



Куролап С.А.¹, Клепиков О.В.^{1,2}, Кульнев В.В.³, Кизеев А.Н.⁴, Сюрин С.А.⁴,
Енин А.В.⁵

Канцерогенный риск, связанный с загрязнением атмосферного воздуха промышленных городов Центрального Черноземья

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 394018, Воронеж, Россия;

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 394036, Воронеж, Россия;

³Центрально-Чернозёмное межрегиональное управление Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, 394087, Воронеж, Россия;

⁴ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 191036, Санкт-Петербург, Россия

⁵ФГБОУ ВО «Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко» Министерства здравоохранения Российской Федерации, 394036, Воронеж, Россия

Введение. Для промышленных городов характерен значительный объём выбросов канцерогенных веществ в атмосферный воздух, поэтому при разработке профилактических мероприятий необходимы исследования с количественной оценкой канцерогенного риска для здоровья населения.

Цель работы — количественная оценка канцерогенного риска, связанного с загрязнением атмосферного воздуха городов Центрально-Чернозёмного региона — Воронежа, Липецка и Белгорода.

Материалы и методы. В качестве исходных данных использованы сведения о результатах мониторинговых лабораторных исследований атмосферного воздуха. Канцерогенный риск оценивался по Р.2.1.10.1920—04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду».

Результаты. С учётом имеющихся объективных данных лабораторного контроля канцерогенов в атмосферном воздухе городов Центрально-Чернозёмного региона России определены загрязняющие вещества, воздействие которых при максимальной экспозиции обуславливает уровень индивидуального канцерогенного риска для здоровья населения выше предельно допустимого ($1 \cdot 10^{-4}$): в Воронеже — 1,3-бутадиен (источник выбросов — производство синтетического каучука) и соединения хрома⁶⁺ (основной источник выбросов — авиационный завод); в Липецке — формальдегид, в отдельных контрольных точках — бензол (основные источники — выбросы металлургического производства и автомобильного транспорта). Следует обратить внимание на необходимость совершенствования мониторинга содержания канцерогенов в атмосферном воздухе Белгорода, так как при наличии многих источников загрязнения контролируются концентрации лишь двух канцерогенов.

Ограничения исследования. Ограничения исследования связаны с тем, что расчёту индивидуальных канцерогенных рисков всегда присущи неопределённости, связанные с оценкой экспозиции и использованием стандартных формул расчёта доз поступления в организм. В настоящем исследовании оценка индивидуальных канцерогенных рисков проведена по максимальным уровням экспозиции и характеризует максимально неблагоприятный сценарий ингаляционного воздействия на население.

Заключение. Для снижения канцерогенного риска, связанного с загрязнением воздушной среды, должен осуществляться комплекс мероприятий для сокращения поступления в атмосферный воздух канцерогенных загрязняющих веществ и принятия рациональных градостроительных решений.

Ключевые слова: атмосферный воздух; загрязнение; канцерогены; риск для здоровья

Соблюдение этических стандартов. Исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Для цитирования: Куролап С.А., Клепиков О.В., Кульнев В.В., Кизеев А.Н., Сюрин С.А., Енин А.В. Канцерогенный риск, связанный с загрязнением атмосферного воздуха промышленных городов Центрального Черноземья. *Гигиена и санитария*. 2023; 102(8): 853–860. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-853-860> <https://elibrary.ru/eweumj>

Для корреспонденции: Кизеев Алексей Николаевич, канд. биол. наук, ст. науч. сотр. отд. исследований среды обитания и здоровья населения в Арктической зоне Российской Федерации ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья», 191036, Санкт-Петербург. E-mail: a.kizeev@s-znc.ru

Участие авторов: Куролап С.А. — концепция и дизайн исследования, редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи; Клепиков О.В. — организация сбора информации, анализ материалов лабораторных исследований атмосферного воздуха; Кульнев В.В. — общий анализ материала, подготовка выводов, подготовка и редактирование статьи; Кизеев А.Н. — анализ материалов лабораторных исследований атмосферного воздуха, подготовка выводов; Сюрин С.А. — существенный вклад в медицинскую часть концепции исследования; Енин А.В. — расчёт канцерогенных рисков.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 20-17-00172-П «Урбэкодиагностика состояния воздушной среды крупных промышленных городов Центрального Черноземья: воздействие шумового фактора, канцерогенные риски и обеспечение экологической безопасности».

Поступила: 28.04.2023 / Принята к печати: 07.06.2023 / Опубликовано: 09.10.2023

Semen A. Kurolap¹, Oleg V. Klepikov^{1,2}, Vadim V. Kulnev³, Aleksei N. Kizeev⁴, Sergei A. Syurin⁴, Andrei V. Enin⁵

Carcinogenic risk associated with atmospheric air pollution in industrial cities of the Central Chernozem region

¹Voronezh State University, Voronezh, 394018, Russian Federation;

²Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, 394036, Russian Federation;

³Central Chernozem Interregional Department of the Federal Service for Supervision of Natural Resources, Voronezh, 394087, Russian Federation;

⁴North-West Public Health Research Center, Saint-Petersburg, 191036, Russian Federation;

⁵Voronezh State Medical University, Voronezh, 394036, Russian Federation

Introduction. Industrial cities are characterized by a significant amount of emissions of carcinogenic substances into the atmospheric air. In this regard, for the development of preventive measures, there is needed research to quantify the carcinogenic risk to health.

The aim of the work was to quantify the carcinogenic risk associated with aerotechnogenic pollution of the cities of the Central Chernozem region including Voronezh, Lipetsk, and Belgorod.

Materials and methods. Data on the results of monitoring laboratory studies in 2017–2022 were used as initial data. The carcinogenic risk was assessed according to G. 2.1.10.1920–04 “Guidelines for assessing the risk to public health when exposed to chemicals that pollute the environment”.

Results. Taking into account the available objective data of laboratory control of carcinogens in the atmospheric air of the cities of the Central Chernozem region of Russia, pollutants have been identified whose exposure under standard exposure scenarios causes the level of individual carcinogenic risk to public health above the maximum permissible ($1 \cdot 10^{-4}$): in Voronezh – 1,3-butadiene (the source of emissions is the production of synthetic rubber) and chromium⁶⁺ compounds (the main source of emissions is an aviation plant); in Lipetsk – formaldehyde, at some control points – benzene (the main sources are emissions from metallurgical production and motor transport). Attention should be paid to the need to improve monitoring of the content of carcinogens in the atmospheric air of Belgorod, because in the presence of many sources of pollution, the concentrations of only two carcinogens are controlled.

Limitations. The limitations of the study are due to the fact that the calculation of individual carcinogenic risks is always inherent in the uncertainties associated with the assessment of exposure and the use of standard formulas for calculating doses of intake into the body.

