

Научная статья

## ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ФАКТОРАМИ РИСКА И ЗДОРОВЬЕМ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ХРОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Д.А. Кирьянов<sup>1</sup>, М.Р. Камалтдинов<sup>1</sup>, М.Ю. Цинкер<sup>1</sup>,  
С.В. Бабина<sup>1</sup>, С.В. Клейн<sup>1,2</sup>, А.М. Андришунас<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Россия, 614045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82

<sup>2</sup>Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера, ул. Петропавловская, 26

*Актуальность работы вытекает из необходимости установления параметризованных причинно-следственных связей, характеризующих дополнительные случаи заболевания населения в ответ на хроническое воздействие химических факторов.*

*Целью представленной работы является исследование зависимостей в системе «среда обитания – здоровье населения» для количественной оценки и прогнозирования хронического риска под воздействием комплекса веществ, содержащихся в атмосферном воздухе.*

*Для решения поставленной задачи был осуществлен сбор статистического материала по ряду муниципальных образований, расположенных на территории Российской Федерации, различающихся составом и уровнями содержания химических веществ в атмосферном воздухе. Согласование данных по заболеваемости населения и качеству атмосферного воздуха проводили в местах расположения расчетных точек, в качестве которых использовались координаты центров жилых домов. Математическое моделирование зависимостей осуществлялось с использованием метода построения множественной линейной регрессии. В качестве независимых переменных отбирались показатели загрязнения (концентрации химических веществ в атмосферном воздухе), удовлетворяющие требованиям биологической правдоподобности и статистической значимости парных корреляционных связей. Полученные регрессионные модели содержат 190 коэффициентов для 36 химических соединений, присутствующих в выбросах в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников, которые позволяют проводить расчет частоты дополнительных случаев заболеваний по 29 нозологическим формам. Установленные коэффициенты дают возможность оперативно проводить оценочные расчеты количества случаев заболеваний по обращаемости населения за медицинской помощью, ассоциированных с качеством атмосферного воздуха в местах проживания.*

*Полученные зависимости могут быть использованы для прогнозирования хронического риска здоровью. Дальнейшим этапом совершенствования предложенных подходов может являться установление критериев ранжирования химических рисков для здоровья в зонах влияния опасных химических объектов.*

**Ключевые слова:** хронический риск, загрязнение атмосферного воздуха, химические вещества, математическое моделирование, множественная регрессия, оценка риска здоровью, заболеваемость, дополнительные случаи.

© Кирьянов Д.А., Камалтдинов М.Р., Цинкер М.Ю., Бабина С.В., Клейн С.В., Андришунас А.М., 2022

**Кирьянов Дмитрий Александрович** – кандидат технических наук, заведующий отделом математического моделирования систем и процессов (e-mail: kda@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>).

**Камалтдинов Марат Решидович** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией ситуационного моделирования и экспертно-аналитических методов управления (e-mail: kmr@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0969-9252>).

**Цинкер Михаил Юрьевич** – младший научный сотрудник лаборатории ситуационного моделирования и экспертно-аналитических методов управления (e-mail: cinker@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2639-5368>).

**Бабина Светлана Владимировна** – заведующий лабораторией информационно-вычислительных систем и технологий (e-mail: bsv@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6805>).

**Клейн Светлана Владиславовна** – профессор РАН, доктор медицинских наук, доцент, заведующий отделом системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга (e-mail: kleyn@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>).

**Андришунас Алена Мухаматовна** – младший научный сотрудник отдела системных методов санитарно-гигиенического анализа и мониторинга (e-mail: ama@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-5787>).

Методология анализа риска здоровью населения на современном этапе развития российского общества востребована на всех уровнях государственного управления. На стадии планирования мероприятий оценка риска здоровью является основой установления наиболее эффективных мер по минимизации угроз и опасностей; на стадии реализации планов действий – дает возможность оценить эффективность мероприятий; на стадии контроля и надзора – позволяет выделять приоритеты для концентрации усилий на объектах наибольшего риска причинения вреда здоровью граждан [1, 2].

Необходимость проведения оценки риска закреплена в рамках Указа Президента РФ от 11.03.2019 № 97 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в области обеспечения химической и биологической безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу», являющегося фундаментальной основой системы государственного управления в сфере национальной безопасности РФ [3, 4]. Важность оценки риска от воздействия веществ в атмосферном воздухе подчеркивается задачами федерального проекта «Чистый воздух» национального проекта «Экология» (2019–2024 гг.), направленного на улучшение экологической обстановки и снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Развитие методологии оценки риска здоровью ставит ряд задач, решение которых предполагает использование новейших научно-методических подходов, объединяющих смежные области знаний, такие как медицина, физиология, биология, биомеханика, математика. Одним из наиболее перспективных подходов для прогнозирования и оценки вкладов факторов в нарушение здоровья, а также установления причинно-следственных связей является использование методов математического моделирования.

В настоящее время одним из наиболее популярных методических подходов при проведении оценки химического риска является расчет индексов и коэффициентов опасности ( $HQ$  и  $HI$ ) химических веществ, поступающих в организм различными путями, и классификация уровней риска. Простота реализации такого подхода и легкость получения необходимой информации для проведения расчетов выделяет этот метод как наиболее доступный для проведения экспресс-оценок загрязнения объектов среды обитания и выбора приоритетных факторов риска. Подход широко используется при оценке неблагоприятного воздействия загрязненного атмосферного воздуха на здоровье жителей различных населенных мест [5, 6], оценке риска воздействия загрязняющих веществ на здоровье различных групп населения [7–9], при решении задач влияния предприятий на состояние объектов среды обитания [10], при проведении мониторинговых исследований загрязнения атмосферного воздуха, воды, почвы и пр. [11–13], для решения задач градостроительства и организации природоохранной деятельности, а так-

же для задач оценки эффективности мероприятий по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Адекватность метода задачам оценки риска подтверждается его широкой распространенностью как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях [14, 15].

Вместе с тем обзор научных публикаций позволил установить, что проведение расчетов и анализ коэффициентов и индексов опасности не дает возможности получить количественные оценки вероятных негативных последствий для населения в виде дополнительных случаев нарушений здоровья [16, 17]. Это сильно сужает спектр решаемых задач в области обеспечения химической и биологической безопасности, управления здоровьем населения и народосбережения, обоснования мероприятий по реабилитации населения, планирования объемов оказания медицинской помощи, прогноза ожидаемых демографических и экономических потерь и т.д.

Аналитическим расширением методики расчета коэффициентов и индексов опасности для проведения процедуры оценки риска являются алгоритмы, в основе которых лежат модели зависимостей между факторами среды обитания и негативными ответами со стороны здоровья, позволяющие проводить расчеты дополнительной вероятности формирования нарушений здоровья, ассоциированной с экспозицией факторов. Следует отметить, что большинство из опубликованных результатов построения подобных зависимостей посвящены рассмотрению частных случаев воздействия экспозиции ограниченного числа факторов на некоторые виды нарушений здоровья населения при определенных социально-экономических, природно-климатических и других условиях проживания населения [18–20].

