

## Пространственный кластерно-приоритизационный анализ распределения комбинаций опасных для здоровья химических веществ в атмосферном воздухе регионов Российской Федерации

М.А. Землянова, Ю.В. Кольдибекова, Д.А. Кирьянов, В.М. Чигвинцев, Л.А. Ситчихина

ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Роспотребнадзора, ул. Монастырская, 82, г. Пермь, 614045, Российская Федерация

### Резюме

**Введение.** Территория РФ характеризуется значительным количеством промышленных предприятий, осуществляющих выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Изучение пространственного распределения их сочетаний является актуальным для выявления региональных особенностей и территорий высокого риска их распространения и воздействия на здоровье населения.

**Цель исследования:** пространственный кластерно-приоритизационный анализ распределения комбинаций опасных химических веществ в атмосферном воздухе регионов Российской Федерации.

**Материалы и методы.** Анализ включал кластеризацию субъектов по векторам, определяющим экономическое развитие региона и здоровье населения; установление оптимального количества кластеров и входящих субъектов методом «локтя» и *k*-средних. Оценка средней динамики нестандартных проб в атмосферном воздухе проведена по данным формы № 18 Росстата за 2014–2024 гг. со сбором и обработкой информации Роспотребнадзором. Критерии приоритизации веществ: 1–2-й класс опасности, направленность биологического действия, доля нестандартных проб.

**Результаты.** Выделено 5 кластеров, объединяющих от 2 до 32 регионов со схожими признаками. Масштабное распространение комбинаций веществ в атмосферном воздухе с неравномерными локальными зонами установлено по 59 субъектам, преимущественно третьего и пятого кластеров, с количеством проживающего населения до 66,3 % от общей численности в стране. Максимальное увеличение частоты регистрации нестандартных проб до 6,2 раза установлено по бенз(а)пирену, фтору, оксидам алюминия, меди и марганца в Свердловской, Кемеровской, Челябинской, Иркутской областях, Алтайском, Красноярском и Пермском краях.

**Заключение.** Выделены кластеры, включающие 59 регионов с высокой концентрацией численности населения, с локальными зонами распространения от 2 до 7 комбинаций опасных веществ и существенной долей их нестандартных проб (до 20,9 %). Приоритизировано 7 субъектов, требующих первоочередных мер регулирования для предупреждения и снижения негативных последствий здоровью подверженного населения.

**Ключевые слова:** регионы РФ, атмосферный воздух, нестандартные пробы, комбинации химических веществ, кластеризация, пространственно-динамический анализ.

**Для цитирования:** Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В., Кирьянов Д.А., Чигвинцев В.М., Ситчихина Л.А. Пространственный кластерно-приоритизационный анализ распределения комбинаций опасных для здоровья химических веществ в атмосферном воздухе регионов Российской Федерации // Здоровье населения и среда обитания. 2025. Т. 33. № 11. С. 63–71. doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-11-63-71

## Spatial Cluster Prioritization Analysis of the Distribution of Combinations of Hazardous Air Pollutants in the Regions of the Russian Federation

Marina A. Zemlyanova, Yulia V. Koldibekova, Dmitry A. Kiryanov, Vladimir M. Chigvintsev, Lyubov A. Sitchikhina

Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies,  
82 Monastyrskaya Street, Perm, 614045, Russian Federation

### Summary

**Introduction:** The territory of the Russian Federation is characterized by a significant number of industrial enterprises, all emitting hazardous air pollutants. The study of spatial distribution of their combinations is relevant for identifying regional characteristics and areas at risk of their spread and human exposure.

**Objective:** To conduct a spatial cluster prioritization analysis of the distribution of combinations of hazardous airborne chemicals in the regions of the Russian Federation.

**Materials and methods:** The analysis included clustering of the regions by vectors that determine economic development and health of the local population; establishing the optimal number of clusters and comprised regions using the elbow method and *k*-means. The dynamics of non-compliant ambient air samples was assessed based on data of Rosstat Reporting Form No. 18 for 2014–2024 collected and processed by the Russian Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing. Criteria for priority setting included hazard class 1 or 2 of the chemical, its mode of action, and the proportion of exceedances.

**Results:** We identified five clusters consisting of two to 32 regions having similar characteristics. Large-scale distribution of combinations of airborne chemicals with uneven local zones was established in 59 regions, mainly of the third and fifth clusters, inhabited by almost 66.3 % of the population of the country. The maximum (up to 6.2-fold) increase in the frequency of non-compliant air samples with threshold exceedances of benzo[a]pyrene, fluorine, and oxides of aluminum, copper, and manganese was established in the Sverdlovsk, Kemerovo, Chelyabinsk, and Irkutsk regions, Altai, Krasnoyarsk, and Perm territories.

**Conclusions:** We identified clusters comprising 59 densely populated regions with local zones of distribution of two to seven combinations of hazardous air pollutants and a significant proportion of exceedances reaching 20.9 %. Priority was given to seven regions requiring urgent regulatory measures to prevent and mitigate adverse health effects in the exposed population.

**Keywords:** regions of the Russian Federation, ambient air, exceedances, combinations of air pollutants, clustering, dynamic spatial analysis.

**Cite as:** Zemlyanova MA, Koldibekova YuV, Kiryanov DA, Chigvintsev VM, Sitchikhina LA. Spatial cluster prioritization analysis of the distribution of combinations of hazardous air pollutants in the regions of the Russian Federation. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2025;33(11):63–71. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2025-33-11-63-71

**Введение.** Территория Российской Федерации характеризуется значительным количеством (порядка 185 тыс.) и разнообразием по профилю деятельности потенциально опасных стационарных объектов, осуществляющих выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух (предприятия химической промышленности, черной и цветной металлургии и др.)<sup>1</sup> [1–4]. По данным Государственной статистической отчетности общий объем выбросов от технологических и других процессов в атмосферный воздух за 2024 год составил около 17 млн т<sup>2</sup>. Одновременное присутствие различных компонентов выбросов в атмосферном воздухе может образовывать смеси переменного состава, способные в силу своей токсичности, резорбтивного или рефлекторно-резорбтивного действия усиливать степень выраженности существующих негативных эффектов у подверженного населения или расширять спектр последствий со стороны здоровья [5–9].

Компонентный состав пыле-газовых выбросов от источников в атмосферный воздух городских и сельских поселений насчитывает порядка 2500 наименований веществ, характеризующихся различной химической структурой и степенью опасности для здоровья человека. Из них при совместном воздействии только для 51 смеси, включающей 91 вещество, установлен эффект суммации, который регламентируется действующими санитарными правилами и нормами<sup>3</sup>. При этом в настоящее время среди разнообразия химических веществ комбинированное воздействие для подавляющего большинства из них не учитывается, например, для таких чрезвычайно и высоко опасных (1–2-й класс опасности) для здоровья человека соединений, как диАлюминий триоксид, бенз(а)пирен, фтора, оксидов меди, никеля, марганца и хрома (VI).