Conclusion. To reduce the carcinogenic risk associated with air pollution, a set of measures should be implemented to reduce the intake of carcinogenic pollutants into the atmospheric air, and to implement rational urban planning decisions.

Keywords: atmospheric air; pollution; carcinogens; health risk

Compliance with ethical standards. The study does not require the submission of the conclusion of the Biomedical ethics committee or other documents.

For citation: Kurolap S.A., Klepikov O.V., Kulnev V.V., Kizeev A.N., Syurin S.A., Enin A.V. Carcinogenic risk associated with atmospheric air pollution in industrial cities of the Central Chernozem Region. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2023; 102(8): 853–860. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-8-853-860> <https://elibrary.ru/eweumj> (In Russ.)

For correspondence: Aleksei N. Kizeev, MD, PhD, Senior Researcher, Department for Environmental Research and Public Health in the Russian Arctic. North-West Public Health Research Center, Saint-Petersburg, 191036, Russian Federation. E-mail: a.kizeev@s-znc.ru

Information about the authors:

Kurolap S.A., <https://orcid.org/0000-0002-6169-8014>

Klepikov O.V., <https://orcid.org/0000-0001-9228-620X>

Kulnev V.V., <https://orcid.org/0000-0002-1646-9183>

Kizeev A.N., <https://orcid.org/0000-0002-8689-7327>

Syurin S.A., <https://orcid.org/0000-0003-0275-0553>

Enin A.V., <https://orcid.org/0000-0002-1671-8565>

Contribution: Kurolap S.A. – concept and design of the study, editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article; Klepikov O.V. – organization of information collection, analysis of materials of laboratory studies of atmospheric air; Kulnev V.V. – general analysis of the material, preparation of conclusions, preparation and editing articles; Kizeev A.N. – analysis of materials of atmospheric air laboratory studies, preparation of conclusions; Syurin S.A. – substantial contribution to the medical part of the research concept; Enin A.V. – calculation of carcinogenic risks. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. Acknowledgment. The study was carried out within the framework of the RNF project No. 20-17-00172-P «Urban environmental diagnostics of the state of the air environment of large industrial cities of the Central Chernozem region: the impact of noise, carcinogenic risks and environmental safety».

Received: April 28, 2023 / Accepted: June 7, 2023 / Published: October 9, 2023

Введение

Множество источников выбросов на относительно малой площади и интенсивно развивающийся автотранспортный комплекс в крупных промышленных городах обуславливают высокие уровни загрязнения атмосферного воздуха, в том числе и канцерогенами. С утверждением методики количественной оценки риска для здоровья населения в соответствии с Руководством Р.2.1.10.1920–04 в 2004 г. начинается активный период научно-практических работ в данной области.

Обзор результатов исследований, выполненных в нескольких мегаполисах Российской Федерации и за рубежом, достоверно свидетельствует о негативном воздействии загрязнения воздушной среды на заболеваемость населения, а также о том, что рассматриваемая проблема не потеряла своей значимости и актуальности [1].

В зарубежных исследованиях (база данных Pubmed) в последних опубликованных работах особое внимание уделено влиянию загрязнения атмосферного воздуха на онкологическую заболеваемость [21], оценке индивидуального риска для здоровья при долговременном использовании общественного автобусного транспорта в мегаполисе [22], оценке канцерогенного риска от воздействия полициклических ароматических углеводородов [23], взвешенных частиц мелкодисперсной фракции (PM_{2,5}) [25], в том числе содержащей тяжёлые металлы [24].

Приоритет в обзоре по изучаемой проблеме отдан отечественным исследованиям за последние пять лет (2019–2023 гг.). В научных публикациях можно условно выделить два крупных тематических направления: 1) рассмотрение конкретных канцерогенов (как прямое загрязнение воздушной среды, так и опосредованное – через вероятную миграцию химических веществ в атмосферный воздух из почвы);

2) рассмотрение объектов, отраслей промышленности, теплоэнергетики и транспортного комплекса. Во всех работах отмечены особенности конкретных регионов в части загрязнения атмосферного воздуха и связанные с ним риски для здоровья населения.

В частности, в работе В.М. Боева с соавт. (2022) рассматривается канцерогенный риск для здоровья населения, ассоциированный с загрязнением депонирующих сред тяжёлыми металлами [2]. В работе Л.А. Дерябкиной с соавт. (2022) при оценке содержания 3,4-бенз(а)пирена в почве Таганрога Ростовской области делается вывод о приоритете ингаляционного поступления данного вещества в организм из воздушной среды (94,84%) при уровне индивидуального канцерогенного риска до $2,46 \cdot 10^{-3}$ [3]. Исследования Л.И. Белых с соавт. (2020) также посвящены проблеме загрязнения атмосферного воздуха бенз(а)пиреном на примере городов и поселений городского типа Южного Прибайкалья Иркутской области. Наиболее высокие величины рисков отмечены для промышленных городов — Ангарска, Братска, Иркутска, Усолья-Сибирского, Шелехова (на близком к предельно допустимому уровню — $1 \cdot 10^{-4}$) Относительно благоприятна ситуация (10^{-5} – 10^{-7}) в аграрных населённых пунктах (Зима, Черемхово) и населённых пунктах центральной экологической зоны Байкальской пригородной территории (Байкальск, Листвянка, Култук, Слюдянка) [4].

В исследованиях Т.К. Валеева и соавт. (2021), проведённых в городах Салавате, Уфе, Стерлитамаке — центрах нефтепереработки и нефтехимии Республики Башкортостан, выявлены приоритетные компоненты атмосферных загрязнений, формирующие повышенный уровень канцерогенного риска (от $3,5 \cdot 10^{-4}$ до $9 \cdot 10^{-4}$), к которым авторы отнесли формальдегид, тетрахлорометан, соединения хрома⁶⁺, углерод (сажу), бензол. Установлено, что загрязнение атмосферного воздуха вносит ведущий вклад в формирование многосредового канцерогенного риска в Уфе (80%), Стерлитамаке (70%), Салавате (85%) [5].

Вместе с тем в результатах оценки канцерогенного риска имеются и положительные примеры. В частности, в работе Д.В. Суржикова и соавт. (2023) на примере углеобогащательной фабрики Новокузнецка Кемеровской области показано, что при соблюдении требований проекта предельно допустимых выбросов и режима санитарно-защитной зоны превышений предельно допустимого уровня канцерогенного риска не наблюдается [6].