Методология моделирования эволюции риска предполагает скоординированное применение статистических и аналитических моделей и может быть рассмотрена как один из наиболее адекватных методов для решения задач прогнозирования и оценки вероятного воздействия факторов среды обитания на здоровье населения, что позволяет более полно учитывать эффекты, обусловленные экспозицией различных факторов, в том числе на фоне возрастных изменений. Эволюционные модели дают возможность при заданных сценариях экспозиции в течение всей жизни человека оценивать риск появления нарушений функций отдельных органов и систем, анализировать вклад отдельных факторов и / или их сочетаний в формирование риска здоровью [21].

На текущий момент в многочисленных публикациях показана взаимосвязь между загрязнением атмосферного воздуха и увеличением заболеваемости болезнями органов дыхания, органов пищеварения, системы кровообращения, нервной системы и др. для различных групп населения, в том числе наиболее чувствительных [22–25]. Обобщая представленный материал, можно выделить следующие основные ограничения формализованных зависимо-

стей, содержащихся в научных публикациях: отсутствие повторяемости результатов исследований, высокая степень локализации результатов и низкий уровень их обобщения для использования в различных задачах; практически все зависимости или количественные параметры не закреплены в нормативно-методических документах по оценке риска здоровью; большинство зависимостей или их моделей требуют дополнительных исследований для их корректного использования при оценке риска; значительное количество зависимостей получены в 80-х гг. прошлого столетия и не отражают реалии сегодняшнего состояния развития техники, технологий, социальной сферы, загрязненности объектов среды обитания, развития общественных институтов в направлении контроля и управления качеством окружающей среды и состоянием здоровья.

**Цель исследования** – анализ зависимостей в системе «среда обитания – здоровье населения» для количественной оценки и прогнозирования хронического риска под воздействием комплекса веществ, содержащихся в атмосферном воздухе.

**Материалы и методы.** В работе использованы методы системного и статистического анализа. Математическое моделирование зависимостей проводилось с использованием метода построения множественной линейной регрессии.

В качестве основных гипотез при планировании исследования выступали следующие:

- влияние химического загрязнения объектов среды обитания на показатели здоровья населения определяется только уровнем факторов (концентрацией химических соединений или их дозами), при этом сочетанным влиянием других факторов пренебрегается;
- при комбинированном воздействии нескольких химических факторов на один показатель здоровья применяется свойство аддитивности, при этом эффекты усиления или ослабления влияний отдельных химических соединений при присутствии других веществ не учитываются.

Для решения поставленной задачи был осуществлен сбор статистического материала по ряду крупных муниципальных образований, расположенных на территории Российской Федерации, различающихся составом и уровнями содержания химических веществ в объектах среды обитания. Приведенное условие обеспечило дифференциацию перечня загрязнителей и уровней загрязнения в выборочных данных, необходимую для корректного проведения статистического моделирования.

В рамках проведения процедуры моделирования были выполнены сбор, подготовка и обработка данных по шести муниципальным образованиям за трехлетний период – с 2019 по 2021 г. (г. Пермь, г. Красноярск, г. Норильск, г. Братск, г. Чита, г. Шелехов). Для указанных территорий был выполнен сбор следующих данных:

а) данные о концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с постов ЦГМС (Росгидромет);

б) данные о концентрациях загрязняющих веществ в атмосферном воздухе по результатам социально-гигиенического мониторинга (Роспотребнадзор);

в) данные по параметрам выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников из сводных томов ПДВ (Росприроднадзор);

г) данные по обращаемости населения за медицинской помощью из реестров оплаченных случаев заболеваний (ТФОМС);

д) данные расположения точек проживания населения на территории муниципальных образований с адресной «привязкой».

Все данные были получены из официальных источников, согласованы между собой и объединены в электронные таблицы в пригодном для проведения процедуры моделирования зависимостей виде.

Согласование данных по заболеваемости населения и качеству атмосферного воздуха проводили в местах расположения расчетных точек, в качестве которых использовались координаты центров жилых домов. Для согласования и подготовки данных, характеризующих качество атмосферного воздуха, были выполнены следующие операции:

- актуализация данных адресного реестра электронных карт территорий и определение координат (в местной системе координат) центров полигонов слоя «Здания и сооружения»;
- расчет рассеивания химических веществ от стационарных и передвижных источников в расчетных точках, соответствующих центрам жилых строений;
- верификация результатов расчетов рассеивания по данным лабораторного контроля в контрольных точках;
- согласование верифицированных данных для всех территорий.

Расчет рассеивания химических веществ проводили с использованием методики МРР 2017 в пакете программ УПРЗА «Эколог-Город» 4.60.1.

Верификация результатов расчета рассеивания выполнялась в соответствии с МР 2.1.6.0157-19 «Формирование программ наблюдения за качеством атмосферного воздуха и количественная оценка экспозиции населения для задач социально-гигиенического мониторинга» от 02.12.2019. Согласно указанной методике на каждой территории результаты расчетов приземных концентраций химических веществ в расчетных точках (точках проживания населения) верифицировались данными натурных наблюдений на постах мониторинга качества атмосферного воздуха (корректировались на основе аппроксимации коэффициентов соответствия расчетных и натурных данных в точках мониторинга). При этом одним из основных условий являлось наличие для территории расчетных и натурных данных.

В ходе проведения процедуры верификации расчетных данных на различных территориях в отношении отдельных веществ были проанализированы следующие возможные ситуации:

а) химические вещества, для которых отсутствовали данные натуральных измерений во всех исследуемых территориях, были исключены из моделирования;

б) для химических веществ, у которых отсутствовали расчетные значения, но при этом проводились лабораторные измерения в точках контроля, выполнялась процедура аппроксимации значений в точках проживания методом обратных расстояний;

в) для химических веществ на территориях, у которых отсутствовали результаты лабораторных измерений, но имелись данные расчетов рассеивания, процедура верификации выполнялась с использованием осредненного коэффициента соответствия в точках контроля на остальных территориях.

В рамках выполнения процедуры согласования верифицированных концентраций химических веществ для всех территорий была составлена объединенная электронная таблица, содержащая концентрации отобранных химических веществ с привязкой к идентификаторам территорий и точкам проживания населения. В результате для построения зависимостей отобрано 48 химических веществ. Следует отметить, что причинно-следственные зависимости могут быть обнаружены и впоследствии использованы только на области определения модели, поэтому важно выполнить анализ распределения показателей загрязнения атмосферного воздуха. В табл. 1 приведены основные параметры распределения содержания химических веществ в воздухе на исследуемых территориях, используемых для выполнения моделирования зависимостей.

Подготовка данных по заболеваемости населения в привязке к расчетным точкам на исследуемых территориях проводилась с использованием деперсонифицированной информации по количеству застрахованных и их обращаемости за медицинской помощью, полученной из территориальных отделов Фонда обязательного медицинского страхования (ФОМС).