Данные загрязнители входят в приоритетный перечень токсичных веществ в атмосферном воздухе (ATSDR)<sup>4</sup>, рекомендованный к изучению при их воздействии в составе смеси. Эти вещества при длительном ингаляционном поступлении обладают широким спектром однонаправленного повреждающего воздействия на организм, преимущественно на органы дыхания, нервную и сердечно-сосудистую системы. Окислы металлов способны проникать в различные отделы дыхательных путей, вызывая неблагоприятные последствия в виде усиления местных воспалительных и аллергических реакций, образования активных форм кислорода с последующим повреждением клеток эпителия, эндотелия и нейронов в результате свободнорадикальных процессов, приводящих к активации каспаз апоптоза [10, 11]. Окислы хрома (VI) и никеля, бенз(а)пирен оказывают повреждающее действие на

эпителиальные клетки, выстилающие дыхательные пути, подавляют активность альвеолярных макрофагов, тем самым нарушая барьерную функцию эпителия. Аллергические реакции, вызванные оксидами металлов, усиливают воспаление, что может вызывать нарушение функции легких [10–14]. Прямое цитотоксическое повреждающее действие на нейроны заключается в нарушении целостности мембран в результате дисбаланса внутриклеточной концентрации кальция, усиления высвобождения нейротрансмиттеров, стимуляции глутаматных рецепторов, активации воспалительных сигнальных путей [15, 16]. Помимо этого, бенз(а)пирен, фтор и его соединения, окислы алюминия, хрома (VI), никеля, меди, марганца способны повреждать эндотелий, индуцировать иммуновоспалительные реакции в сосудистой стенке. Это может привести к дисфункции сосудов [17–19].

В связи с этим актуальным является изучение пространственного распределения совместного присутствия химических веществ в атмосферном воздухе для выявления региональных особенностей и территорий с высоким риском распространения их опасных комбинаций, требующих мер первоочередного регулирования.

**Цель исследования** – пространственный кластерно-приоритизационный анализ распределения комбинаций опасных химических веществ в атмосферном воздухе регионов Российской Федерации.

**Материалы и методы.** Исходные данные для кластерного анализа представляли собой матрицу размерностью [85 x 4], содержащую показатели по 85 субъектам РФ. В качестве переменных применяли 4 показателя, характеризующих три исследуемых блока: 1) экономическое развитие региона – валовый региональный продукт на душу населения (тыс. руб.); 2) здоровье населения – заболеваемость населения от всех причин (сл./100 тыс.) и общий коэффициент смертности (сл./100 тыс.); 3) качество атмосферного воздуха – доля нестандартных проб по содержанию веществ в атмосферном воздухе субъектов РФ (%). Перед проведением кластерного анализа выполнена стандартизация (Z-score нормализация) показателей различной физической размерности. Оптимизация числа кластеров выполнена с помощью метода «локтя» с анализом внутрикластерной дисперсии (сумма квадратов внутрикластерных расстояний) [20]. Количество субъектов в каждом кластере определяли метрическим методом *k*-средних на основе итерационного процесса минимизации среднеквадратичного расстояния между показателями анализируемых признаков и центроидом кластера (медиана всех признаков для всех регионов, входящих в данный кластер), т. е. исходили из положения,

<sup>1</sup> Информация о выбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников (Форма статистической отчетности 2-ТП (воздух) за 2024 год. Раздел 3. Источники загрязнения атмосферы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/> (дата обращения: 02.09.2025).

<sup>2</sup> Информация о выбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников (Форма статистической отчетности 2-ТП (воздух) за 2024 год. Раздел 1. Всего выброшено в атмосферу загрязняющих веществ за отчетный год, тонн [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/air-protect/> (дата обращения: 17.04.2025).

<sup>3</sup> СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat\\_files/19/8/SP123685\\_21\\_0.pdf](https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf)

<sup>4</sup> Список приоритетных веществ, рекомендованный к созданию токсикологических профилей [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.atsdr.cdc.gov/programs/substance-priority-list.html#cdc\\_program\\_profile\\_overview-background](https://www.atsdr.cdc.gov/programs/substance-priority-list.html#cdc_program_profile_overview-background) (дата обращения: 16.04.2025).

https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-63-71  
Original Research Article

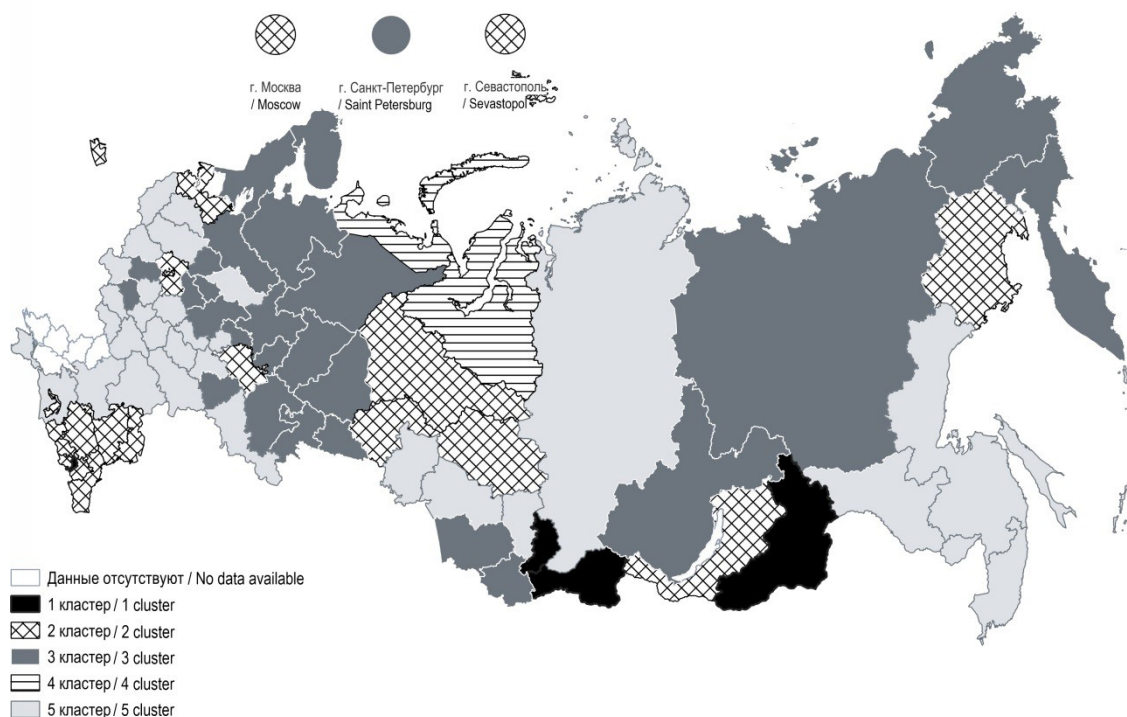
что чем меньше установленное расстояние, тем более «типичен» субъект для данного кластера [20]. Среднекластерные значения показателей сопоставляли со среднероссийским уровнем за 2024 год. Картографическое отображение кластерных пространственных паттернов, объединяющих субъекты РФ по схожим показателям комплексной оценки состояния региона, выполнено с помощью платформы QGIS 3.34.7 Prizen. Последующим этапом исследования для более детальной характеристики кластеров с выявлением приоритетных загрязнителей являлся описательный анализ среднесрочной динамики проб атмосферного воздуха с превышением предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ по форме № 18 (годовая) «Сведения о санитарном состоянии субъекта Российской Федерации» Росстата. Детализация за период 2014–2024 гг. проведена по взвешенным веществам, серы диоксиду, дигидросульфиду, углерода оксиду, сероуглероду, азота диоксиду, азота оксиду, аммиаку, гидроксibenзолу и его производным, формальдегиду, серной кислоте, бенз(а)пирену, фтору и его соединениям, хлору и его соединениям, углеводородам ароматическим (бензол, толуол, ксилол), углеводородам алифатическим предельным и непредельным, синтетическим жирным кислотам, тяжелым металлам (ртуть, свинец, кадмий, мышьяк, марганец), аминам (алифатические и ароматические), акрилату, малеиновому ангидриду, фталевому ангидриду, полихлорированным бифенилам; за 2019–2024 гг. – по ацетону, акролеину, бутанолу, пропанолу, этанолу, бутилацетату, этилацетату, этилбензолу, стиролу; за 2022–2024 гг. – по углероду, 1,2-дихлорэтану, 1-бутантиолу, оксидам

