



КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МИТИГАЦИИ ВРЕДА ЗДОРОВЬЮ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ ВОЗДУХООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Н.В. Зайцева¹, М.А. Землянова^{1,2}, И.В. Май¹, В.Б. Алексеев¹,
П.В. Трусов², Е.В. Хрущева¹, А.А. Савочкина²

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

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Размещение промышленных объектов со значительными массами выбросов пылегазовых смесей в границах или вблизи поселений нередко приводит к ухудшению качества среды обитания и причинению вреда здоровью населения. Ситуация типична для многих городов страны, прежде всего для тех, которые включены в федеральный проект «Чистый воздух» национального проекта «Экология». Негативное воздействие оказывает комплекс (совокупность) различных веществ, выбрасываемых разнопрофильными источниками. При этом в зоне экспозиции нередко оказывается большое количество населения и регистрируются множественные и разнообразные ответы со стороны здоровья граждан. Анализ долевых вкладов источников и каждого вещества в формирование совокупных негативных эффектов со стороны здоровья человека является принципиально важным этапом в оценке причиненного вреда для разработки плана мероприятий по митигации вредного воздействия.

В связи с этим в качестве адекватной методологической основы оценки эффективности митигации рисков и вреда при планировании и внедрении воздухоохраных мероприятий был предложен подход, основанный на теории нечетких множеств. Использование данной методологии позволяет оценивать условия многокомпонентных негативных воздействий, обуславливающих множественные негативные эффекты, в том числе в виде причиненного вреда здоровью. При этом ключевые показатели оцениваются не точечными, а интервальными значениями, характеризующимися функцией принадлежности к диапазону шкалированных параметров. Предложены методические подходы к оценке эффективности митигации рисков и вреда здоровью населения при планировании и внедрении воздухоохраных мероприятий на основе метода нечетких множеств. Исходной информацией для нечеткого моделирования соотношения множеств параметров в системе «вред здоровью – эффективность митигации» являются результаты гигиенических (натурных или расчетных исследований качества атмосферного воздуха в селитебной зоне под экспозицией и вне ее) и эпидемиологических (контролируемых медико-биологических) исследований. Принципы построения исследований учитывают ключевые положения оценки экспозиции, зависимости «доза – эффект» для воздействующего вещества, понятия приемлемости риска воздействия, особенности реакций организма человека в условиях комбинированных аэрогенных нагрузок, планы воздухоохраных мероприятий (в том числе комплексных).

Сопоставление перечня веществ, фактически участвующих в причинении вреда здоровью экспонированного населения, с перечнем веществ, включенных в планы по снижению валовых выбросов, позволяет оценить адекватность, а определение степени митигации вреда здоровью – достаточность и эффективность воздухоохраных мероприятий.

Ключевые слова: вред здоровью, экспонированное население, загрязнение атмосферного воздуха, митигация, негативные эффекты, теория нечетких множеств, воздухоохраные мероприятия, адекватность, достаточность, эффективность.

© Зайцева Н.В., Землянова М.А., Май И.В., Алексеев В.Б., Трусов П.В., Хрущева Е.В., Савочкина А.А., 2020

Зайцева Нина Владимировна – академик РАН, доктор медицинских наук, профессор; научный руководитель (e-mail: znv@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-34; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4315-5307>).

Землянова Марина Александровна – доктор медицинских наук, главный научный сотрудник с исполнением обязанностей заведующего отделом биохимических и цитогенетических методов диагностики (e-mail: zem@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 236-39-30; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8013-9613>).

Май Ирина Владиславовна – доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по научной работе (e-mail: may@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8997-5493>).

Алексеев Вадим Борисович – доктор медицинских наук, директор (e-mail: alekseev@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 236-32-70; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8997-5493>).

Трусов Петр Валентинович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования систем и процессов (e-mail: tpv@matmod.pstu.ac.ru; тел.: 8 (342) 239-16-07; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8997-5493>).

Хрущева Екатерина Вячеславовна – старший научный сотрудник с выполнением обязанностей заведующего лабораторией методов и технологий управления рисками (e-mail: zem@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 238-33-37; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2107-8993>).

Савочкина Анна Александровна – старший преподаватель кафедры высшей математики (e-mail: aidas_76@mail.ru; тел.: 8 (342) 239-16-97; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-6632>).

Актуализация проблем сохранения демографического потенциала страны как основы структурной модернизации экономики¹ в условиях негативных воздействий на атмосферный воздух выдвигает задачи повышения точности оценок фактического вреда здоровью населения, причиненного вследствие нарушения обязательных требований санитарного законодательства².

Размещение промышленных объектов со значительными массами выбросов пылегазовых смесей в границах или вблизи поселений нередко приводит к ухудшению качества среды обитания и причинению вреда здоровью населения. Ситуация типична для многих городов страны, прежде всего для тех, которые включены в федеральный проект «Чистый воздух» национального проекта «Экология».