Полученная информация была «привязана» к адресным реестрам электронных карт исследуемых территорий, дифференцирована по возрастным группам (дети 0–17 лет, взрослые трудоспособного возраста, взрослые старше трудоспособного возраста) и классам болезней, группам болезней и отдельным нозологическим формам.

Предварительная медико-биологическая экспертиза позволила сформировать перечень из 43 приоритетных нозологических форм и их групп, выступающих в качестве вероятных ответов на негативное воздействие химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух, а также заполнить экспертную матрицу «фактор – ответ». В качестве экспертов выступили 11 специалистов в области гигиены и эпидемиологии, кандидаты, доктора медицинских и биологических наук со стажем работы по специальности более 15 лет. Экспертиза прохо-

дила в три этапа. Первый этап включал в себя формирование перечня нозологических форм и их групп в ходе группового совещания экспертов на основе имеющегося опыта. На втором этапе каждый эксперт независимо заполнял матрицу «фактор – ответ» на основе анализа релевантных отечественных и зарубежных литературных источников, значение «1» ставилось в случае потенциального наличия связи между химическим веществом, загрязняющим атмосферный воздух, и нозологической формой, «0» – в противном случае. На третьем этапе в результате группового обсуждения проставленных индивидуальных оценок путем голосования заполнялась итоговая матрица экспертиз (большинством голосов). Следует отметить, что в ходе итогового голосования эксперт мог изменить свое мнение на основе аргументов и предоставленных другими экспертами источников.

В результате подготовки информации для выполнения моделирования зависимостей были сформированы два согласованных массива данных:

1) верифицированные среднегодовые концентрации химических веществ в расчетных точках на исследуемых территориях;

2) относительная частота обращаемости населения за медицинской помощью в точках проживания (расчетных точках) для трех возрастных групп по выбранным нозологическим формам.

Выполнение процедуры моделирования зависимостей для количественной оценки хронического риска на основе собранной и подготовленной информации предполагало проведение следующих работ:

– построение матрицы допустимых (вероятных) связей между химическими факторами и показателями заболеваемости (матрицы биологического правдоподобия) согласно результатам экспертных оценок и известным патогенетическим закономерностям;

– построение и анализ корреляционных связей между химическими факторами и показателями нарушений здоровья, определение статистически достоверных связей;

– формализация и параметризация зависимостей на основе проведения множественного линейного регрессионного анализа.

Корреляционный анализ проводился на основе расчета коэффициентов корреляции Пирсона и проверки статистических гипотез на достоверность различий по отношению к нулю с применением критерия Стьюдента. При этом моделирование выполнялось отдельно для каждой зависимой переменной (заболеваемости по классу болезней или нозологической форме). В качестве независимых переменных отбирались показатели загрязнения (концентрации химических веществ в атмосферном воздухе), удовлетворяющие требованиям биологической правдоподобности и статистической значимости парных корреляционных связей.

Таблица 1

Характеристики распределения концентраций химических веществ, использованных для построения математических моделей

Наименование вещества	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>				
	минимум	25-й перцентиль	медиана	75-й перцентиль	максимум
Азот (II) оксид (азота оксид)	0	0,009	0,013	0,019	0,167
Азота диоксид (азот (IV) оксид)	0	0,015	0,024	0,033	0,238
Аммиак	0	0,010	0,016	0,021	1,413
Бенз(а)пирен	0	0	0,109	0,400	5,759
Бензол	7,86E-06	9,06E-04	2,09E-03	0,005	1,636
Взвешенные вещества	0,005	0,055	0,079	0,125	1,767
Взвешенные частицы PM <sub>10</sub>	0	0	0	0,040	0,267
Взвешенные частицы PM <sub>2,5</sub>	0	0	0	0,018	0,251
Гидроксibenзол (фенол)	9,87E-06	5,11E-04	9,80E-04	1,72E-03	1,101
Гидрохлорид	0	3,88E-03	0,011	0,025	0,515
диАлюминий триоксид (в пересчете на алюминий)	0	8,88E-05	1,24E-04	1,95E-04	0,02
Дигидросульфид (сероводород)	5,5E-05	3,47E-04	5,86E-04	1,73E-03	0,38
Диметилбензол (ксилол)	0	1,09E-03	3,86E-03	0,010	0,645
Кадмий оксид (в пересчете на кадмий)	0	0	0,01	0,01	0,01
Кобальт оксид (в пересчете на кобальт)	0	0	0	0	1,59E-04
Марганец и его соединения (в пересчет на марганец (IV) оксид)	2E-06	5,33E-05	0,013	0,033	0,224
Медь (II) оксид (в пересчете на медь)	2,3E-06	4,39E-05	0,012	0,059	9,213
Метилбензол (толуол)	3,3E-05	1,10E-03	3,56E-03	9,67E-03	0,243
Метилмеркаптан	0	1,66E-08	7,73E-07	1,94E-06	8,32E-04
Никель оксид (в пересчете на никель)	2,25E-06	4,04E-05	1,95E-03	0,018	0,255
Озон	0	0	0	1,08E-03	0,149
Проп-2-еннитрил	0	3,26E-05	5,14E-05	1,02E-03	0,073
Свинец и его неорганические соединения (в пересчете на свинец)	5,18E-08	7,70E-06	3,87E-03	0,012	0,17
Сера диоксид (ангидрид сернистый)	2,29E-04	8,90E-04	1,56E-03	0,008	0,696
Серная кислота	0	0	0	3,06E-04	0,161
Тетрахлорэтилен	0	0	0	6,56E-03	0,46
Трихлорэтилен	0	0	0	0,025	46,665
Углерод (сажа)	1,63E-03	0,829	1,205	2,207	34,059
Углерода оксид	0,053	0,422	0,548	0,998	15,520
Формальдегид	0	3,00E-03	6,91E-03	0,01167	0,104
Фториды неорганические плохо растворимые	0	0	0	3,17E-03	0,04
Фтористые газообразные соединения (в пересчете на фтор)	3,54E-06	1,27E-03	1,92E-03	3,94E-03	0,043
Хлорбензол	0	0	0	1,00E-04	4,00E-04
Хром (хром шестивалентный) (в пересчете на хрома (VI) оксид)	4,48E-07	1,11E-05	4,34E-03	0,021	0,097
Цинк	0	2,05E-03	0,09	0,16433	0,322
Этилбензол	0	1,00E-03	2,12E-03	5,65E-03	31,436

Непосредственно процесс моделирования предполагал исследование моделей причинно-следственных связей с применением методов множественного линейного регрессионного анализа по формуле (1):

$$z = a_0 + \sum_i a_i x_i, \quad (1)$$

где  $z$  – относительная частота нарушения здоровья, сл./100 000;

$x_i$  – значение экспозиции  $i$ -го химического фактора;

$a_0, a_i$  – параметры модели.