меди, никеля и хрома, диАлюминию триоксиду, ацетальдегиду, бензину, бута-1,3-диену, гидрохлориду, гидроцианиду, диВанадия пентоксиду (пыли), диЖелеза триоксиду, диметилдисульфиду, диметилсульфиду. Сбор и обработка первичных данных осуществлялась в системе Роспотребнадзора. Критериями приоритизации загрязнителей являлись: 1–2-й класс опасности, резорбтивная или рефлекторно-резорбтивная направленность биологического действия, доля нестандартных проб более 0,5 %. Пространственный анализ распределения нестандартных проб выполнен для 7 приоритетных веществ (бенз(а)пирена, диАлюминия триоксида, фтора и его соединений, оксидов меди, никеля, хрома (VI) и марганца). Применяли непараметрический критерий Колмогорова – Смирнова для проверки нормальности распределения; параметрический *t*-критерий Стьюдента при заданной значимости  $p \leq 0,05$  при сравнении двух независимых выборок; рассчитывали среднюю арифметическую (*M*) и ошибку средней (*m*). Описательную статистику осуществляли с помощью среды Statistica 10.

**Результаты исследования.** Типологизация 85 субъектов РФ на основе кластерного анализа позволила выделить 5 пространственных паттернов, объединяющих регионы (от 2 до 32) со схожими анализируемыми признаками (рисунок).

Анализ кластерного распределения позволил выделить первый и четвертый как резко отличающиеся от трех других (табл. 1).

Первый кластер (республики Хакасия, Тыва, Ингушетия, Забайкальский край с общим количеством населения 1,6 % от численности РФ) характеризуется высокой частотой регистрации



**Рисунок.** Картографическое отображение кластерных пространственных паттернов, объединяющих субъекты РФ по схожим показателям комплексной оценки состояния региона

**Figure.** Cartographic display of spatial cluster patterns uniting the Russian regions by similar indicators of a comprehensive assessment of their state

загрязнения атмосферного воздуха и низким уровнем общей заболеваемости и смертности относительно других кластеров и среднероссийских показателей. По данным федерального статистического наблюдения средняя доля нестандартных проб за 2024 год составила 8,5 %, что в 10,8 раза выше среднероссийского показателя. Общая заболеваемость населения в данном кластере отмечается на уровне 78 030 сл./100 тыс., смертность – на 979 сл./100 тыс., что на 12,1 и 24,5 % ниже соответствующих среднероссийских значений. Основными загрязнителями атмосферного воздуха в данном кластере являются преимущественно (до 60,0 % от общего числа нестандартных проб) вещества 3–4-го классов опасности (дигидросульфид, фенол, ароматические углеводороды, азота оксид и диоксид, взвешенные вещества и др.).

Четвертый кластер (Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа с общим количеством населения, составляющего 0,4 % от численности РФ) по данным Росстата, характеризуется самым высоким показателем ВРП на душу населения (в 11,6 раза выше среднероссийского уровня), наиболее высоким показателем общей заболеваемости (в 1,7 раза выше) и наиболее низкой смертностью населения (в 1,6 раза ниже). В данном кластере нестандартные пробы по загрязняющим веществам в атмосферном воздухе не зарегистрированы.

Второй, третий и пятый кластеры в целом представлены 79 субъектами РФ. Между собой эти кластеры в основном сопоставимы по показателям средней доли нестандартных проб атмосферного воздуха, ВРП на душу населения, общей заболеваемости и смертности. Так, во втором кластере, включающем 20 субъектов РФ с общей численностью населения 31,7 %, установлено, что основными загрязнителями атмосферного воздуха, по которым регистрируются нестандартные пробы, являются преимущественно вещества 3–4-го классов опасности. К ним относятся взвешенные вещества, тяжелые металлы, этиловый эфир уксусной кислоты, углерод (сажа), сульфид водорода, керосин, метантиол, аммиак, оксид азота (IV), углерода оксид, нефтепродукты и др., составляющие до 80,0 % от общего числа нестандартных проб. Доля проб нестандартных по содержанию бенз(а)пирена, бензола и акролеина

(вещества 1–2-го классов опасности) составила до 20,0 % от общего количества нестандартных проб. Данный кластер практически не имеет существенных различий анализируемых показателей со среднероссийскими значениями и показателями третьего и четвертого кластеров.

Третий и пятый кластеры резко отличаются от трех других (первого, второго и четвертого) наиболее высоким уровнем общей смертности населения, превышающим среднероссийские показатели на 10,1 и 17,5 % соответственно. Данные кластеры многочисленны и включают 27 и 32 субъекта соответственно с общей численностью населения 30,9 и 35,4 %. Нестандартные пробы, составляющие до 50,0 % от общего числа проб, представлены веществами 1–2-го классов опасности. Основными загрязнителями являются взвешенные вещества этилбензол, бенз(а)пирен, этаналь, диметилбензол, меди, никеля, алюминия, хрома, марганца оксиды, фтор и его соединения, неорганическая пыль с разным содержанием двуокси кремния (менее 20 %; 20–70 %) и др.