Наряду с промышленными производствами существенный вклад в величину канцерогенного риска могут вносить предприятия теплоэнергетического комплекса. В частности, исследованиями Д.Р. Садекова и соавт. (2021), проведёнными в Новом Свете Донецкой Народной Республики, для территории воздействия Старобешевской ТЭЦ мощностью 2300 МВт (топливо — донбасский уголь) суммарный канцерогенный риск на границе жилой застройки составляет от $1,2 \cdot 10^{-2}$ до $1,38 \cdot 10^{-2}$, а ведущий вклад в его формирование вносят соединения хрома⁶⁺, кадмия, никеля и свинца [7]. Как показано в работе С.Б. Петрова и соавт. (2019), уровень канцерогенного риска зависит от того, какое топливо использует теплоэлектростанция или теплоэлектроцентраль (каменный уголь, торф или природный газ) [8], что подтверждается результатами других отечественных и зарубежных исследований.

Чаще всего в мегаполисах присутствует много источников канцерогеноопасных выбросов без чёткого доминирования вклада в уровень загрязнения какого-либо из них. Так, в исследованиях Н.В. Ефимовой и соавт. (2019), проведённых на территории Улан-Удэ, показано, что наибольший вклад в формирование канцерогенного риска вносят химические вещества, поступающие в атмосферный воздух с выбросами предприятий теплоэнергетики, тяжёлого машиностроения и нефтепереработки. Показатель суммарного индивидуального канцерогенного риска на территории жилой застройки Улан-Удэ находится в пределах от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ с ведущим вкладом в его величину формальдегида, соединений

хрома⁶⁺, никеля, кадмия и эпихлоргидрина [9]. Аналогично множество источников выбросов канцерогенных загрязняющих веществ в атмосферный воздух отмечено в исследованиях И.Л. Мальковой и соавт. (2021), проведённых на территории Ижевска. Авторы установили, что к приоритетному канцерогенному фактору следует отнести воздействие формальдегида, а неприемлемому уровню риска (выше $1 \cdot 10^{-4}$) могут подвергаться более 105 тыс. человек [10].

Рост автотранспортной нагрузки, интенсивная эксплуатация дорожно-транспортного комплекса вносят существенный вклад в формирование уровня канцерогенного риска для здоровья за счёт загрязнения приземного слоя воздуха [11]. Как показал анализ научных публикаций за последние пять лет, количественная оценка обусловленного загрязнением воздушной среды канцерогенного риска проводилась только для Воронежа [12], поэтому изучение данной проблемы применительно к городам Центрального Черноземья является актуальным.

Цель работы — получение количественной оценки канцерогенного риска, связанного с воздействием химических веществ на атмосферный воздух городов Центрально-Чернозёмного региона — Воронежа, Липецка и Белгорода.

Материалы и методы

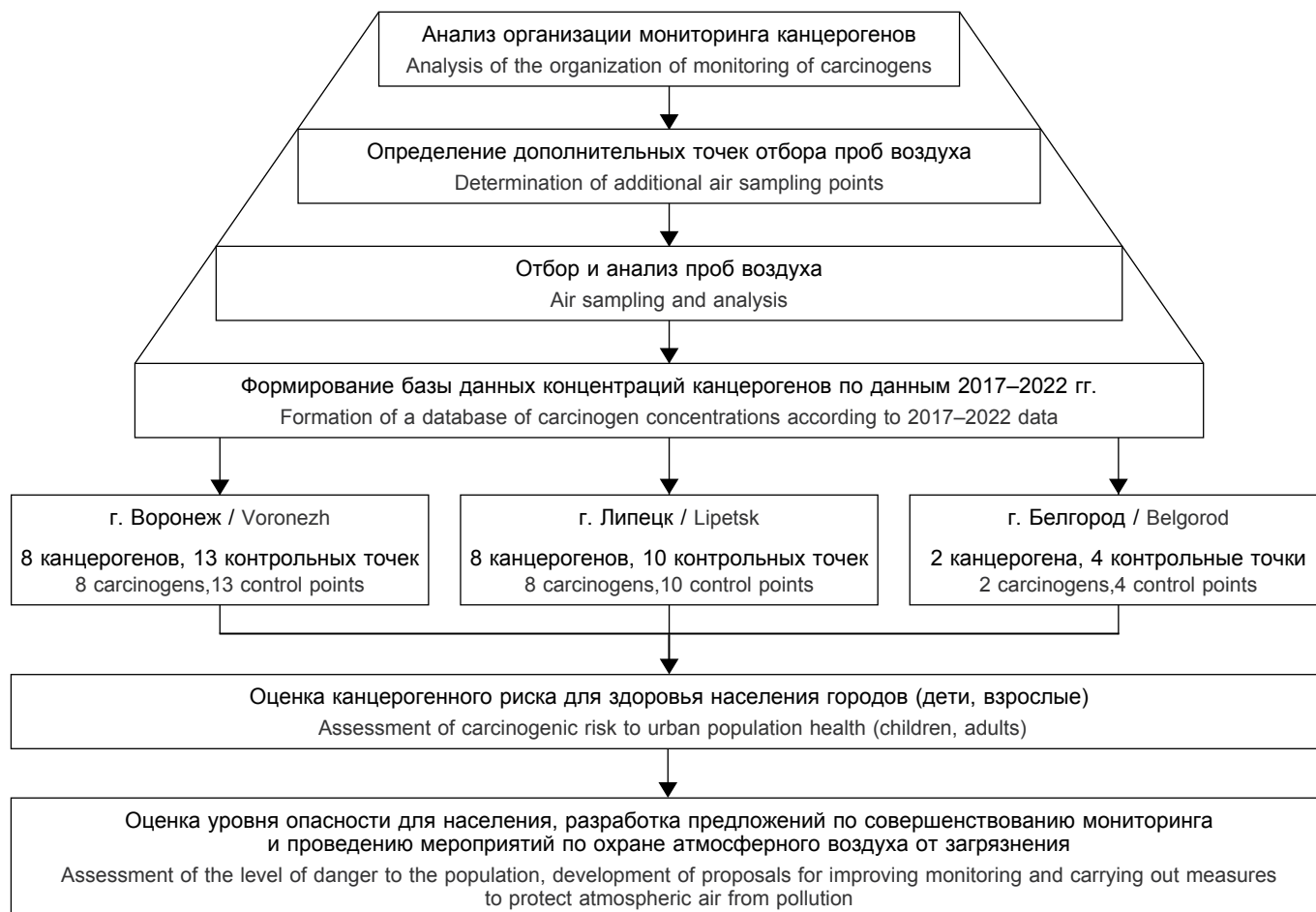
В исследовании использованы первичные материалы центров гигиены и эпидемиологии в Воронежской, Липецкой и Белгородской областях за 2017–2022 гг. в форме протоколов лабораторных исследований качества атмосферного воздуха, а также результаты определений концентраций канцерогенов в дополнительно обоснованных контрольных точках отбора проб воздуха, выполненных в рамках договоров Воронежского государственного университета с данными учреждениями.

