 до 59 лет, и увеличивается в старшем возрасте (от 60 до 80 лет и выше),

хотя статистической значимости для оценок влияния СО на смертность во всех возрастных группах нет.

### 4.3 Сокращение продолжительности жизни из-за загрязнения воздуха

#### 4.3.1 Оценка ожидаемой продолжительности жизни при рождении с учётом причин смертности

Мы оценили сокращение ожидаемой продолжительности жизни среди населения Восточной Африки в результате воздействия экологических стрессоров, чтобы выявить роль плохого качества воздуха в регистрируемой продолжительности жизни. Ожидаемая продолжительность жизни при рождении без устранения причины, по оценкам на 2021 год, составила 66,38 лет в Руанде, 65,46 лет в Кении, 64,70 лет в Танзании, 63,36 лет в Бурунди и 62,23 лет в Уганде. В Таблице 8 представлены ожидаемая продолжительность жизни и количество лет, набранных всем населением после полного исключения случаев смертей, связанных с индивидуальными экологическими и поведенческими факторами.

Таблица 8 – Увеличение продолжительности жизни благодаря устранению экологических и поведенческих факторов риска (лет)

| Факторы риска                | Бурунди |      | Кения |      | Руанда |      | Танзания |      | Уганда |      |
|------------------------------|---------|------|-------|------|--------|------|----------|------|--------|------|
|                              | ПЖ      | ΔПЖ  | ПЖ    | ΔПЖ  | ПЖ     | ΔПЖ  | ПЖ       | ΔПЖ  | ПЖ     | ΔПЖ  |
| 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 ΔПЖ представляет собой изменение ожидаемой продолжительности жизни.

Потенциальное увеличение продолжительности жизни во всех странах возможно благодаря полному устранению смертности от загрязнения воздуха (окружающие твёрдые

частицы, окружающий озон и бытовое загрязнение воздуха); затем следуют плохая гигиена (небезопасные источники воды, небезопасные санитарные условия и отсутствие доступа к средствам для мытья рук).

Далее мы предположили сценарий, при котором каждый из рассматриваемых факторов риска будет устранён на 25% и 50%. В таблице 9 представлены данные о приросте ожидаемой продолжительности жизни при рождении после 25% и 50% устранения рассматриваемых причин смерти, соответственно.

Таблица 9 – 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 |

Результаты показали, что после 25% устранения смертей, связанных с загрязнением воздуха, прирост может составить 0,47 года (т. е. 172 дня) в Бурунди, 0,44 года (161 день) в Руанде, 0,43 (157 дней) год в Танзании, 0,36 года (131 день) в Уганде и 0,32 года (117 дней) в Кении. Наконец, мы предположили экстремальный сценарий, при котором все факторы риска будут постепенно и одновременно устранены. 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 показатели 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. Эти результаты отражают, что чем выше прирост, тем больше стресс, вызванный экологическим или поведенческим риском.

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

Для анализа взаимозависимых связей между переменными в определении ожидаемой продолжительности жизни мы использовали методологию анализа пути и разложили общую картину взаимосвязей на прямые эффекты, косвенные эффекты и непрямые связи. В двумерном анализе для анализа линейной связи между

переменными используется коэффициент корреляции Пирсона. При анализе путей корреляция Пирсона между предиктивными переменными и предсказываемыми представляет собой общую связь эффекта, а при вариационном анализе – между экзогенными переменными. Анализ коэффициента пути измеряет все величины и связи между переменными. В таблице 10 приведена корреляционная матрица между оцениваемыми переменными.

Таблица 10 – Корреляционная матрица (Полная ассоциация анализа пути)

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

Примечание – Статистическая значимость: \*\*p < 0,01, \*p < 0,05

Основной задачей данного анализа было построение модели путей, наглядно представляющих причины и взаимосвязи между загрязнением воздуха, поведенческими стрессорами, социально-экономическими и медицинскими факторами, определяющими продолжительность жизни в Восточно-Африканском регионе. Предполагается, что каждая переменная в рекурсивной модели пути зависит от каждой предыдущей переменной причины. В общем виде модель представлена следующим уравнением 2 (Alwin, Hauser, 1975).