В целом описательный гигиенический анализ сложившейся ситуации в субъектах РФ за 2014–2024 гг., входящих во все пять кластеров, позволил выделить 55 загрязняющих веществ, поступающих в составе выбросов от стационарных и передвижных источников в атмосферный воздух, по которым регистрируются нестандартные пробы. Приоритизация загрязнителей по комплексу критериев, характеризующих степень опасности для здоровья населения, позволила выделить из 55 загрязняющих веществ 10, а именно: акролеин, бенз(а)пирен, фенол, диАлюминий триоксид, бензол, оксиды марганца, меди, никеля, хрома (VI), фтор и его соединения, относящихся к чрезвычайно и высокоопасным (1–2-й класс опасности) и обладающих резорбтивной и рефлекторно-резорбтивной направленностью биологического действия с долей нестандартных проб от 0,5 до 36,9 %. Их одновременное присутствие в атмосферном воздухе может образовывать опасные комбинации, представляющие регулярную угрозу здоровью человека.

Анализ компонентного состава 51 смеси загрязняющих веществ при совместном присутствии в атмосферном воздухе, представленной в действующих

**Таблица 1. Среднекластерные значения векторных показателей за 2024 год,  $M \pm m$**

**Table 1. Mean cluster values of vector indicators for 2024,  $M \pm m$**

Кластер / Cluster	Количество субъектов, входящих в кластер / Number of regions in the cluster	Доля проб атмосферного воздуха с превышением ПДК (в городских поселениях), % / Proportion of urban ambient air samples with pollutant concentrations above MACs, %	Валовый региональный продукт на душу населения, тыс. руб. / Gross regional product per capita, thousand rubles	Совокупность всех заболеваний населения, сл./100 тыс. / All diseases, cases per 100,000 population	Общий коэффициент смертности, сл./100 тыс. / All-cause mortality rate, deaths per 100,000 population
1	4	8,52 ± 0,83	421,41 ± 112,01	78 029,9 ± 23 141,7	978,8 ± 280,2
2	20	0,40 ± 0,15	907,11 ± 208,77	75 826,9 ± 6 153,1	1 049,8 ± 115,8
3	27	0,37 ± 0,10	911,03 ± 117,64	111 837,2 ± 6 165,8	1 427,1 ± 92,9
4	2	0,00 ± 0,00	11 119,92 ± 666,44	147 688,6 ± 43 722,1	813,2 ± 243,99
5	32	0,54 ± 0,16	701,87 ± 895,09	81 339,5 ± 3 231,6	1 522,8 ± 49,7
РФ / RF	85	0,79 ± 0,20	958,81 ± 185,04	88 748,5 ± 2 351,6	1 296,0 ± 34,8

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-63-71>  
Original Research Article

санитарных нормах и правилах, показал, что бенз(а)пирен, окиси алюминия и хрома (VI) как изученные вещества, обладающие эффектом суммации, в данном перечне отсутствуют. Сочетание оксидов марганца, меди и никеля, фтора и его неорганических соединений изучены лишь в некоторых комбинациях с другими менее опасными и токсичными веществами. Общее количество проживающего населения, где определяются и регистрируются нестандартные пробы перечисленных комбинаций веществ, составляет порядка 66,3 % от общей численности РФ.

Пространственный анализ распределения нестандартных проб бенз(а)пирена, диАлюминия триоксида, фтора и его соединений, оксидов меди, никеля, хрома (VI) и марганца (по данным федерального статистического наблюдения за 2020–2024 гг.) показал масштабность их регионального распространения. В атмосферном воздухе 75 субъектов РФ (88,0 % от общего количества) представлено от 1 до 7 веществ в различных сочетаниях. Наблюдается неравномерная диффузия этих веществ по территории страны, в большей степени сосредоточенная в атмосферном воздухе регионов Сибирского, Уральского, Приволжского и Центрального Федеральных округов, входящих преимущественно в состав третьего и пятого кластеров с высокой концентрацией населения. Присутствие одновременно от двух до семи веществ в различных сочетаниях представлено в атмосферном воздухе 65 субъектов РФ (76,0 % от общего количества). При этом максимальные сочетания (6–7 наименований одновременно) установлено в атмосферном воздухе 17 территорий (26,0 % от общего количества) с численностью населения 37,0 % от всего населения РФ. К ним относятся Алтайский, Красноярский, Пермский края,

Белгородская, Вологодская, Иркутская, Липецкая, Омская, Оренбургская, Пензенская, Свердловская, Тульская, Челябинская, области, г.г. Москва, Санкт-Петербург, республики Башкортостан, Татарстан. Распределение опасных сочетаний изучаемых веществ в атмосферном воздухе регионов РФ подтверждено результатами анализа среднемесячной динамики нестандартных проб (табл. 2).

В целом доля нестандартных проб по содержанию изучаемых веществ в атмосферном воздухе представленных регионов представлена на уровне от 0,10 до 20,9 % от общего количества проб. При этом одновременно нестандартные пробы по содержанию бенз(а)пирена, диАлюминия триоксида, фторсодержащих неорганических соединений, окислов марганца, меди, никеля и хрома (VI) регистрировали в Красноярском крае; по бенз(а)пирену, диАлюминию триоксиду, фторсодержащим неорганическим соединениям, окислам марганца, меди и никеля – в Свердловской области; по бенз(а)пирену, фтору и его соединениям, окислам марганца, меди и никеля – в Челябинской области; по бенз(а)пирену, фтору и его соединениям, окислам марганца, меди и хрома (VI) – в Иркутской области; по бенз(а)пирену, окислам марганца и никеля – в Липецкой области; по бенз(а)пирену, фтору и его соединениям, металлоксидным соединениям марганца и меди – в Пермском крае; по бенз(а)пирену, фтору и его соединениям – Алтайском крае, Кемеровской области. Вместе с тем в 35 регионах, включая Московскую, Ленинградскую, Белгородскую, Кировскую, Нижегородскую, Орловскую области, Республику Татарстан, Хабаровский край, Ханты-Мансийский автономный округ и др. (с численностью 34,3 %), регистрировали стабильное поступление

**Таблица 2. Средняя доля нестандартных проб (%) бенз(а)пирена, диАлюминия триоксида, фтора и его соединений, оксидов меди, никеля, хрома и марганца в атмосферном воздухе**

**Table 2. The average percentage of ambient air samples with threshold exceedances of benzo[a]pyrene, aluminum(III) oxide, fluorine and its compounds, copper, nickel, chromium and manganese oxides**