Индивидуальный канцерогенный риск рассчитывался по типовым формулам в соответствии с Р 2.1.10.1920–04. Схема основных этапов представлена на рисунке.

В совокупности за период 2017–2022 гг. в Воронеже проведены лабораторные исследования по определению концентраций в атмосферном воздухе восьми канцерогенов в тринадцати контрольных точках, в Липецке — восьми канцерогенов в десяти контрольных точках, в Белгороде — двух канцерогенов в четырёх контрольных точках. Для расчёта индивидуального канцерогенного риска использованы средние значения концентраций веществ за период исследований, поскольку ставилась задача оценки хронического воздействия. По территориям городов для сравнения в итоге при расчёте рисков использованы средние значения концентраций канцерогенов.

Результаты

Воронеж, Липецк и Белгород существенно различаются по структуре промышленного производства. Результаты паспортизации канцерогеноопасных производств по материалам проектов предельно допустимых выбросов предприятий, проходящих санитарно-эпидемиологическую экспертизу в центрах гигиены и эпидемиологии городов, показали, что наибольший объём выбросов канцерогенов в атмосферный воздух характерен для следующих промышленных источников: в Воронеже — производство синтетического каучука, предприятия машино- и самолётостроения; в Липецке — металлургическое производство, машиностроение, нефтехимия; в Белгороде — машиностроение, металлообработка, производство строительных материалов. По объёму выброса канцерогенов в атмосферный воздух среди предприятий первое ранговое место занимают в Воронеже АО «Воронежсинтезкаучук», в Липецке — ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК), в Белгороде — ЗАО «Белгородский завод горного машиностроения». Ещё одним источником выбросов канцерогенов в атмосферный воздух городов является автотранспорт,



Основные этапы исследования.
The main stages of the study.

в выхлопных газах которого содержатся такие канцерогены, как 3,4-бенз(а)пирен, формальдегид, сажа.

Мониторинг атмосферных загрязнений – это система наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, его загрязнением, а также оценка и прогноз состояния атмосферного воздуха и его загрязнения. Анализ организации мониторинга в отношении систематического контроля содержания канцерогенов в атмосферном воздухе показал, что в Воронеже имеется пять стационарных и пять маршрутных постов наблюдений. На стационарных постах города, принадлежащих Воронежскому областному центру по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, проводится ежедневный отбор проб с определением среднесуточных концентраций двух канцерогенов – сажи и формальдегида. На маршрутных постах лабораторией Центра гигиены и эпидемиологии в Воронежской области в программу наблюдений включены шесть канцерогенов: 1,3-бутадиен, сажа (углерод), соединения свинца, соединения хрома⁶⁺, стирол, формальдегид. Ежегодно на каждое вещество отбирается не менее 20 проб воздуха для определения среднесуточных концентраций канцерогенов. Таким образом, в Воронеже мониторинг ведётся по восьми канцерогенам.

В Липецке наблюдения за уровнем загрязнения атмосферного воздуха проводились на четырёх передвижных (подфакельных) постах контроля Центра гигиены и эпидемиологии в Липецкой области с изменяемыми адресами точек контроля (отбора) в зависимости от направления ветра. Кроме того, наблюдения за уровнем загрязнения атмосферного воздуха на территории Липецка проводились на семи стационарных постах, относящихся к системе Росгидромета.

Общий перечень контролируемых канцерогенов включает восемь веществ: 1,3-бутадиен, 3,4-бенз(а)пирен, бензол, сажа (углерод), свинец, соединения хрома⁶⁺, стирол (этиленбензол), формальдегид. Однако концентрации всех восьми веществ контролируются не во всех мониторинговых точках. Перечень зависит от близости к источникам выбросов.

В Белгороде отбор проб воздуха для определения содержания канцерогенов проводится на четырёх стационарных постах, а также выполняются разовые наблюдения лабораторией Центра гигиены и эпидемиологии в Белгородской области в маршрутных точках контроля, расположенных на территории жилой застройки. Контролируются концентрации двух канцерогенов – формальдегида и 3,4-бенз(а)пирена.

Поскольку на территории Воронежа расположение мест отбора проб атмосферного воздуха в межведомственной системе мониторинга является крайне неравномерным, были отобраны пробы воздуха в трёх дополнительных контрольных точках, что позволило снизить неопределённости при оценке риска для здоровья населения.

Для обобщения результатов оценки риска рассчитывались средние значения концентраций канцерогенов в воздухе городов, а также определялись точки с наиболее высоким содержанием определяемых веществ и соответственно самым высоким индивидуальным канцерогенным риском. Обобщённая оценка индивидуального канцерогенного риска по городам представлена в таблице.

Установлено, что в Воронеже из числа лабораторно контролируемых канцерогенов наиболее высокие значения индивидуального канцерогенного риска (на уровне

Индивидуальный канцерогенный риск (ICR) от воздействия канцерогенов, содержащихся в атмосферном воздухе Воронежа, Липецка и Белгорода**Individual carcinogenic risk (ICR) from the presence of carcinogens in the atmospheric air of the residential territory of the cities of Voronezh, Lipetsk, Belgorod**

Канцероген Carcinogen	Воронеж / Voronezh		Липецк / Lipetsk		Белгород / Belgorod	
	взрослые / adults	дети / children	взрослые / adults	дети / children	взрослые / adults	дети / children
Формальдегид Formaldehyde	$5.60 \cdot 10^{-5}$	$5.01 \cdot 10^{-6}$	$1.22 \cdot 10^{-4}$	$1.14 \cdot 10^{-4}$	$5.69 \cdot 10^{-5}$	$5.31 \cdot 10^{-5}$
Свинец Lead	$6.15 \cdot 10^{-7}$	$5.50 \cdot 10^{-8}$	$2.19 \cdot 10^{-6}$	$2.04 \cdot 10^{-6}$	Мониторинг не проводится Monitoring is not carried out	
Сажа (углерод) Soot (carbon)	$9.98 \cdot 10^{-5}$	$8.93 \cdot 10^{-6}$	$7.94 \cdot 10^{-5}$	$6.43 \cdot 10^{-5}$	Мониторинг не проводится Monitoring is not carried out	
Соединения хрома ⁶⁺ Chromium ⁶⁺ compounds	$1.32 \cdot 10^{-3}$	$1.18 \cdot 10^{-4}$	Не обнаружены на уровне чувствительности методов лабораторного контроля — 0.0004 мг/м^3 Not detected at the sensitivity level of laboratory control methods — 0.0004 mg/m^3		Мониторинг не проводится Monitoring is not carried out	
1,3-бутадиен 1,3-butadiene	$3.42 \cdot 10^{-3}$	$3.06 \cdot 10^{-4}$	Не обнаружен на уровне чувствительности методов лабораторного контроля — 0.5 мг/м^3 Not detected at the sensitivity level of laboratory control methods — 0.5 mg/m^3		Мониторинг не проводится Monitoring is not carried out	
Стирол (этилбензол) Styrene (ethenylbenzene)	$1.34 \cdot 10^{-7}$	$1.20 \cdot 10^{-8}$	Не обнаружен на уровне чувствительности методов лабораторного контроля — 0.001 мг/м^3 Not detected at the sensitivity level of laboratory control methods — 0.001 mg/m^3		Мониторинг не проводится Monitoring is not carried out	
Бензол Benzene	$1.27 \cdot 10^{-5}$	$1.18 \cdot 10^{-5}$	$1.62 \cdot 10^{-6}$	$1.51 \cdot 10^{-5}$	Мониторинг не проводится Monitoring is not carried out	
3,4-бенз(а)пирен 3,4-benz(a)pyrene	$2.54 \cdot 10^{-7}$	$2.37 \cdot 10^{-7}$	$1.58 \cdot 10^{-5}$	$1.47 \cdot 10^{-5}$	$3.05 \cdot 10^{-7}$	$2.85 \cdot 10^{-7}$