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

где,  $R_{i,j}$  ( $i = 6; 7$ ; и  $j = 1; 2; 3; 4; 5$ ) – это коэффициенты пути, и  $Q_k$  – члены возмущения.

В таблице 11 представлены интерпретации влияния этих компонентов на ожидаемую продолжительность жизни. Результаты моделирования показывают, что все прямые эффекты статистически значимы, за исключением влияния потребления алкоголя

на валовой национальный доход. Взаимные связи значимы только между валовым национальным доходом ( $X_1$ ) и расходами на здравоохранение, взвешенным по населению показателем  $ТЧ_{2,5}$  ( $X_3$ ) и потреблением алкоголя ( $X_5$ ). Результаты моделирования (коэффициенты пути) представлены в уравнении 3.

$$\left\{ \begin{array}{l} X_6 = -0,141X_1 + 0,427X_2 - 0,981X_3 + 0,277X_4 + 0,167X_5 \\ R_{6.12345}^2 = 0,899 \\ X_7 = 0,172X_1 + 0,291X_2 - 0,498X_3 + 0,966X_4 + 0,666X_5 + 0,259X_6 \\ R_{7.123456}^2 = 0,969 \end{array} \right. \quad (3)$$

В таблице 11 представлено влияние экзогенной переменной на остаточную переменную через эндогенную переменную. Прямая связь с ожидаемой продолжительностью жизни статистически значима для всех переменных, а общая связь не является статистически значимой для расходов на здравоохранение ( $X_1$ ) и потребления алкоголя ( $X_5$ ).

Статистически увеличение взвешенного по численности населения  $ТЧ_{2,5}$  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  $ТЧ_{2,5}$ , что приведёт к общему уменьшению продолжительности жизни при рождении на 0,752 года на каждый 1  $мкг/м^3$  увеличения взвешенного по населению  $ТЧ_{2,5}$ .

Таблица 11 – 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 – Статистическая значимость: \*\* $p < 0,01$ , \* $p < 0,05$ ;  $R_{LEB}^2 = 0,825$ ;  $R_{GNI}^2 = 0,683$

#### 4.4 Воздействие загрязнения воздуха и уровень смертности взрослого населения (СВН) в странах Восточной Африки

На основе статистики смертности, опубликованной Всемирной организацией здравоохранения за пятнадцать лет (2008–2022 гг.) и показателей мирового развития полученных их данных Всемирного банка (World Bank, 2024), влияние загрязнения воздуха на смертность взрослого населения было проанализировано с использованием Обобщенного Метода Моментов (ОММ). В качестве основных объясняющих переменных использовались тонкодисперсные твёрдые частицы ( $ТЧ_{2,5}$ ), как показатель плохого качества воздуха, валовой внутренний продукт на душу населения (ВВП), как общий показатель общего экономического развития населения, доступ к базовым санитарным услугам (БДС – базовый доступ к санитарии) как показатель угроз, связанных с гигиеной, и среднее количество лет обучения в школе (КЛО) как показатель уровня грамотности. Корреляционный анализ представлен в таблице 12.

Таблица 12 – Корреляционный анализ переменных, рассматриваемых в данном 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 на уровне 5%,

Для построения ОММ–модели было сделано допущение, что линейная зависимость между уровнем смертности взрослого населения и загрязнением воздуха можно представить уравнением 4.

$$\log СВН_{it} = \alpha_i + \beta_1 \log(СВН)_{it-1} + \beta_2 \log(ПКВ)_{it} + \epsilon_{it} \quad (4)$$

где  $СВН_{it}$  – представляют уровень смертности взрослого населения в стране  $i$ ,  $ПКВ_{it}$  – взвешенное по численности населения загрязнение мелкими твёрдыми частицами ( $ТЧ_{2,5}$ ) в стране  $i$  в течение периода  $t$ ,  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  являются точкой пересечения модели ОММ и коэффициентом объясняющей переменной, соответственно и  $\epsilon_{it}$  обозначают члены ошибки.