№	Субъект / Region	Кластер / Cluster	Бенз(а)-пирен* / Benzo[a]-pyrene*	ДиАлюминий триоксид** / Aluminum (III) oxide**	Фтор и его соединения* / Fluorine and its compounds*	Марганца оксид* / Manganese oxide*	Меди оксид** / Copper oxide**	Никеля оксид** / Nickel oxide**	Хрома (VI) оксид** / Chromium (VI) oxide**
1.	Красноярский край / Krasnoyarsk Krai	5	20,90 ± 4,27	3,61 ± 1,05	0,23 ± 0,06	1,28 ± 0,34	1,40 ± 0,30	0,22 ± 0,03	1,48 ± 0,44
2.	Пермский край / Perm Krai	3	5,00 ± 1,25	нпо / < LOQ	0,13 ± 0,02	0,34 ± 0,10	0,24 ± 0,07	нпо / < LOQ	нпо / < LOQ
3.	Свердловская область / Sverdlovsk Region	3	6,80 ± 2,01	0,27 ± 0,08	0,30 ± 0,06	0,26 ± 0,05	0,18 ± 0,003	0,25 ± 0,08	нпо / < LOQ
4.	Челябинская область / Chelyabinsk Region	3	13,23 ± 2,69	нпо / < LOQ	0,22 ± 0,04	0,95 ± 0,29	0,04 ± 0,01	0,10 ± 0,02	нпо / < LOQ
5.	Иркутская область / Irkutsk Region	3	2,96 ± 0,88	нпо / < LOQ	5,91 ± 1,63	0,23 ± 0,04	0,18 ± 0,05	нпо / < LOQ	0,10 ± 0,03
6.	Липецкая область / Lipetsk Region	5	0,92 ± 0,16	нпо / < LOQ	нпо / < LOQ	0,10 ± 0,02	–	0,20 ± 0,04	нпо / < LOQ
7.	Алтайский край / Altai Krai	3	20,0 ± 3,45	–	0,77 ± 0,13	нпо / < LOQ	нпо / < LOQ	нпо / < LOQ	нпо / < LOQ
8.	Кемеровская область / Kemerovo Region	5	14,01 ± 4,03	нпо / < LOQ	10,52 ± 2,16	нпо / < LOQ	–	–	нпо / < LOQ

**Примечание:** «нпо» – ниже предела количественного определения в атмосферном воздухе; «–» содержание вещества в атмосферном воздухе на данной территории не контролируется; «\*» – доля нестандартных проб за период 2014–2024 гг.; «\*\*» – доля нестандартных проб за период 2020–2024 гг.

**Notes:** < LOQ, below the limit of quantification; the dash means the absence of measurements; \*percentage of non-compliant samples in 2014–2024; \*\*percentage of non-compliant samples in 2020–2024.

в атмосферный воздух (в пределах 1 ПДК) компонентов изучаемых комбинаций, что свидетельствует об их потенциальной опасности для здоровья.

Анализируя десятилетнюю динамику нестандартных проб атмосферного воздуха (2014–2024 гг.) можно установить увеличение их доли по бенз(а)пирену в 2,3–3,6 раза, диАлюминию триоксиду в 6,2 раза, фтору и его соединениям в 1,9–2,2 раза, меди оксиду в 2,2 раза, марганца оксиду в 3,2–4,4 раза в Красноярском и Пермском краях, Кемеровской, Свердловской, Челябинской и Иркутской областях. Отмечается постоянная регистрация нестандартных проб (до 1,0 %) по содержанию оксидов никеля в Красноярском крае.

**Обсуждение.** Представленные результаты исследований показывают масштабное распространение одновременных комбинаций диАлюминия триоксида, фтора и его соединений, бенз(а)пирена, оксидов меди, никеля, хрома и марганца в атмосферном воздухе с неравномерными локальными зонами по 59 субъектам, входящим, преимущественно в третий и пятый кластеры с численностью населения до 66,3 % от общей численности населения РФ. Пространственно-динамический анализ распределения по регионам изучаемых веществ в различных по качественному и количественному составу химических комбинаций, не регламентируемых в рамках действующего санитарного законодательства, но отличающихся особой опасностью для здоровья населения, позволил выделить 29 территорий с наиболее высокой частотой регистрации нарушений гигиенических нормативов содержания изучаемых веществ в атмосферном воздухе. К ним относятся Алтайский, Красноярский, Пермский края, Белгородская, Вологодская, Иркутская, Липецкая, Омская, Оренбургская, Пензенская, Свердловская, Тульская, Челябинская, области, г.г. Москва, Санкт-Петербург, республики Башкортостан, Татарстан и др.

Источниками поступления бенз(а)пирена, соединений алюминия и фтора в составе пыле-газовых выбросов в атмосферный воздух, в первую очередь, являются предприятия цветной металлургии алюминиевой отрасли горно-металлургической промышленности в регионах присутствия (Кемеровская, Иркутская, Свердловская, Волгоградская, Ленинградская, Мурманская области, Красноярский и Пермский края и др.) [21–24]. Этапы добычи, приема и хранения сырья, электролиза и переработки алюминия сопровождаются формированием и поступлением в атмосферный воздух в составе выбросов помимо общераспространенных, специфических соединений – оксидов алюминия, твердых фторидов, фтористого водорода, бенз(а)пирена [24].

Источниками поступления оксидов меди, никеля, хрома и марганца в различных сочетаниях являются предприятия цветной металлургии, в основном медной и медно-никелевой горнодобывающих отраслей промышленности (Красноярский край, Свердловская, Челябинская, Мурманская области и др.), черной металлургии, горнообогатительной промышленности, в том числе железной, хромовой и марганцевой руд (Белгородская, Оренбургская, Липецкая, Челябинская, Свердловская, Кемеровская,

Новосибирская области и др.) [25–27]. В процессе добычи, обогащения, легирования и переработки руд, на этапах приемки, хранения, обработки, транспортировки сырья основными компонентами выбросов в атмосферный воздух среди других веществ окислы и сульфат меди, хлорид меди (в пересчете на медь), окислы никеля, марганца, хрома и алюминия, входящие в состав кремний-содержащей пыли, сульфаты магния и др. Кроме этого, функционирование указанных предприятий в части выработки, отпуска и передачи электрической и тепловой энергии обеспечивают ТЭЦ, являющиеся дополнительными источниками выбросов в атмосферный воздух соединений хрома (VI) и марганца [28–30].

Систематизация данных и выявление закономерностей распределения комбинаций опасных для здоровья химических веществ в атмосферном воздухе регионов Российской Федерации, выполненные на основе применения кластерно-приоритизационного подхода, имеет ряд ограничений. Они заключаются в чувствительности метода к выбору анализируемых признаков, начальным характеристикам центров кластеров и субъективности интерпретации результатов, зависящих от экспертных знаний в предметной области. Кроме того, системный мониторинг загрязнения атмосферного воздуха комбинациями опасных химических веществ в ряде субъектов РФ ограничен определенным перечнем веществ и периодом статистического наблюдения. Это может создавать фрагментарность данных на некоторых территориях и сложности в оценке рисков здоровью населения.