выше предельно допустимого, то есть $1 \cdot 10^{-4}$) отмечают по 1,3-бутадиену — $3,42 \cdot 10^{-3}$ для взрослого населения и $3,06 \cdot 10^{-4}$ для детского населения, а также соединениям хрома⁶⁺ — $1,32 \cdot 10^{-3}$ и $1,18 \cdot 10^{-4}$ соответственно. При этом в дополнительно обоснованных нами точках мониторинга на территории жилой застройки (ул. Меркулова, 5, и ул. Розы Беляевой, 2), не входящих в существующую систему межведомственного мониторинга, отмечено суммарное воздействие этих двух канцерогенов с уровнями риска, относящимися к четвёртому диапазону (менее $1 \cdot 10^{-3}$, но более $1 \cdot 10^{-4}$), классифицируемому в соответствии с Р 2.1.10.1920–04 как неприемлемый для населения риск. Данные точки обоснованно выбраны вблизи наиболее крупных промышленных объектов Воронежа — производства синтетического каучука и предприятия самолётостроения.

Уровни индивидуального канцерогенного риска для здоровья населения Липецка отражают максимальную экспозицию канцерогенами, загрязняющими атмосферный воздух. Установлено, что в Липецке индивидуальный канцерогенный риск выше допустимого уровня отмечен по воздействию формальдегида — $1,22 \cdot 10^{-4}$ для взрослого населения и $1,14 \cdot 10^{-4}$ для детского населения. Анализ в разрезе десяти мониторинговых точек показывает, что в ряде случаев с воздействием бензола, в частности в маршрутной точке по адресу проспект 60 лет СССР, 2 (под факелом производств ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», расстояние от промзоны — 4 км), индивидуальный канцерогенный риск для взрослых отмечается на уровне $1,23 \cdot 10^{-4}$, а для детей — $1,15 \cdot 10^{-4}$.

В Белгороде канцерогенный риск для детского населения (по средней концентрации) от воздействия формальдегида составил $5,31 \cdot 10^{-5}$, от воздействия 3,4-бенз(а)пирена — $2,85 \cdot 10^{-7}$; для взрослого населения — $5,69 \cdot 10^{-5}$ и $2,85 \cdot 10^{-4}$ соответственно. Однако ограниченность числа мониторинговых точек и отсутствие информации по другим канцерогенам вносит существенную неопределённость в результаты оценки риска для здоровья населения этого города.

В целом для взрослого населения риски выше, что обусловлено особенностями методики оценки риска, а именно большими значениями продолжительности времени воздействия в формуле расчёта доз поступления токсикантов ингаляционным путём. При использовании стандартных значений факторов экспозиции в расчёте среднесуточных доз поступления веществ с атмосферным воздухом ингаляционным путём время воздействия для взрослого населения принимается 30 лет, для детей — 6 лет.

Обсуждение

С учётом имеющихся объективных данных лабораторного контроля канцерогенов в атмосферном воздухе городов Центрально-Черноземного региона России определены вещества, воздействие которых при максимальных сценариях экспозиции обуславливает уровень индивидуального канцерогенного риска для здоровья населения выше допустимого ($1 \cdot 10^{-4}$): в Воронеже — 1,3-бутадиен (источник выбросов — производство синтетического каучука) и соединения хрома⁶⁺ (основной источник выбросов — авиационный завод); в Липецке — формальдегид, в отдельных контрольных точках — бензол (основные источники — выбросы металлургического производства и автомобильного транспорта). На территории Белгорода уровней риска выше предельно допустимого не выявлено. Вместе с тем организация системы мониторинга канцерогенов в атмосферном воздухе Белгорода требует первоочередного совершенствования, поскольку ограниченная информация по четырём мониторинговым точкам и двум канцерогенам несёт в себе существенную неопределённость при оценке риска для здоровья за счёт невозможности оценки влияния на здоровье населения всех поступающих в атмосферный воздух города канцерогенов.

Следует отметить, что приоритетные загрязняющие атмосферный воздух вещества, вносящие наибольший вклад в суммарный канцерогенный риск, для каждой территории различны. Например, для городов Иркутской области

в исследованиях Н.В. Ефимовой и соавт. (2019) к приоритетным канцерогенам отнесены соединения хрома⁴⁺⁶ и свинца [13]. В обосновании актуальности исследований нашей статьи отмечены результаты научно-практических работ в других регионах [5, 9, 10]. При этом общим приоритетом в оценке канцерогенного риска являлся формальдегид, наличие которого в атмосферном воздухе характерно для любого промышленно развитого города.

Перспективными направлениями совершенствования методологии оценки экспозиции для расчётов канцерогенного риска являются увеличение числа мониторинговых точек и определяемых на неблагоприятных территориях канцерогенов, внедрение методов автоматизированного лабораторного контроля концентраций, внедрение алгоритмов искусственных нейронных сетей для анализа информации и канцерогенной опасности с целью последующего поиска наиболее оптимальных решений по её минимизации. В Российской Федерации такая работа уже ведётся.

В частности, в работе И.М. Попельницкой (2022) на примере Красноярска рассмотрен пример организации краевой наблюдательной сети, включающей четыре автоматизированных поста наблюдения («Красноярск-Северный», «Красноярск-Солнечный», «Красноярск-Черёмушки» и «Красноярск-Покровка»), что позволило проанализировать пространственно-временную динамику изменения концентраций канцерогенов (бензола, толуола, хлорбензола, о-ксилола, этилбензола, стирола, бенз(а)пирена, свинца) в приземном слое атмосферного воздуха, доказать сезонность изменения уровня загрязнения и оценить ингаляционный канцерогенный риск для здоровья [14].