При построении множественных регрессионных моделей была разработана пошаговая процедура, предполагающая исключение из полной модели для каждой зависимой переменной (полученных на множествах отобранных независимых переменных) слагаемых с отрицательными коэффициентами регрессии как не соответствующих принятым гипотезам. Используемый алгоритм позволил получить модели, у которых все коэффициенты имеют положительный знак, что соответствует учету только отрицательных эффектов влияния загрязнителей атмосферного воздуха на состояние здоровья.

Для автоматизации процедуры построения моделей зависимостей, предполагающей проведение экспертизы с использованием статистических и биологических критериев, а также итерационный характер множественного регрессионного анализа, был разработан скрипт в среде *R-studio*.

**Результаты и их обсуждение.** В рамках исследования было проанализировано порядка 6,3 тысячи парных зависимостей частоты обращаемости населения (детского, взрослого трудоспособного, взрослого старше трудоспособного возрастов) за медицинской помощью от концентрации веществ в воздушной среде исследуемых территорий, на осно-

вании которых было построено 56 множественных регрессионных моделей, отвечающих требованиям статистической значимости и биологической правдоподобности. Так как нормативные и измеряемые концентрации различных веществ в воздухе могут довольно сильно отличаться (до нескольких порядков), коэффициенты моделей так же принимают значения, сильно различающиеся друг от друга, поэтому в табл. 2 приведены параметры полученных множественных регрессионных моделей  $a_i$  для каждой возрастной группы, скорректированные на единицу референтной концентрации ( $RFC$ ,  $mg/m^3$ ) для хронического ингаляционного воздействия<sup>1</sup>.

Таблица 2

Параметры моделей связи «среда (концентрация химического вещества в атмосферном воздухе) – здоровье (заболеваемость)», случаев на 100 тысяч населения на единицу референтной концентрации ( $RFC$ ,  $mg/m^3$ )

Группа нозологических форм (коды МКБ-10)	Вещество	Дети	Взрослые трудосп.	Взрослые старше трудосп.
Болезни конъюнктивы (H10, H11)	Трихлорэтилен	0,46	1,14	–
	Формальдегид	159,79	73,93	37,70
Отдельные нарушения, вовлекающие иммунный механизм (D80, D81, D82, D83, D84, D86, D89)	Цинк	2,87	0,44	0,47
Артрозы (M15–M19)	Фториды*	–	2978,39	1288,28
Деформирующие дорсопатии (M40–M43)	Фториды*	–	6242,21	4679,50
Другие дорсопатии (M50–M54)	Фториды*	–	2589,20	4162,21
	Фтористые газообразные*	–	–	1376,33
Болезни нервно-мышечного синапса и мышц (G70–G73)	Марганец и его соединения*	–	0,06	–
Демиелинизирующие болезни центральной нервной системы (G35–G37)	Гидроксибензол (фенол)	–	51,83	–
	Марганец и его соединения*	–	0,04	0,12
	Метилбензол (толуол)	–	117,33	1235,86
	Свинец и его соединения*	–	2,13	1,31
Другие дегенеративные болезни нервной системы (G30–G32)	Тетрахлорэтилен	–	71,97	–
	Бензол	–	–	2,70
	Гидроксибензол (фенол)	–	–	2,29
	Диметилбензол (ксилол)	–	–	13,12
	Тетрахлорэтилен	–	–	4,96
Другие нарушения нервной системы (G90–G99)	Трихлорэтилен	–	–	0,07
	Марганец и его соединения*	2,46	–	1,49
Полиневропатии и другие поражения периферической нервной системы (G60–G64)	Тетрахлорэтилен	885,92	–	–
	Марганец и его соединения*	0,06	–	–
Церебральный паралич и другие паралитические синдромы (G80–G83)	Тетрахлорэтилен	527,71	–	–
Эпизодические и пароксизмальные расстройства (G40–G47)	Тетрахлорэтилен	648,11	372,81	–
Другие болезни верхних дыхательных путей (J30, J31, J32, J34, J35, J37)	Азот (II) оксид	–	793,42	709,29
	Азота диоксид	1667,65	692,41	281,97
	Взвешенные вещества	25,09	7,29	–
	Взвешенные частицы $PM_{2,5}$	–	–	2,10
	Гидроксибензол (фенол)	1514,42	404,60	–
	Дигидросульфид	13,97	–	–
	Диметилбензол (ксилол)	457,03	–	–

<sup>1</sup> Р 2.1.10.1920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / утв. и введ. в действие первым заместителем Министра здравоохранения Российской Федерации, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 5 марта 2004 г. [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037399> (дата обращения: 17.10.2022).

Продолжение табл. 2

Группа нозологических форм (коды МКБ-10)	Вещество	Дети	Взрослые трудосп.	Взрослые старше трудосп.
	Марганец и его соединения*	–	0,55	–
	Метилмеркаптан	6809,72	–	–
	Никель оксид *	–	0,14	–
	Озон	6363,46	1295,37	406,06
	Углерод (сажа)	1,83	4,52	7,82
	Фториды*	462,31	809,60	964,30
Острые респираторные инфекции верхних дыхательных путей (J00, J01, J02, J03, J04, J05)	Азот (II) оксид	–	1015,42	1426,06
	Азота диоксид	4446,44	110,04	–
	Взвешенные вещества	5036,79	307,21	329,62
	Взвешенные частицы PM <sub>2,5</sub>	1511,14	–	–
	Гидроксибензол (фенол)	9252,80	1083,52	47,07
	Гидрохлорид	–	142,53	722,86
	Кадмий оксид*	–	2,65	–
	Кобальт оксид *	–	781,06	936,20
	Метилбензол (толуол)	–	3320,82	–
	Озон	–	–	1957,86
	Проп-2-еннитрил	2355,55	–	–
	Сера диоксид	17510,12	–	72,92
	Углерод (сажа)	296,52	9,23	5,82
	Формальдегид	1770,93	–	–
	Фториды*	–	–	305,56
Пневмония без уточнения возбудителя (J18)	Цинк	–	1,99	–
	Азот (II) оксид	1260,76	–	–
	Взвешенные вещества	–	3,86	3,87
	Взвешенные частицы PM <sub>10</sub>	–	93,85	120,92
	Взвешенные частицы PM <sub>2,5</sub>	–	110,87	71,41
	Гидроксибензол (фенол)	240,28	–	–
	Гидрохлорид	22,73	–	27,20
	Кобальт оксид *	–	812,75	612,30
	Медь (II) оксид *	–	0,02	0,01
	Никель оксид *	0,40	–	0,14
	Проп-2-еннитрил	98,62	30,82	38,74
	Сера диоксид	–	–	29,44
	Формальдегид	–	–	13,37
Фтористые газообразные*	–	344,32	384,01	
Хронические болезни нижних дыхательных путей (J40, J41, J42, J44.1, J44.8, J44.9, J45, J46)	Цинк	1,25	–	–
	Азот (II) оксид	703,75	–	–
	Азота диоксид	12,93	–	–
	Аммиак	127,48	–	–
	Взвешенные вещества	128,09	–	–
	Гидроксибензол (фенол)	188,99	2248,89	–
	Гидрохлорид	51,03	–	–
	диАлюминий триоксид*	73,34	–	–
	Диметибензол (ксилол)	201,68	–	–
	Метилбензол (толуол)	991,40	–	–
	Никель оксид*	–	0,21	–
	Серная кислота	16,86	–	–
	Формальдегид	87,20	–	–
	Фториды*	168,23	–	–
Гломерулярные болезни (N00–N08)	Хром *	–	1,05	–
	Цинк	–	12,41	–
	Гидроксибензол (фенол)	–	155,81	–
	Кадмий оксид *	0,30	0,21	–
	Трихлорэтилен	–	0,25	–
Другие болезни почки и мочеточника (N25, N28)	Этилбензол	–	45,90	–
	Диметибензол (ксилол)	–	–	2,17
	Кадмий оксид *	0,01	–	–
	Хлорбензол	339,13	–	234,45
	Этилбензол	7,72	–	–