**Заключение.** Полученные результаты пространственного анализа распределения комбинаций химических веществ в атмосферном воздухе субъектов РФ позволили выделить два кластера, включающих наибольшее количество регионов (суммарно 59) с населением до 66,0 % от общей численности в стране, с локальными зонами распространения от двух до семи опасных сочетаний веществ (на примере оксидов меди, никеля, хрома, марганца, алюминия, фторсодержащих неорганических соединений и бенз(а)пирена) и существенной долей их нестандартных проб (до 20,9 %). В этих кластерах приоритизированы 7 территорий – Красноярский, Пермский, Алтайский края, Свердловская, Челябинская, Иркутская, Кемеровская области, требующих первоочередных мер регулирования, направленных на предупреждение и снижение негативных последствий со стороны здоровья подверженного населения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марчук Н.А., Куленцан А.Л. Динамика выбросов загрязняющих атмосферу веществ стационарными и передвижными источниками // Modern Science. 2021. № 12-2. С. 373-376. EDN ZEYCMS.
2. Клепиков О.В. Епринцев С.А., Шекоян С.В. Анализ данных социально-гигиенического мониторинга регионов России, определяющих эколого-гигиеническую безопасность населения // Санитарный врач. 2020. № 1. С. 60-66. doi: 10.33920/med-08-2001-08. EDN GCUFZF.
3. Скворонская С.А., Мешков Н.А., Вальцева Е.А., Иванова С.В. Приоритетные факторы риска для

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-63-71>

Original Research Article

- здоровья населения крупных промышленных городов // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 4. С. 459-467. doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-4-459-467
4. Климов П.В., Андреева Е.С. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха и аэрогенного риска здоровью населения города Новочеркасска // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. Т. 8. № 3. С. 49-56. doi: 10.23947/2541-9129-2024-8-3-49-56
  5. Carlin D.J., Rider C.V. Combined Exposures and Mixtures Research: An Enduring NIEHS Priority. *Environmental Health Perspectives*. 2024. Vol.132 (7). P. 07501-1 – 0751-11. doi: 10.1289/EHP14340705
  6. Golmohammadi R, Darvishi E. The combined effects of occupational exposure to noise and other risk factors – A systematic review. *Noise Health*. 2019;21(101):125-141. doi: 10.4103/nah.NAH\_4\_18
  7. Шевляков В.В., Сычик С.И. Особенности комбинированного действия смеси химических аллергенов // Анализ риска здоровью. 2019. № 2. С. 130-137. doi: 10.21668/health.risk/2019.2.15
  8. Онищенко Г.Г., Зайцева Н.В., Май И.В. и др. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография : в 2 т.; под общ. ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. 2-е изд., перераб. и доп. М.; Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2024. Т. 2. С. 770-772.
  9. Mustafa E, Valente MJ, Vinggaard AM. Complex chemical mixtures: Approaches for assessing adverse human health effects. *Curr Opin Toxicol*. 2023;34:100404. doi: 10.1016/j.cotox.2023.100404
  10. Socianu S, Bopp SK, Govarts E, et al. Chemical mixtures in the EU population: composition and potential risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(10):6121. doi: 10.3390/ijerph19106121
  11. Шалина Т.И. Гигиеническая оценка риска здоровью населения в зоне влияния производств алюминия // Сибирский медицинский журнал. 2009. Т. 91. № 8. С. 128-129.
  12. Szűcs-Somlyó É., Lehel J., Májlinger K., Lőrincz M., Kővágó C. Metal-oxide inhalation induced fever - Immunotoxicological aspects of welding fumes // *Food Chem Toxicol*. 2023; 175:113722. doi: 10.1016/j.fct.2023.113722
  13. Kővágó C, Szekeres B, Szűcs-Somlyó É, Májlinger K, Jertzsele Á, Lehel J. Preliminary study to investigate the distribution and effects of certain metals after inhalation of welding fumes in mice. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(32):49147-49160. doi: 10.1007/s11356-022-19234-7
  14. Venter C, Oberholzer HM, Bester J, van Rooy MJ, Bester MJ. Ultrastructural, confocal and viscoelastic characteristics of whole blood and plasma after exposure to cadmium and chromium alone and in combination: An ex vivo study. *Cell Physiol Biochem*. 2017;43(3):1288-1300. doi: 10.1159/000481841
  15. Shinoda Y, Sadakata T, Yagishita K, et al. Aspects of excitatory/inhibitory synapses in multiple brain regions are correlated with levels of brain-derived neurotrophic factor/neurotrophin-3. *Biochem Biophys Res Commun*. 2019;509(2):429-434. doi: 10.1016/j.bbrc.2018.12.100
  16. Fuedner C, Kohlschmidt J, Riemschneider S, et al. Benzo(a)pyrene attenuates the pattern-recognition-receptor induced proinflammatory phenotype of murine macrophages by inducing IL-10 expression in an aryl hydrocarbon receptor-dependent manner. *Toxicology*. 2018;409:80-90. doi: 10.1016/j.tox.2018.07.011
  17. Fu C, Li Y, Xi H, et al. Benzo(a)pyrene and cardiovascular diseases: An overview of pre-clinical studies focused on the underlying molecular mechanism // *Front Nutr*. 2022. no. 4(9). P. 978475. doi: 10.3389/fnut.2022.978475
  18. Исмагулозода С.И., Мурадов А.М., Мурадов А.А. Состояние липидного обмена, перекисного окисления липидов, антиоксидантной защиты и эндотелиальной дисфункции при рефрактерной дислипидемии // Вестник Академии медицинских наук Таджикистана. 2020. Т. 10. № 4. С. 349-356. doi: 10.31712/2221-7355-2020-10-4-349-356
  19. Ядыкина Т.К., Коротенко О.Ю., Панев Н.И., Семенова Е.А., Жукова А.Г., Михайлова Н.Н. Клинико-экспериментальные исследования сердечно-сосудистых нарушений в условиях фтористой интоксикации организма // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т. 60. № 6. С. 375-380. doi: 10.31089/1026-9428-2020-60-6-375-380
  20. Shi C, Wei B, Wei S, Wang W, Liu H, Liu J. A quantitative discriminant method of elbow point for the optimal number of clusters in clustering algorithm. *J Wireless Com Network*. 2021;31(2021). doi: 10.1186/s13638-021-01910-w
  21. Окснер Е.П., Мурашева Е.В. Исследование рынка алюминия: ключевые тенденции, факторы и перспективы // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». 2024. № 15(4). С. 177-185.
  22. Кислицина В.В., Суржиков Д.В., Голиков Р.А., Ликонцева Ю.С. Неканцерогенный риск для здоровья населения промышленного города от влияния атмосферных выбросов алюминиевого завода // Медицина в Кузбассе. 2024. Т. 23. № 3. С. 32-38. doi: 10.24412/2687-0053-2024-3-32-38
  23. Постева М.А., Слуковский З.И. Анализ атмосферных выбросов в г. Мурманске и их связь с загрязнением городских озер // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 2. С. 190-201. doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-190-201
  24. Мещурова Т.А. Оценка загрязнения атмосферного воздуха в городах Пермского края // Вестник НВГУ. 2020. № 1. С. 110-119. doi: 10.36906/2311-4444/20-1/17
  25. Долгушина Н.А., Кувшинова И.А. Оценка загрязнения атмосферного воздуха промышленных городов Челябинской области и неканцерогенных рисков здоровью населения // Экология человека. 2019. № 6. С. 17-22. doi: 10.33396/1728-0869-2019-6-17-22
  26. Канамбуе Л.С., Толстых Н.Д., Кривошук Н.А., Таловина И.В. Особенности морфологии и состава минералов благородных металлов во вмещающих и массивных рудах центральной части Октябрьского месторождения, Норильский район // Proceedings of Higher Educational Establishments: Geology and Exploration. 2024. № 66(1). С. 88-98. doi: 10.32454/0016-7762-2024-66-1-88-98
  27. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Aburova V., Prokhorova E. Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation. *Minerals*. 2023;13(1):84. doi: 10.3390/min13010084
  28. Вира Д.Ю. Перспективы развития рынков медной промышленности России в новых условиях // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2024. № 3-3. С. 344-354.
  29. Шайхлисламова Э.Р., Каримова Л.К., Волгарева А.Д., Мулдашева Н.А. Медицина труда работников подземных профессий производства добычи полиметаллических медно-цинковых руд // Санитарный врач. 2020. № 5. С. 9-22.
  30. Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 2 // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2021. № 64(8). С. 561-571. doi: 10.17073/0368-0797-2021-8-561-571