В работе В.М. Боева и соавт. (2019) на примере отдельных территорий Оренбургской области выполнена сравнительная гигиеническая оценка канцерогенного риска для здоровья и заболеваемости раком молочной железы. Авторы отмечают, что на неблагоприятной территории наблюдения с высоким уровнем онкологической заболеваемости (выше в 1,7 раза по отношению к благополучной) приоритетными канцерогенами в воздухе являются соединения хрома⁶⁺ и формальдегид, которые формируют более 95% вклада в суммарный канцерогенный риск [15]. Аналогичная верификация результатов оценки риска путём сравнения с показателями онкологической заболеваемости выполнена в исследованиях В.Г. Пузырева и соавт. (2022), показавшая, что загрязнение атмосферного воздуха промышленных территорий выбросами, обладающими канцерогенными свойствами (учитывалось 12 веществ), негативно отражается на уровне злокачественных новообразований у населения [16].

Сопоставление уровня онкологической заболеваемости и канцерогенных рисков проведено в рамках выполненной научно-исследовательской программы Роспотребнадзора в городах Салавате, Стерлитамаке и Уфе Республики Башкортостан (Н.Р. Рахматуллин и соавт., 2019), результаты реализации которой достоверно свидетельствуют о корреляции уровней рисков в зонах влияния крупных нефтехимических комплексов и показателей онкологической заболеваемости и смертности населения [17].

В исследованиях, выполненных В.Б. Заалишвили и соавт. (2021) на территории Владикавказа, где наибольший вклад в загрязнение окружающей среды вносили предприятия металлургической промышленности, на электронных картах сопоставлены результаты оценки канцерогенного риска с учётом интерполяции данных методом обратных взвешенных расстояний (IDW) и уровня заболеваемости населения злокачественными новообразованиями. Показана достоверная связь этих показателей с учётом как прямого, так и вероятного опосредованного попадания канцерогенных химических веществ (кадмий, медь, никель, свинец, цинк) из почвы в воздушную среду и их последующего поступления в организм человека ингаляционным путём [18].

В.Ю. Косыгиным и соавт. (2021) разработан и апробирован алгоритм нейросетевого моделирования и оценки канцерогенного риска, связанного с воздействием на орга-

низм человека загрязняющих веществ, учитывающий в качестве предикатов данные о скорости и направлении ветра, объёме, концентрации и высоте выброса, расстояние по оси выброса до контрольной точки, в которой необходимо определение величины индивидуального канцерогенного риска [19]. Алгоритмы искусственных нейронных сетей апробированы С.Б. Петровым и соавт. (2022) для оценки эффективности технологических мероприятий, направленных на управление риском для здоровья населения при воздействии атмосферных выбросов многотопливных теплоэлектростанций (на примере ТЭЦ-3 и ТЭЦ-4 Кировской области). При модернизации технологии получения энергии и системы пылегазоочистки прогнозируется статистически значимое ($p < 0,001$) снижение величины показателя канцерогенного риска в среднем на 80,67%, относительных рисков смертности и обращений в медицинские организации – более чем на 80% при сохранении использования как твёрдого, так и газообразного топлива [20].

Заключение

Как показало наше исследование, а также результаты обзора научных публикаций других авторов, реализация управленческих решений, направленных на снижение канцерогенного риска, обусловленного загрязнением воздушной среды промышленно развитых городов, продолжает оставаться актуальной. Приоритетными направлениями таких решений являются совершенствование технологических процессов, внедрение более эффективных сооружений для очистки выбросов предприятий, реализация рациональных градостроительных решений, оптимизирующих расположение промышленных зон и территорий жилой застройки, транспортных сетей, внутригородских зон рекреации.

Необходимо также совершенствовать систему мониторинга уровня загрязнения атмосферного воздуха, методологию оценки риска для здоровья населения в части оценки экспозиции атмосферных загрязнений.

Дискуссионными вопросами в предметной области количественной оценки обусловленного загрязнением атмосферного воздуха канцерогенного риска для здоровья населения остаются следующие.

1. Что необходимо лабораторно контролировать?
2. Где необходимо производить контроль?
3. Как часто необходимо производить контроль?
4. Какова должна быть минимальная плотность мониторинговых точек на единицу площади поселения городского или сельского типа для достижения снижения неопределённостей при оценке риска до приемлемого уровня?
5. На какой период времени ориентирован контроль?
6. Что является основанием пересмотра перечня лабораторно контролируемых концентраций канцерогенов в атмосферном воздухе?

Российское природоохранное и санитарное законодательство в настоящее время лишь отчасти может дать ответы на эти вопросы. Однако для практических учреждений и организаций, в том числе подведомственных Роспотребнадзору и Росприроднадзору, ответы на эти вопросы являются во многих случаях принципиальными, поскольку речь идёт о рациональном расходовании бюджетных средств. Необходимость развития и совершенствования законодательной, нормативной и методической базы в предметной области оценки рисков для здоровья населения, обусловленной воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды, не вызывает сомнений.

Нашими исследованиями подтверждено, что снижение неопределённостей в оценке риска для здоровья возможно при объединении усилий организаций, имеющих функции ведения мониторинга уровня загрязнения атмосферного воздуха, с инициативными научно-практическими исследованиями, выполняемыми в рамках грантов, выделяемых Российским научным фондом.

Литература

(п.п. 21–25 см. References)