Группа нозологических форм (коды МКБ-10)	Вещество	Дети	Взрослые трудосп.	Взрослые старше трудосп.
Почечная недостаточность (N17, N18, N19)	Гидроксибензол (фенол)	0,50	10,17	–
	Диметибензол (ксилол)	–	8,68	–
	Трихлорэтилен	0,00	–	–
Тубулоинтерстициальные болезни почек (N10, N11, N12, N13, N14, N15)	Гидроксибензол (фенол)	143,68	–	–
	Диметибензол (ксилол)	158,03	–	–
	Кадмий оксид *	0,47	–	–
	Свинец и его соединения*	1,37	–	–
	Хлорбензол	–	9043,25	–
	Этилбензол	–	8,10	–
Врожденные аномалии (пороки развития), деформации и хромосомные нарушения	Бенз(а)пирен	0,004	–	–
	Свинец и его соединения*	69,38	–	–
	Трихлорэтилен	9,52	–	–
Болезни, характеризующиеся повышенным кровяным давлением (I10, I11, I12, I13)	Взвешенные частицы PM <sub>10</sub>	–	5150,12	60,71
	Взвешенные частицы PM <sub>2,5</sub>	–	868,02	88,42
	Гидроксибензол (фенол)	–	5437,70	104,95
	Углерода оксид	–	4531,99	863,09
Другие болезни сердца (I30.0, I30.8, I30.9, I31, I33, I34, I35, I36, I37, I38, I40.1, I40.8, I40.9, I42, I45, I49, I50)	Гидроксибензол (фенол)	–	–	0,02
	Углерода оксид	–	–	2,07
Другие и неуточненные болезни системы кровообращения (I95.0, I95.8, I95.9, I99)	Бензол	–	–	0,18
	Взвешенные частицы PM <sub>10</sub>	14,41	–	0,21
	Взвешенные частицы PM <sub>2,5</sub>	5,08	–	0,04
	Углерода оксид	1,97	–	–
Ишемическая болезнь сердца (I20, I21, I22, I24.0, I24.8, I24.9, I25)	Бензол	–	–	43,61
	Взвешенные частицы PM <sub>2,5</sub>	–	–	40,24
	Гидроксибензол (фенол)	–	–	30,00
	Углерода оксид	–	–	443,08
Апластические и другие анемии (D60–D64)	Азота диоксид	37,97	–	–
	Никель оксид *	–	0,05	–
	Свинец и его соединения*	0,07	0,46	–
	Цинк	0,75	–	–
Другие болезни крови и кроветворных органов (D70, D71, D72.1, D72.8, D72.9, D74.8, D74.9, D75.8, D75.9)	Азот (II) оксид	–	45,78	0,26
	Азота диоксид	–	–	43,39
	Бензол	–	0,22	–
	Никель оксид *	0,02	–	–
	Свинец и его соединения*	0,70	–	–
	Углерода оксид	–	73,25	60,61
	Хлорбензол	7486,82	3279,83	–
Нарушения свертываемости крови, пурпура и другие геморрагические состояния (D69.0; D69.1, D69.2, D69.4, D69.6, D69.8, D69.9)	Свинец и его соединения*	1,33	–	–
Болезни эндокринной системы, расстройства питания и нарушения обмена веществ	Кадмий оксид *	–	9,36	–
	Свинец и его соединения*	11,45	20,63	–
	Трихлорэтилен	6,46	–	–

Примечание: \* – в таблице использованы сокращения для некоторых наименований химических веществ, полные наименования: фториды неорганические плохо растворимые, фтористые газообразные соединения (в пересчете на фтор), марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид), свинец и его неорганические соединения (в пересчете на свинец), кадмий оксид (в пересчете на кадмий), кобальт оксид (в пересчете на кобальт), медь (II) оксид (в пересчете на медь), никель оксид (в пересчете на никель), диАлюминий триоксид (в пересчете на алюминий), хром (хром шестивалентный) (в пересчете на хрома (VI) оксид).

Регрессионные модели, полученные в результате моделирования зависимостей в системе «среда (концентрация химического вещества в атмосферном воздухе) – здоровье (заболеваемость)», содержат 190 коэффициентов для 36 химических соединений, присутствующих в выбросах в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источни-

ков, которые позволяют проводить расчет частоты дополнительных случаев заболеваний по 29 нозологическим формам. Представленные в таблицах коэффициенты имеют размерность, соответствующую относительной частоте возникновения дополнительной обращаемости населения за медицинской помощью в течение года (случаев на 100 тысяч че-



ловек) при изменении концентрации химических веществ в воздухе на единицу референтной концентрации ( $RFC$ ,  $mg/m^3$ ) для хронического ингаляционного воздействия. При использовании полученных формальных зависимостей и коэффициентов моделей следует обратить внимание на ряд ограничений и неопределенностей, возникающих при их использовании для проведения оценки и анализа риска нарушений здоровья. К основным ограничениям использования результатов моделирования относятся: ограниченная область определения полученных моделей, отсутствие статистических оценок параметров воздействия для ряда химических факторов атмосферного воздуха и ответов со стороны здоровья населения.

При выходе значений факторов за область определения моделей следует обратить внимание на возможные нарушения линейности процесса в сторону его усиления. В этом случае при использовании приведенных коэффициентов результаты расчета соответствующих рисков будут занижены. Представленные обстоятельства не отменяют возможности распространения полученных зависимостей за пределы области определения (в основном в большую сторону), но при последующей интерпретации результатов расчета показателей риска следует относиться к ним как к нижней оценочной границе.

К неопределенностям, которые необходимо учитывать при разработке методики оценки риска, относятся:

- линейный характер построенных моделей;
- накопление ошибок при проведении расчетов вне области определения моделей;
- неполный охват территорий при подготовке данных для моделирования;
- различные программы лабораторного контроля качества атмосферного воздуха на исследуемых территориях.