Чтобы избежать идеальной мультиколлинеарности между переменными, в модель был добавлен член  $(CBH)_{it-1}$  представляющий запаздывающие значения зависимой переменной, был добавлен в качестве независимой переменной.

Чтобы учесть все влияющие переменные, мы модифицировали уравнение (4) до более конкретного соотношения, представленной в уравнении (5).

$$\log(CBH)_{it} = \alpha_i + \log(CBH)_{it-1} + \beta_1 \log(ПКВ)_{it} + \beta_2 \log(ВВП)_{it} + \beta_3 \log(ВДС) + \beta_4 \log(КЛО)_{it} + \beta_5 \log(ИКУ)_{it} + \epsilon_{it} \quad (5)$$

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

Результаты регрессионных оценок ОММ (уравнение 5) представлены в таблице 13. Анализ показывает, что увеличение концентрации ТЧ<sub>2,5</sub> на 10 % приводит к росту смертности среди взрослого населения на 0,37 %, 0,57 % и 0,28 % среди женщин, мужчин и всего населения, соответственно. Все остальные переменные показали отрицательную связь с уровнем смертности среди взрослого населения, причём больший вклад внесли доступ к базовым санитарным услугам и средний уровень школьного образования. Таблица 13 – Оценки параметров для динамического ОММ-анализа влияния загрязнения воздуха на уровень смертности взрослого населения

| Переменные                                                  | Модель 1<br>(женщины) | Модель 2<br>(мужчины) | Модель 3<br>(всего) |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Запаздывающая смертность взрослых $(CBH_{i-1})$             | 0,928***<br>(0,199)   | 0,716*<br>(0,657)     | 0,928***<br>(0,199) |
| Взвешенные по численности населения ТЧ <sub>2,5</sub> (ПКВ) | 0,028**<br>(0,012)    | 0,051**<br>(0,015)    | 0,028**<br>(0,012)  |
| Валовой внутренний продукт (ВВП)                            | -0,016<br>(0,031)     | -0,040<br>(0,143)     | -0,016<br>(0,031)   |
| Базовый доступ к санитарии (БДС)                            | -0,132** (0,093)      | -0,035 (0,135)        | -0,132** (0,093)    |
| Среднее количество лет обучения (КЛО)                       | -0,108<br>(0,122)     | -0,171<br>(0,260)     | -0,108<br>(0,122)   |
| Индекс качества управления (ИКУ)                            | -0,0056** (0,003)     | -0,003 (0,014)        | -0,0056** (0,003)   |
| Постоянный коэффициент                                      | 0,975 (0,651)         | 1,115 (2,452)         | 0,975 (0,651)       |
| Количество наблюдений                                       | 56                    | 80                    | 56                  |
| Количество инструментов                                     | 41                    | 38                    | 41                  |
| Тест Хансена J: p-значение                                  | 0,082                 | 0,545                 | 0,082               |
| AR (2): p-значение                                          | 0,914                 | 0,367                 | 0,914               |

\*\*\*значимость на уровне 1%, \*\*значимость на уровне 5%, \*значимость на уровне 10%.