1. Кинжаев Д.А., Штанько Д.С., Пикулин Ю.Г. Оценка канцерогенного риска для мегаполиса: обзор. *Инновационные научные исследования*. 2022; (4–2): 23–9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6613540> <https://elibrary.ru/aqxlgx>
2. Боев В.М., Зеленина Л.В., Кудусова Л.Х., Кряжева Е.А., Зеленин Д.О. Гигиеническая оценка канцерогенного риска здоровью населения, ассоциированного с загрязнением депонирующих сред тяжёлыми металлами. *Анализ риска здоровью*. 2022; (1): 17–26. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.02> <https://www.elibrary.ru/pssyqm>
3. Дерябкина Л.А., Марченко Б.И., Тарасенко К.С. Оценка канцерогенного риска, обусловленного повышенным содержанием 3,4-бенз(а)пирена в почве промышленного города. *Анализ риска здоровью*. 2022; (1): 27–35. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.03> <https://elibrary.ru/okvzwm>
4. Белых Л.И., Будько Т.И. Бенз(а)пирен в атмосфере и его канцерогенные риски для здоровья населения городов Южного Прибайкалья. *Техносферная безопасность*. 2020; 5(3): 243–52. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-3-243-252> <https://elibrary.ru/lgtssm>
5. Валеев Т.К., Тихонов В.Н., Сулейманов Р.А. Опыт гигиенической оценки канцерогенного риска для здоровья населения, проживающего на территориях с развитой нефтяной отраслью. *Тенденции развития науки и образования*. 2021; (79–1): 6–8. <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-01> <https://elibrary.ru/sjhmab>
6. Суржиков Д.В., Кислицына В.В., Голиков Р.А., Ликонцева Ю.С., Штайгер В.А. Риск нарушения здоровья населения от влияния атмосферных выбросов углебогатительной фабрики. *Санитарный врач*. 2023; (1): 17–25. <https://doi.org/10.33920/med-08-2301-02> <https://elibrary.ru/wjlgtm>
7. Садеков Д.Р., Ермаченко А.Б., Котов В.С. Оценка канцерогенного риска для здоровья населения при воздействии атмосферных загрязнений в районе размещения предприятия теплоэнергетики. *Университетская клиника*. 2021; (4): 94–9. [https://doi.org/10.26435/uc.v0i4\(4\).734](https://doi.org/10.26435/uc.v0i4(4).734) <https://elibrary.ru/eqewrm>
8. Петров С.Б., Петров Б.А. Оценка риска здоровью населения при воздействии твердых частиц в составе атмосферных выбросов многоотопливных теплоэлектростанций. *Экология человека*. 2019; (6): 4–10. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-6-4-10> <https://elibrary.ru/bdwgko>
9. Ефимова Н.В., Ханхареев С.С., Моторов В.Р., Малеева Е.В. Оценка канцерогенного риска для населения города Улан-Удэ. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(1): 90–3. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-90-93> <https://elibrary.ru/vtgtkq>
10. Малькова И.Л., Петров Д.В. Территориальный анализ канцерогенного риска здоровью населения г. Ижевска. *Наука Удмуртии*. 2021; (1): 37–42. <https://elibrary.ru/wgshex>
11. Копытенкова О.И., Леванчук А.В., Еремин Г.Б. Гигиеническая характеристика воздушного бассейна в районе интенсивной эксплуатации дорожно-автомобильного комплекса. *Гигиена и санитария*. 2019; 98(6): 613–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-6-613-618> <https://elibrary.ru/cspjzy>
12. Ракитский В.Н., Стёпкин Ю.И., Клепиков О.В., Куролап С.А. Оценка канцерогенного риска здоровью городского населения, обусловленного воздействием факторов среды обитания. *Гигиена и санитария*. 2021; 100(3): 188–95. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-188-195> <https://elibrary.ru/ovketw>
13. Ефимова Н.В., Мыльникова И.В., Кузьмина М.В., Лисецкая Л.Г., Лозневая Е.Е. Оценка канцерогенного риска для населения экологически неблагоприятных территорий Иркутской области. *Медицина труда и промышленная экология*. 2019; 59(2): 117–21. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-2-117-121> <https://elibrary.ru/ulgvpn>
14. Попельницкая И.М., Крылова В.А., Шилина Н.Г., Попельницкий Е.В., Почечутов С.И., Герашенко С.М. и др. Анализ динамики индивидуальных ингаляционных канцерогенных рисков здоровью населения г. Красноярск. *Мониторинг. Наука и технологии*. 2022; (2): 54–9. <https://doi.org/10.25714/MNT.2022.52.006> <https://elibrary.ru/jlyeim>
15. Боев В.М., Кряжева Е.А., Бектышева И.К., Шелушкина Д.В., Кряжев Д.А. Сравнительная гигиеническая оценка канцерогенного риска здоровью населения, проживающего на территориях с различным уровнем заболеваемости раком молочной железы. *Уральский медицинский журнал*. 2019; (4): 9–13. <https://doi.org/10.25694/URMJ.2019.04.06> <https://elibrary.ru/wexzty>
16. Пузырев В.Г., Халфиев И.Н., Музаффарова М.Ш., Григорьева Л.В., Ситдикова И.Д., Имамов А.А. и др. Оценка сравнительной канцерогенной опасности в условиях воздействия факторов промышленной экологии. *Медицина и организация здравоохранения*. 2022; 7(2): 60–8. <https://doi.org/10.56871/3326.2022.12.17.008>
17. Рахматуллин Н.Р., Сулейманов Р.А., Валеев Т.К., Бактыбаева З.Б. Выраженность онкологических заболеваний среди населения в регионе с развитой нефтехимической промышленностью. *Теория и практика современной науки*. 2019; (9): 141–6. <https://elibrary.ru/nuyjah>
18. Заалишвили В.Б., Бурдыева О.Г., Кануков А.С., Дзобелова Л.В. Разработка карт индекса канцерогенного риска территории г. Владикавказ. *Геология и геофизика Юга России*. 2021; 11(4): 147–60. <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.98.22.012> <https://elibrary.ru/svujsl>
19. Косыгин В.Ю., Долгов Р.В., Катин В.Д., Ахтямов М.Х. Разработка нейросетевого алгоритма управления канцерогенными рисками в зонах влияния источников вредных выбросов из энергетических установок промышленных предприятий. *Экология промышленного производства*. 2021; (1): 41–5. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2021_1_41 <https://elibrary.ru/rlijof>
20. Петров С.Б., Жернов Ю.В. Оценка эффективности технологических мероприятий для управления риском здоровью населения при воздействии атмосферных выбросов многоотопливных теплоэлектростанций. *Экология человека*. 2022; (11): 761–70. <https://doi.org/10.17816/humeco110989> <https://elibrary.ru/eblynr>