Несмотря на значительное количество неопределенностей и ограничений, возникших в процессе выполнения процедуры моделирования, полученные коэффициенты дают возможность оперативно проводить оценочные расчеты количества случаев заболеваний по обращаемости населения за медицинской помощью, ассоциированных с качеством атмосферного воздуха в местах проживания. Полученные зависимости могут быть также использованы для прогнозирования хронического риска здоровью путем подстановки соответствующих прогнозных значений экспозиции факторов в формулу (1). Представленные формальные зависимости являются

основой для разработки и реализации методов оценки хронического риска здоровью.

**Выводы.** В результате выполнения исследования было расширено представление о количественных характеристиках влияния химического загрязнения атмосферного воздуха на показатели здоровья с перспективой их дальнейшего использования при проведении процедуры оценки и прогнозирования риска здоровью без отказа от используемых в настоящее время методов. Для решения задачи моделирования зависимостей максимально объективно был проведен сбор информации о качестве атмосферного воздуха в местах проживания населения на территориях нашей страны, значительно отличающихся географически, и частоте зафиксированных случаев нарушений здоровья. На основании собранной и систематизированной информации было проведено моделирование искомых зависимостей, в результате которого было построено 56 множественных регрессионных моделей для хронического воздействия.

Основным результатом проведенного исследования является таблица коэффициентов моделей зависимостей, отражающих интенсивность процесса формирования нарушений здоровья под воздействием химического загрязнения атмосферного воздуха, полученных в рамках гипотезы о линейности влияния на области определения моделей. Следует отметить, что учесть все неопределенности в настоящем исследовании не представляется возможным, но может быть осуществлено в будущем. При этом полученные в данном исследовании результаты выступают базой для проведения дальнейших исследований в области моделирования причинно-следственных связей между факторами загрязнения атмосферного воздуха и состоянием здоровья населения, усложняющих и расширяющих систему исходной информации, а также и саму модель зависимостей. Дальнейшим этапом совершенствования предложенных подходов может являться установление критериев ранжирования химических рисков для здоровья в зонах влияния опасных химических объектов.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках реализации комплекса процессных мероприятий «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в целях обеспечения химической и биологической безопасности Российской Федерации», закрепленных за Роспотребнадзором.

**Конфликт интересов.** Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

### Список литературы

1. Методы и технологии анализа риска здоровью в системе государственного управления при обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения / Н.В. Зайцева, А.Ю. Попова, И.В. Май, П.З. Шур // Гигиена и санитария. – 2015. – Т. 94, № 2. – С. 93–98.
2. Методические подходы, опыт и перспективы реализации рискованной модели надзорной деятельности в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, управления риском для здоровья населения и защиты прав потребителей / В.Б. Гурвич, С.В. Кузьмин, О.В. Диконская, М.А. Гилева, А.П. Боярский // Гигиена и санитария. – 2015. – Т. 94, № 2. – С. 104–108.

3. Актуальные проблемы правовой и научно-методической поддержки обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения Российской Федерации как стратегической государственной задачи / Н.В. Зайцева, А.Ю. Попова, Г.Г. Онищенко, И.В. Май // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95, № 1. – С. 5–9. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-1-5-9
4. Онищенко Г.Г., Козовенко М.Н. Обеспечение химической и биологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г. и дальнейшую перспективу COVID-19 // Инфекционные болезни: новости, мнения, обучение. – 2020. – Т. 9, № 3 (34). – С. 10–15. DOI: 10.33029/2305-3496-2020-9-3-10-15
5. Оценка влияния атмосферного воздуха на здоровье населения Владивостока и ее особенности / В.Ю. Ананьев, Д.С. Жигаев, Л.В. Кислицына, П.Ф. Кику // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2012. – Т. 49–50, № 3–4. – С. 79–82.
6. Бережная Е.В. Оценка риска для здоровья населения г. Воронежа при воздействии химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 2.
7. Маснавиева Л.Б., Ефимова Н.В., Кудашева И.В. Индивидуальные риски здоровью подростков, обусловленные загрязнением воздушной среды, и их связь с уровнями специфических аутоантител // Гигиена и санитария. – 2016. – Т. 95, № 8. – С. 738–742. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-8-738-742
8. Шевелева Т.Е. Оценка и минимизация неканцерогенного риска для здоровья работников производства резино-технических изделий при воздействии химических веществ, загрязняющих воздушную среду рабочих мест // Вестник новых медицинских технологий (Электронный журнал). – 2016. – № 4. – С. 241–247. DOI: 10.12737/22054
9. Григорьев Ю.И., Ляпина Н.В. Влияние качества атмосферного воздуха на здоровье детского населения // Вестник новых медицинских технологий. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 112–113.
10. Крупская Л.Т., Раганина Н.К. Оценка риска для здоровья населения, связанного с загрязнением атмосферного воздуха в районе хвостохранилища ЦОФ Солнечного ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № S15. – С. 318–323.
11. Коньшина Л.Г., Лежнин В.Л. Оценка качества питьевой воды и риска для здоровья населения // Гигиена и санитария. – 2014. – Т. 93, № 3. – С. 5–10.
12. Гигиеническая оценка качества питьевой воды и риски для здоровья населения Приморского края / П.Ф. Кику, Л.В. Кислицына, В.Д. Богданова, К.М. Сабирова // Гигиена и санитария. – 2019. – Т. 98, № 1. – С. 94–101. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-1-94-101
13. Царева С.А., Краснова В.П., Грязнова М.В. Роль оценки экспозиции химических контаминантов, загрязняющих пищевые продукты, в исследовании экологической безопасности // Экология человека. – 2013. – № 6. – С. 26–32.
14. Pesticide residues in Nepalese vegetables and potential health risks / G. Bhandari, P. Zomer, K. Atreya, H.G.J. Mol, X. Yang, V. Geissen // Environ. Res. – 2019. – Vol. 172. – P. 511–521. DOI: 10.1016/j.envres.2019.03.002
15. Assessment of Trace Elements Supply in Canned Tuna Fish Commercialized for Human Consumption in Brazil / N.V. de Lima, D. Granja Arakaki, E.S. de Padua Melo, D.J. Machate, V.A. do Nascimento // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2021. – Vol. 18, № 22. – P. 12002. DOI: 10.3390/ijerph182212002
16. Кукоев С.П., Никишина Т.Ф., Николаевич П.Н. О влиянии загрязнения атмосферного воздуха в городе Краснодаре на здоровье населения // Здоровье населения и среда обитания – 3НиСО. – 2017. – Т. 292, № 7. – С. 22–25.
17. Оценка влияния загрязнения атмосферного воздуха выбросами предприятия теплоэнергетики на здоровье населения Новокузнецка / Р.А. Голиков, В.В. Кислицына, Д.В. Суржиков, А.М. Олещенко, М.А. Мукашева // Медицина труда и промышленная экология. – 2019. – Т. 59, № 6. – С. 348–352. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-6-348-352
18. Плотникова И.А., Ковтун О.П., Анохина Л.А. Клинико-гематологические отклонения в состоянии здоровья детей, обусловленные воздействием свинца // Медицина труда и промышленная экология. – 2010. – № 2. – С. 29–35.
19. Копытенькова О.И., Леванчук А.В., Турсунов З.Ш. Оценка риска ущерба для здоровья при воздействии мелко-дисперсной пыли минеральной ваты // Казанский медицинский журнал. – 2014. – Т. 95, № 4. – С. 570–574.
20. Петров С.Б. Эколого-гигиеническая оценка заболеваемости населения района размещения медеплавильного производства // Вятский медицинский вестник. – 2006. – № 3–4. – С. 56–60.
21. Методические подходы к оценке риска воздействия разнородных факторов среды обитания на здоровье населения на основе эволюционных моделей / Н.В. Зайцева, П.В. Трусов, П.З. Шур, Д.А. Кирьянов, В.М. Чигвинцев, М.Ю. Цинкер // Анализ риска здоровью. – 2013. – № 1. – С. 15–23.
22. Кику П.Ф., Веремчук Л.В., Татаркина Н.Д. Структурная модель влияния факторов среды обитания на распространение болезней органов дыхания в Приморском крае // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2012. – № 43. – С. 107–111.
23. Эколого-гигиенический анализ влияния выбросов загрязняющих химических веществ промышленных предприятий г. Тихвина на здоровье населения / С.А. Горбанев, Ф.Ш. Саркисян, А.А. Девяткина, А.В. Редченко, А.С. Радилов, М.Ю. Комбарова // Профилактическая и клиническая медицина. – 2012. – Т. 43, № 2. – С. 68–71.
24. Среда обитания и заболеваемость населения Самары болезнями органов дыхания / О.В. Сазонова, О.Н. Исакова, И.Ф. Сухачева, М.В. Комарова // Гигиена и санитария. – 2014. – Т. 93, № 4. – С. 33–36.
25. Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения (обзор литературы) / Р.А. Голиков, Д.В. Суржиков, В.В. Кислицына, В.А. Штайгер // Научное обозрение. Медицинские науки. – 2017. – № 5. – С. 20–31.