## REFERENCES

1. Marchuk NA, Kulentsan AL. [Dynamics of emissions of pollutants by stationary and mobile sources.] *Modern Science*. 2021;(12-2):373-376. (In Russ.)
2. Klepikov OV, Eprintsev SA, Shekoyan SV. Data analysis of social hygiene monitoring in Russian regions determining environmental and hygienic safety for population. *Sanitarnyy Vrach*. 2020;(1):60-66. (In Russ.) doi: 10.33920/med-08-2001-08
3. Skovronskaya SA, Meshkov NA, Valtseva EA, Ivanova SV. Priority risk factors for population health in large industrial cities. *Gigiena i Sanitariya*. 2022;101(4):459-467. (In Russ.) doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-4-459-467
4. Klimov PV, Andreeva ES. Assessment of the level of air pollution and aerogenic risk to the health of the people of Novocherkassk. *Bezopasnost' Tekhnogennykh i Prirodnykh Sistem*. 2024;8(3):49-56. (In Russ.) doi: 10.23947/2541-9129-2024-8-3-49-56
5. Carlin DJ, Rider CV. Combined Exposures and Mixtures Research: An Enduring NIEHS Priority. *Environmental Health Perspectives*. 2024;132(7): 07501. doi: 10.1289/EHP14340705
6. Golmohammadi R, Darvishi E. The combined effects of occupational exposure to noise and other risk factors – A systematic review. *Noise Health*. 2019;21(101):125-141. doi: 10.4103/nah.NAH\_4\_18
7. Shevlaykov VV, Sychyk SI. Peculiarities related to combined effects produced by chemical allergens mixture. *Health Risk Analysis*. 2019;(2):130-137. doi: 10.21668/health.risk/2019.2.15.eng
8. Onishchenko GG, Zaitseva NV, Mai IV, et al. Health risk analysis in the strategy of state socio-economic development [Analiz riska zdorov'yu v strategii gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya: monografiya]: v 2 t.; pod obshch. red. G.G. Onishchenko, N.V. Zaitsevoi. 2-e izd., pererab. i dop. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta, 2024. T. 2. P. 770-772. (In Russ.)
9. Mustafa E, Valente MJ, Vinggaard AM. Complex chemical mixtures: Approaches for assessing adverse human health effects. *Curr Opin Toxicol*. 2023;34:100404. doi: 10.1016/j.cotox.2023.100404
10. Socianu S, Bopp SK, Govarts E, et al. Chemical mixtures in the EU population: composition and potential risks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(10):6121. doi: 10.3390/ijerph19106121
11. Shalina TI. The hygienic estimate of the risk for human health among the population in the areas connecting with aluminium production. *Sibirskiy Meditsinskiy Zhurnal (Irkutsk)*. 2009;91(8):128-129. (In Russ.)
12. Szűcs-Somlyó É, Lehel J, Májlínger K, Lőrincz M, Kővágó C. Metal-oxide inhalation induced fever - Immunotoxicological aspects of welding fumes. *Food and Chemical Toxicology*. 2023;175:113722. doi: 10.1016/j.fct.2023.113722
13. Kővágó C, Szekeres B, Szűcs-Somlyó É, Májlínger K, Jerzsele Á, Lehel J. Preliminary study to investigate the distribution and effects of certain metals after inhalation of welding fumes in mice. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022;29(32):49147-49160. doi: 10.1007/s11356-022-19234-7
14. Venter C, Oberholzer HM, Bester J, van Rooy MJ, Bester MJ. Ultrastructural, confocal and viscoelastic characteristics of whole blood and plasma after exposure to cadmium and chromium alone and in combination: An ex vivo study. *Cell Physiol Biochem*. 2017;43(3):1288-1300. doi: 10.1159/000481841
15. Shinoda Y, Sadakata T, Yagishita K, et al. Aspects of excitatory/inhibitory synapses in multiple brain regions are correlated with levels of brain-derived neurotrophic factor/neurotrophin-3. *Biochem Biophys Res Commun*. 2019;509(2):429-434. doi: 10.1016/j.bbrc.2018.12.100
16. Fuedner C, Kohlschmidt J, Riemschneider S, et al. Benzo(a)pyrene attenuates the pattern-recognition-receptor induced proinflammatory phenotype of murine macrophages by inducing IL-10 expression in an aryl hydrocarbon receptor-dependent manner. *Toxicology*. 2018;409:80-90. doi: 10.1016/j.tox.2018.07.011
17. Fu C, Li Y, Xi H, et al. Benzo(a)pyrene and cardiovascular diseases: An overview of pre-clinical studies focused on the underlying molecular mechanism. *Frontiers in Nutrition*. 2022;4(9):978475. doi: 10.3389/fnut.2022.978475
18. Ismatulozoda SI, Muratov AM, Muradov AA. The state of lipid metabolism, lipid peroxidation, antioxidant protection and endothelial dysfunction in refractory dyslipidemia. *Vestnik Akademii Meditsinskih Nauk Tadzhikistana*. 2020;10(4):349-356. (In Russ.) doi: 10.31712/2221-7355-2020-10-4-349-356
19. Yadykina TK, Korotenko OYu, Panev NI, Semenova EA, Zhukova AG, Mikhailova NN. Clinical and experimental studies of cardiovascular disorders in the conditions of fluoride intoxication of the body. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya*. 2020;60(6):375-380. (In Russ.) doi: 10.31089/1026-9428-2020-60-6-375-380
20. Shi C, Wei B, Wei S, Wang W, Liu H, Liu J. A quantitative discriminant method of elbow point for the optimal number of clusters in clustering algorithm. *J Wireless Com Network*. 2021;31(2021). doi: 10.1186/s13638-021-01910-w
21. Oksner EP, Murashova EV [Aluminum market research: key trends, factors and prospects.] *Jelektronnoe nauchnoe izdanie «Uchenye zametki TOGU»*. 2024;15(4):177-185. (In Russ.)
22. Kislitsyna VV, Surzhikov DV, Golikov RA, Likontseva YuS. Non-carcinogenic risk to the health of the population of an industrial city from the influence of atmospheric emissions from an aluminum plant. *Meditsina v Kuzbasse*. 2024;23(3):32-38. (In Russ.) doi: 10.24412/2687-0053-2024-3-32-38
23. Postevaya MA, Slukovskii ZI. Analysis of atmospheric emissions in Murmansk and their relationship with pollution of urban lakes. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2021;24(2):190-201. (In Russ.) doi: 10.21443/1560-9278-2021-24-2-190-201
24. Meshchurova TA. Assessment of air pollution in the cities of Perm region. *Vestnik Nizhnevartovskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2020;(1):110-119. (In Russ.) doi: 10.36906/2311-4444/20-1/17
25. Dolgushina NA, Kuvshinova IA. Air pollution and non-cancerogenic risk assessment in industrial cities of Chelyabinsk region. *Ekologiya Cheloveka (Human Ecology)*. 2019;(6):17-22. (In Russ.) doi: 10.33396/1728-0869-2019-6-17-22
26. Canhimbue LS, Tolstykh ND, Krivolutsкая NA, Talovina I.V. Morphological features and composition of noble metal minerals in disseminated and massive ores of the central part of the Oktyabrskoe deposit, Norilsk region. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(1):88-98. (In Russ.) doi: 10.32454/0016-7762-2024-66-1-88-98
27. Aleksandrova T, Nikolaeva N, Afanasova A, Romashev A, Aburova V, Prokhorova E. Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at