## 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 50,46%, 45,12% и 23,71% от общего объёма выбросов CO, NO и SO<sub>2</sub>, 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 ТЧ<sub>2,5</sub> и SO<sub>2</sub>. 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<sub>2</sub> на 1 г/м<sup>3</sup> приводит к увеличению числа смертей на  $139,28 \pm 64,33$  на 100 000 человек, а повышение концентрации ТЧ<sub>2,5</sub> на 1 г/м<sup>3</sup> на  $3,06 \pm 1,25$  смертей на 100 000 человек;

4) Построены таблицы жизни, исключаяющие 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и/или Web of Science

1. **Baharane V.**, Shatalov A. B. Impacts of ambient air pollution exposure on child growth in East African countries // Air Quality, Atmosphere and Health. – 2024. – № 9 (17). – С. 1969–1981.
2. **Baharane V.**, Shatalov A.B. Assessment of the health impacts of air pollution exposure in East African countries // Environmental Monitoring and Assessment. – 2024. – № 5 (196). – С. 1–13.
3. **Baharane V.**, Shatalov A.B. Ambient air pollution level in the East African region based on satellite remote sensing of NO<sub>2</sub>, CO, and Aerosol optical depth // Web of Conferences (E3S). – 2023. – № 02003 (407).
4. **Baharane V.**, Shatalov A.B. Environmental risks and life expectancy reduction in East Africa // E3S Web of Conferences. 2024. – (555). – С. 02001.

### Другие публикации

5. **Baharane V.**, Shatalov A.B. et al. Characterization of carbon monoxide (CO), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), and nitrogen oxides (NO+NO<sub>2</sub>) emissions in equatorial east African countries // Оригинальные исследования (ОРИС). – 2023. – № 4 (13). – С. 274–284.
6. Aniagboso K.A.O. **Baharane V.** et al. Identification of Sources of Some Priority Heavy Metallic Pollutants Causing Environmental Degradation and Health Implications // Journal of Industrial Pollution Control. – 2023. – № 2 (39). – С. 1.
7. **Baharane V.**, Shatalov A.B. Estimate the socioeconomic vulnerability index to air pollution exposure and its relationship to PM<sub>2.5</sub> level in Rwanda // XXIV Annual international

scientific - practical conference: “Actual Problems of Ecology and Environmental Management” (APEEM-2023). – 2023. – № 419 с. (2). – С. 195–201.

8. **Baharane V.**, Igwe E. Analysing SO<sub>2</sub> concentrations in east African cities using OMI-SO<sub>2</sub> atmospheric amount retrieval and MERRA-2 Reanalysis // International Youth Forum “Russia–Africa: Nuclear Education-Potential for Successful Regional Development. – 2023. – С. 201–208.
9. Igwe E., **Baharane V.** et al. Identification of Some Priority Heavy Metals Driver of Environmental Degradation Caused by Agricultural Activity; A Case Study in Ebonyi State Nigeria // Journal of Robotics and Automation Research. – 2023. – № 3 (4).

### Список сокращений и условных обозначений

ACAG – Atmospheric Composition Analysis Group

AEIC – Aircraft Emissions Inventory Code

CDO – Climate Data Operators

CEDS – Community Emissions Data System

DAAC – Distribution Active Archive Center

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

DHS – Demographic and Health Surveys

EDGAR – Emissions Database for Global Atmospheric Research

EVI – Enhanced Vegetation Index

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

HAP – Household Air Pollution from solid fuel

HEMCO – Harmonized Emissions Component

IHME – Institute for Health Metrics and Evaluation

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

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA–National Aeronautics and Space Administration

OMI – Ozone Monitoring Instrument

ppb – частей на миллион

ppm – частей на миллиард

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

ВВП – Валовой Внутренний Продукт

ВНД – Валовой Национальный Доход

ВОЗ – Всемирная Организация Здравоохранения

ГББ – Глобальное бремя болезней

ГВБ – Группа Всемирного Банка

ДИ – Доверительный Интервал

ИБС – Ишемическая болезнь сердца

ИНДП – Инфекция Нижних Дыхательных Путей

МДИ – Медико-Демографические Исследования

МЛР – Множественная линейная регрессия

ОММ – Обобщенный метод моментов

РТБЛ – Рак трахеи, бронхов и лёгких

СД2 – Сахарный диабет 2 типа

ТЧ – Твёрдые Частицы

ХОБЛ – Хроническая обструктивная болезнь лёгких