*Параметризация зависимостей между факторами риска и здоровьем населения при хроническом воздействии комплексного загрязнения атмосферного воздуха / Д.А. Кирьянов, М.Р. Камалтдинов, М.Ю. Цинкер, С.В. Бабина, С.В. Клейн, А.М. Андришунас // Анализ риска здоровью. – 2022. – № 4. – С. 33–44. DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.03*

UDC 614.3  
DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.03.eng



Research article

## PARAMETERIZATION OF RELATIONSHIPS BETWEEN RISK FACTORS AND PUBLIC HEALTH UNDER CHRONIC EXPOSURE TO COMPLEX AMBIENT AIR POLLUTION

**D.A. Kiryanov<sup>1</sup>, M.R. Kamaltdinov<sup>1</sup>, M.Yu. Tsinker<sup>1</sup>, S.V. Babina<sup>1</sup>, S.V. Kleyn<sup>1,2</sup>, A.M. Andrishunas<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 82 Monastyrskaya Str., Perm, 614045, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm State Medical University named after Academician E.A. Wagner, 26 Petropavlovskaya Str., Perm, 614000, Russian Federation

*The relevance of the present study follows from the necessity to establish parameterized cause-effect relationships that describe additional disease cases among population caused by chronic exposure to chemical factors.*

*In this study, our aim was to explore relationships within the 'environment – public health' system to quantify and predict chronic risks under exposure to chemicals in ambient air.*

*To achieve this, we collected statistical data on some municipalities located in the Russian Federation with different structures and levels of chemical pollution in ambient air. Data on population incidence and ambient air quality were coordinated at places where calculation points were located; these points were centers of residential buildings and their coordinates were applied in the study. Mathematical modeling of the relationships was conducted by using multiple linear regressions. Pollution indicators (chemical concentrations in ambient air) that met the requirements of biological plausibility and statistical significance of pair correlations were selected as independent variables. The obtained regression models contain 190 factors for 36 chemicals occurring in emission into ambient air from stationary and mobile sources, which allow calculating the frequency of additional disease cases for 29 diseases. The established factors make it possible to perform operative estimations of a number of diseases associated with ambient air quality at a place of residence relying on medical aid applications.*

*The resulting relationships can be used to predict chronic health risks. Establishing criteria for ranking chemical health risks in zones influenced by hazardous chemical objects can become a next step in development of the suggested approaches.*

**Keywords:** chronic risk, ambient air pollution, chemicals, mathematical modeling, multiple regression, health risk assessment, incidence, additional cases.

### References

1. Zaytseva N.V., Popova A.Yu., May I.V., Shur P.Z. Methods and technologies of health risk analysis in the system of state management under assurance of the sanitation and epidemiological welfare of population. *Gigiena i sanitariya*, 2015, vol. 94, no. 2, pp. 93–98 (in Russian).
2. Gurvich V.B., Kuzmin S.V., Dikonskaya O.V., Gileva M.A., Boyarsky A.P. Methodical approaches, experience and perspectives of the implementation of the risk model of surveillance activities in the sphere of the assurance of sanitary and epidemiological welfare of population, population's health risk management and the consumer rights protection. *Gigiena i sanitariya*, 2015, vol. 94, no. 2, pp. 104–108 (in Russian).

© Kiryanov D.A., Kamaltdinov M.R., Tsinker M.Yu., Babina S.V., Kleyn S.V., Andrishunas A.M., 2022

**Dmitrii A. Kiryanov** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department for Mathematical Modeling of Systems and Processes (e-mail: kda@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>).

**Marat R. Kamaltdinov** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Situation Modeling and Expert and Analytical Management Techniques Laboratory (e-mail: kmr@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0969-9252>).

**Mikhail Yu. Tsinker** – Junior Researcher at the Situation Modeling and Expert and Analytical Management Techniques Laboratory (e-mail: cinker@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2639-5368>).

**Svetlana V. Babina** – Head of the Information and Computing Systems and Technologies Laboratory (e-mail: bsv@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9222-6805>).

**Svetlana V. Kleyn** – Professor of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department for Systemic Procedures of Sanitary-Hygienic Analysis and Monitoring (e-mail: kleyn@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2534-5713>).

**Alena M. Andrishunas** – Junior Researcher at the Department for Systemic Procedures of Sanitary-Hygienic Analysis and Monitoring (e-mail: ama@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0072-5787>).

3. Zaytseva N.V., Popova A.Yu., Onishchenko G.N., May I.V. Current problems of regulatory and scientific-medical support for the assurance of the sanitary and epidemiological welfare of population in the Russian Federation as the strategic government task. *Gigiena i sanitariya*, 2016, vol. 95, no. 1, pp. 5–9. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-1-5-9 (in Russian).