References

1. Kinzhaev D.A., Shtan'ko D.S., Pikulin Yu.G. Assessment of the carcinogenic risk for a megapolis: a review. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniya*. 2022; (4–2): 23–9. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6613540> <https://elibrary.ru/aqxlgx> (in Russian)
2. Boev V.M., Zelenina L.V., Kudusova L.Kh., Kryazheva E.A., Zelenin D.O. Hygienic assessment of carcinogenic risk to public health associated with contamination of depositing media with heavy metals. *Analiz riska zdorov'yu*. 2022; (1): 17–26. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.02> <https://elibrary.ru/amonix>
3. Deryabkina L.A., Marchenko B.I., Tarasenko K.S. Assessment of carcinogenic risk caused by elevated 3,4-benz(a)pyrene concentration in soils in an industrial city. *Analiz riska zdorov'yu*. 2022; (1): 27–35. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2022.1.03> <https://elibrary.ru/rloitj>
4. Belykh L.I., Bud'ko T.I. Benzo(a)pyrene in the atmosphere and its carcinogenic risks to the health of the population of southern Baikal cities. *Tekhnosfernaya bezopasnost'*. 2020; 5(3): 243–52. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2020-3-243-252> <https://elibrary.ru/lgtssm> (in Russian)
5. Valeev T.K., Tikhonov V.N., Suleymanov R.A. The experience of hygienic assessment of carcinogenic risk to the health of the population living in territories with a developed oil industry. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2021; (79–1): 6–8. <https://doi.org/10.18411/trnio-11-2021-01> <https://elibrary.ru/sjhmab> (in Russian)
6. Surzhikov D.V., Kislitsyna V.V., Golikov R.A., Likontseva Yu.S., Shtayger V.A. The risk of public health damage from the impact of atmospheric emissions from a coal processing plant. *Saniarnyy vrach*. 2023; (1): 17–25. <https://doi.org/10.33920/med-08-2301-02> <https://elibrary.ru/wjlgtm> (in Russian)
7. Sadekov D.R., Ermachenko A.B., Kotov V.S. Assessment of a carcinogenic risk for public health under exposure to atmospheric pollution in the area of location of a heat power industry. *Universitetskaya klinika*. 2021; (4): 94–9. [https://doi.org/10.26435/uc.v0i4\(4\).734](https://doi.org/10.26435/uc.v0i4(4).734) <https://elibrary.ru/eqewrm> (in Russian)
8. Petrov S.B., Petrov B.A. Assessment of health risk of particulate matter components of atmospheric emissions of multifuel power plants. *Ekologiya cheloveka*. 2019; (6): 4–10. <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2019-6-4-10> <https://elibrary.ru/bdwgko> (in Russian)
9. Efimova N.V., Khankhareev S.S., Motorov V.R., Madeeva E.V. Assessment of the carcinogenic risk for the population of Ulan-Ude. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(1): 90–3. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-1-90-93> <https://elibrary.ru/vtgtkq> (in Russian)
10. Mal'kova I.L., Petrov D.V. Territorial analysis of carcinogenic health risk of the population of Izhevsk. *Nauka Udmurtii*. 2021; (1): 37–42. <https://elibrary.ru/wgshex> (in Russian)
11. Kopytenkova O.I., Levanchuk A.V., Eremin G.B. Hygienic characteristics of the atmospheric air in the area of intensive use of the road-car complex. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2019; 98(6): 613–8. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-6-613-618> <https://elibrary.ru/cspjzy> (in Russian)
12. Rakitskiy V.N., Stepkin Yu.I., Klepikov O.V., Kurolap S.A. Assessment of carcinogenic risk caused by the impact of the environmental factors on urban population health. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2021; 100(3): 188–95. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2021-100-3-188-195> <https://elibrary.ru/ovketw> (in Russian)
13. Efimova N.V., Myl'nikova I.V., Kuz'mina M.V., Lisetskaya L.G., Loznayaya E.E. Carcinogenic risk assessment in population living in the ecologically problematic areas of Irkutsk region. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*. 2019; 59(2): 117–21. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2019-59-2-117-121> <https://elibrary.ru/ulgvpn> (in Russian)
14. Popel'nitskaya I.M., Krylova V.A., Shilina N.G., Popel'nitskiy E.V., Pochekutov S.I., Gerashchenko S.M., et al. Analysis of the dynamics of individual inhalation carcinogenic risks to the population of Krasnoyarsk. *Nauka i tekhnologii*. 2022; (2): 54–9. <https://doi.org/10.25714/MNT.2022.52.006> <https://elibrary.ru/jlyeim> (in Russian)
15. Boev V.M., Kryazheva E.A., Bektyasheva I.K., Shchelushkina D.V., Kryazhev D.A. Comparative hygienic assessment of the carcinogenic risk to the health of the population living in areas with different levels of the incidence of breast cancer. *Ural'skiy meditsinskiy zhurnal*. 2019; (4): 9–13. <https://doi.org/10.25694/URMJ.2019.04.06> <https://elibrary.ru/wexzty> (in Russian)

16. Puzyrev V.G., Khalifiev I.N., Muzaffarova M.Sh., Grigor'eva L.V., Sitdikova I.D., Imamov A.A., et al. Assessment of comparative carcinogenic hazard under the influence of factors of industrial ecology. *Meditsina i organizatsiya zdavookhraneniya*. 2022; 7(2): 60–8. <https://doi.org/10.56871/3326.2022.12.17.008> (in Russian)
17. Rakhmatullin N.R., Suleymanov R.A., Valeev T.K., Baktybaeva Z.B. The severity of cancer in the region with a developed petrochemical industry. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki*. 2019; (9): 141–6. <https://elibrary.ru/nyjjah> (in Russian)
18. Zaalishvili V.B., Burdzieva O.G., Kanukov A.S., Dzobelova L.V. Development of cancerogenic risk index maps for the territory of Vladikavkaz. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2021; 11(4): 147–60. <https://doi.org/10.46698/VNC.2021.98.22.012> <https://elibrary.ru/svujsl> (in Russian)
19. Kosygin V.Yu., Dolgov R.V., Katin V.D., Akhtyamov M.Kh. Working out of neural network algorithm for management of cancerogenic risks in zones of influence of sources of harmful emissions from power installations of industrial enterprises. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2021; (1): 41–5. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2021_1_41 <https://elibrary.ru/rlijof> (in Russian)
20. Petrov S.B., Zhernov Yu.V. Evaluation of the effectiveness of technological measures to manage the risk to public health when exposed to atmospheric emissions of multi-fuel combined heat and power plants. *Ekologiya cheloveka*. 2022; (11): 761–70. <https://doi.org/10.17816/humeco110989> <https://elibrary.ru/eblynr> (in Russian)
21. Jenwitheesuk K., Peansukwech U., Jenwitheesuk K. Accumulated ambient air pollution and colon cancer incidence in Thailand. *Sci. Rep.* 2020; 10(1): 17765–2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74669-7>
22. Van Ryswyk K., Evans G.J., Kulka R., Sun L., Sabaliauskas K., Rouleau M., et al. Personal exposures to traffic-related air pollution in three Canadian bus transit systems: The Urban Transportation Exposure Study. *J. Exp. Sci. Environ. Epidemiol.* 2021; 31(4): 628–40. <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0242-2>
23. Mallah M.A., Changxing L., Mallah M.A., Noreen S., Liu Y., Saeed M., et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overview. *Chemosphere*. 2022; 296: 133948. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133948>
24. Gholizadeh A., Taghavi M., Moslem A., Neshat A.A., Lari Najafi M., Alahabadi A., et al. Ecological and health risk assessment of exposure to atmospheric heavy metals. *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2019; 184: 109622. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109622>
25. Tomczak A., Miller A.B., Weichenthal S.A., To T., Wall C., van Donkelaar A., et al. Long-term exposure to fine particulate matter air pollution and the risk of lung cancer among participants of the Canadian National Breast Screening Study. *Int. J. Cancer*. 2016; 139(9): 1958–66. <https://doi.org/10.1002/ijc.30255>