<https://doi.org/10.35627/2219-5238/2025-33-11-63-71>  
Original Research Article

- Succeeding Stages of Raw Material Transformation. *Minerals*. 2023;13(1):84. doi: 10.3390/min13010084
28. Vira DYu. [Prospects for the development of Russian copper industry markets in new conditions.] *Vestnik Altayskoy akademii ekonomiki i prava*. 2024;(3-3):344-354. (In Russ.)
29. Shajhislamova JR, Karimova LK, Volgareva AD, Muldasheva NA. Labor medicine of employees of under-

- groundprofessions of production of polymetallic copper-zinc ores. *Sanitarnyj vrach*. 2020;5:9-22 (In Russ.)
30. Glushakova OV, Chernikova OP. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(8):561-571. (In Russ.) doi: 10.17073/0368-0797-2021-8-561-571

#### Сведения об авторах:

✉ **Землянова** Марина Александровна – д.м.н., профессор, главный научный сотрудник, заведующая отделом биохимических и цитогенетических методов диагностики; e-mail: zem@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8013-9613>.

**Кольдибекова** Юлия Вячеславовна – к.б.н., старший научный сотрудник, заведующая лабораторией исследования метаболизма и фармакокинетики отдела биохимических и цитогенетических методов диагностики; e-mail: koldibekova@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-4526>.

**Кирьянов** Дмитрий Александрович – к.т.н., заведующий отделом математического моделирования систем и процессов; e-mail: kda@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>.

**Чигвинцев** Владимир Михайлович – к.т.н., научный сотрудник лаборатории ситуационного моделирования и экспертно-аналитических методов управления отдела математического моделирования систем и процессов; e-mail: cvm@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-3895>

**Ситчихина** Любовь Александровна – младший научный сотрудник лаборатории информационно-вычислительных систем и технологий; e-mail: sla@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2565-891X>.

**Информация о вкладе авторов:** концепция и дизайн исследования: *Землянова М.А., Кирьянов Д.А.*; редактирование: *Землянова М.А.*; сбор данных и обработка материала: *Чигвинцев В.М., Ситчихина Л.А.*; обзор литературы, анализ и интерпретация результатов: *Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В.*; подготовка проекта рукописи: *Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В.*; окончательное утверждение публикуемой версии рукописи: *Землянова М.А.* Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Соблюдение этических стандартов:** данное исследование не требует представления заключения комитета по био-медицинской этике или иных документов.

**Финансирование:** исследование проведено без спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов:** авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 19.06.25 / Принята к публикации: 06.11.25 / Опубликована: 28.11.25

#### Author information:

✉ Marina A. **Zemlyanova**, Dr. Sci. (Med.), Prof., Chief Researcher, Head of the Department of Biochemical and Cytogenetic Diagnostic Methods; e-mail: zem@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8013-9613>.

Yulia V. **Koldibekova**, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Head of the Metabolism and Pharmacokinetics Research Laboratory, Department of Biochemical and Cytogenetic Diagnostic Methods; e-mail: koldibekova@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-4526>.

Dmitry A. **Kiryanov**, Cand. Sci. (Tech.), Head of the Department of Mathematical Modeling of Systems and Processes; e-mail: kda@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5406-4961>.

Vladimir M. **Chigvintsev**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Laboratory of Situational Modeling and Expert-Analytical Methods of Management, Department of Mathematical Modeling of Systems and Processes; e-mail: cvm@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0345-3895>.

Lyubov A. **Sitchikhina**, Junior Researcher, Information and Computing Systems and Technologies Laboratory; e-mail: sla@fcrisk.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2565-891X>.

**Author contributions:** study conception and design: *Zemlyanova M.A., Kiryanov D.A.*; data collection and processing: *Chigvintsev V.M., Sitchikhina L.A.*; analysis and interpretation of results, bibliography compilation and referencing, draft manuscript preparation: *Zemlyanova M.A., Koldibekova Yu.V.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

**Compliance with ethical standards:** Not applicable.

**Funding:** This research received no external funding.

**Conflict of interest:** The authors have no conflicts of interest to declare.

Received: June 19, 2025 / Accepted: November 6, 2025 / Published: November 28, 2025