4. Onishchenko G.G., Kozovenko M.N. Ensuring the chemical and biological safety of the Russian Federation for the period up to 2025 and beyond COVID-19. *Infektsionnye bolezni: novosti, mneniya, obuchenie*, 2020, vol. 9, no. 3 (34), pp. 10–15. DOI: 10.33029/2305-3496-2020-9-3-10-15 (in Russian).

5. Anan'ev V.Yu., Zhigaev D.S., Kislitsyna L.V., Kiku P.F. Otsenka vliyaniya atmosfernogo vozdukha na zdorov'e naseleniya Vladivostoka i ee osobennosti [Assessment of the impact of ambient air on the health of the population of Vladivostok and its features]. *Zdorov'e. Meditsinskaya ekologiya. Nauka*, 2012, vol. 49–50, no. 3–4, pp. 79–82 (in Russian).

6. Berezhnaya E.V. Assessment of risk to human health in Voronezh exposure to chemical pollutants in the air. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 2 (in Russian).

7. Masnavieva L.B., Efimova N.V., Kudaeva I.V. Individual risks to adolescent health, caused by contaminating the air, and their relationship with the levels of specific autoantibodies. *Gigiena i sanitariya*, 2016, vol. 95, no. 8, pp. 738–742. DOI: 10.18821/0016-9900-2016-95-8-738-742 (in Russian).

8. Sheveleva T.E. Assessment and minimization of non-carcinogenic risk for health workers of rubber goods on chemicals exposure polluting of working spaces. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii (Elektronnyi zhurnal)*, 2016, no. 4, pp. 241–247. DOI: 10.12737/22054 (in Russian).

9. Grigoriev Yu.I., Lyapina N.V. The impact of air quality on the health of the child population. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 112–113 (in Russian).

10. Krupskaya L.T., Rastanina N.K. Otsenka riska dlya zdorov'ya naseleniya, svyazannogo s zagryazneniem atmosfernogo vozdukha v raione khvostokhranilishcha TsOF Solnechnogo GOKa [Assessment of the population health risk associated with ambient air pollution in the area of the COF Solnechnii GOK tailing dam]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2007, no. S15, pp. 318–323 (in Russian).

11. Konshina L.G., Lezhnin V.L. Assessment of the quality of drinking water in the industrial city and risk for public health. *Gigiena i sanitariya*, 2014, vol. 93, no. 3, pp. 5–10 (in Russian).

12. Kiku P.F., Kislitsyna L.V., Bogdanova V.D., Sabirova K.M. Hygienic evaluation of the quality of drinking water and risks for the health of the population of the Primorye territory. *Gigiena i sanitariya*, 2019, vol. 98, no. 1, pp. 94–101. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-1-94-101 (in Russian).

13. Tsareva S.A., Krasnova V.P., Gryaznova M.V. Role of estimation of exposure of chemical contaminants polluting foodstuffs in environmental safety research. *Ekologiya cheloveka*, 2013, no. 6, pp. 26–32 (in Russian).

14. Bhandari G., Zomer P., Atreya K., Mol H.G.J., Yang X., Geissen V. Pesticide residues in Nepalese vegetables and potential health risks. *Environ. Res.*, 2019, vol. 172, pp. 511–521. DOI: 10.1016/j.envres.2019.03.002

15. De Lima N.V., Granja Arakaki D., de Padua Melo E.S., Machate D.J., do Nascimento V.A. Assessment of Trace Elements Supply in Canned Tuna Fish Commercialized for Human Consumption in Brazil. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2021, vol. 18, no. 22, pp. 12002. DOI: 10.3390/ijerph182212002

16. Kukkoiev S.P., Nikishina T.F., Nikolaevich P.N. The effect of air pollution in the city of Krasnodar on health. *ZniSO*, 2017, vol. 292, no. 7, pp. 22–25 (in Russian).

17. Golikov R.A., Kislitsyna V.V., Surzhikov D.V., Oleshchenko A.M., Mukasheva M.A. Assessment of the impact of air pollution by heat power plant emissions on the health of the population of Novokuznetsk. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2019, vol. 59, no. 6, pp. 348–352. DOI: 10.31089/1026-9428-2019-59-6-348-352 (in Russian).

18. Plotnikova I.A., Kovtun O.P., Anokhina L.A. Clinical and hematologic abnormalities in children health, caused by exposure to lead. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, 2010, no. 2, pp. 29–35 (in Russian).

19. Kopytenkova O.I., Levanchuk A.V., Tursunov Z.Sh. Assessment of health damage due to exposure to mineral wool fine dusts. *Kazanskii meditsinskii zhurnal*, 2014, vol. 95, no. 4, pp. 570–574 (in Russian).

20. Petrov S.B. Ekologo-gigienicheskaya otsenka zabolevaemosti naseleniya raiona razmeshcheniya medeplavil'nogo proizvodstva [Ecological and hygienic assessment of the morbidity of the population of the area where the copper smelting production is located]. *Vyatskii meditsinskii vestnik*, 2006, no. 3–4, pp. 56–60 (in Russian).

21. Zaitseva N.V., Trusov P.V., Shur P.Z., Kiryanov D.A., Chigvintsev V.M., Tsinker M.Yu. Methodical approaches to health risk assessment of heterogeneous environmental factors based on evolutionary models. *Health Risk Analysis*, 2013, no. 1, pp. 15–23. DOI: 10.21668/health.risk/2013.1.02.eng

22. Kiku P.F., Veremchuk L.V., Tatarkina N.D. Structural model of habitat factors influence on the prevalence of respiratory diseases in Primorsky kraj. *Byulleten' fiziologii i patologii dykhaniya*, 2012, no. 43, pp. 107–111 (in Russian).

23. Gorbanev S.A., Sarkisyan F.S., Devyatkina A.A., Redchenko A.V., Radilov A.S., Kombarova M.Y. Ecological and hygienic analysis of the impact of pollutant chemicals of industrial enterprises in Tikhvin on health. *Profilakticheskaya i klinicheskaya meditsina*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 68–71 (in Russian).

24. Sazonova O.V., Isakova O.N., Sukhacheva I.F., Komarova M.V. Habitat and incidence of respiratory organs diseases in the Samara population. *Gigiena i sanitariya*, 2014, vol. 93, no. 4, pp. 33–36 (in Russian).

25. Golikov R.A., Surzhikov D.V., Kislitsyna V.V., Shtaiger V.A. Influence of environmental pollution to the health of the population (review of literature). *Nauchnoe obozrenie. Meditsinskie nauki*, 2017, no. 5, pp. 20–31 (in Russian).

Kiryanov D.A., Kamaltdinov M.R., Tsinker M.Yu., Babina S.V., Kleyn S.V., Andrishunas A.M. Parameterization of relationships between risk factors and public health under chronic exposure to complex ambient air pollution. *Health Risk Analysis*, 2022, no. 4, pp. 33–44. DOI: 10.21668/health.risk/2022.4.03.eng

Получена: 15.10.2022

Одобрена: 07.12.2022

Принята к публикации: 18.12.2022