Целым рядом исследований показано, что частую негативное воздействие оказывает комплекс (совокупность) веществ, выбрасываемых разнопрофильными и отличающимися по мощности источниками. При этом в зоне экспозиции нередко оказывается большое количество населения и регистрируются множественные и разнообразные ответы со стороны здоровья граждан [1–6]. В таких условиях оценка долевых вкладов источников и каждого вещества с учетом степени его опасности в формировании совокупных негативных эффектов со стороны здоровья человека является принципиально важным этапом в оценке потенциального риска и причиненного вреда для обоснования эффективных воздухоохраняющих мероприятий по их митигации [7, 8].

Представляется целесообразным при оценке фактически причиненного вреда здоровью населения выполнять предварительное категорирование видов деятельности юридических лиц / индивидуальных предпринимателей (ЮЛ/ИП), в зонах влияния выбросов которых располагаются селитебные территории. Подход повышает адресность и направленность последующих мер по управлению рисками³ [9–11]. Многими исследователями оценка риска здоровью при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду, рассматривается как важный и неотъемлемый этап оценки вреда. Такие предварительные оценки позволяют проводить медико-биологические исследования направ-

ленно, с учетом ожидаемых научно доказанных эффектов в отношении критических для конкретных воздействий органов и систем⁴ [12–14].

В целом поиск и апробация новых подходов к оценке вредного воздействия загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения в интересах принятия управленческих решений продолжает оставаться предметом многих исследований. Так, L. Kliucininkas, D. Velykiene [15], изучая бывшие в использовании и отработанные промышленные территории, предлагают методику расчета *emda vector* – комплексного показателя, который интегрирует параметры ущербов здоровью человека и окружающей среде вследствие хозяйственной деятельности.

Fabisiak et al. [16] описывает основанную на оценке риска и кластеризации территорий модель формирования бремени сердечно-сосудистых заболеваний под воздействием ряда факторов окружающей среды. Используются методы регрессионного анализа и оценок пространственно распределенных данных о заболеваемости населения, уровне загрязнения атмосферного воздуха и количественных параметров воздействия, доступных в литературе. Модель разработана для принятия своевременных обоснованных политических решений. Авторы подчеркивают важность объективной оценки нагрузки от конкретных загрязнителей и определение контингентов, наиболее подверженных риску, отмечая при этом необходимость дальнейшего развития методологии анализа.

Значительные неопределенности, которые возникают при анализе и тем более при количественной оценке параметров связей в системе «источники загрязнения – факторы среды обитания – здоровье населения – управляющие действия», отмечаются практически всеми исследователями [17–19]. Сложность решения задачи по оценке потенциального риска и причиненного вреда в условиях множественности и неопределенности воздействующих факторов и ассоциированных с ними негативных эффектов признается в настоящее время многими исследователями. Есть и понимание того, что получаемые результаты не всегда адекватны реальной ситуации и могут приводить к неверным управленческим решениям, равно

¹ Концепция демографической политики Российской Федерации на период до 2025 года / утв. Указом Президента РФ от 9 октября 2007 г. № 1351 с изменениями и дополнениями от 14 апреля 2016 г. № 669-р. [Электронный ресурс] // Гарант: информационно-правовой портал. – URL: <https://base.garant.ru/191961/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> (дата обращения: 03.03.2020).

² О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения: Федеральный закон от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ (ред. от 26.07.2019 г.). Статья 57. Гражданско-правовая ответственность за причинение вреда вследствие нарушения санитарного законодательства [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481/9fba0cf13c7f6e7ee38079c2317f39d2a09220d0/ (дата обращения: 03.03.2020).

³ МР 5.1.0116-17. Методические рекомендации. Риск-ориентированная модель контрольно-надзорной деятельности в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия. Классификация хозяйствующих субъектов, видов деятельности и объектов надзора по потенциальному риску причинения вреда здоровью человека для организации плановых контрольно-надзорных мероприятий / утв. Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 11.08.2017 г. – М., 2017. – 16 с.

⁴ Р 2.1.10.1920-04. Оценка риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.

как и к дополнительным неэффективным затратам [20–25]. Таким образом, задача повышения адекватности оценок как информационной базы принятия решений сохраняет актуальность и требует поиска новых подходов и методов анализа.

Представляется, что методологической основой оценки эффективности митигации рисков и причиненного вреда при планировании и внедрении воздухоохраных мероприятий может являться теория нечетких множеств (нечеткой логики), основоположником которой в современной трактовке является Л. Заде [26–28]. Главным достоинством теории нечетких множеств или теории возможностей с позиции задач оптимизации и идентификации является наличие формализованного математического аппарата, позволяющего работать в условиях неопределенности при отсутствии информации, достаточной для применения теоретико-вероятностных методов. Методология позволяет [28]:

- оперировать нечеткими входными данными, например, непрерывно изменяющимися во времени значениями (динамические ряды), а также значениями, которые невозможно задать однозначно;
- применять нечетко формализованные критерии оценки и сравнения: «средний», «высокий», «наибольший», «возможный» и др.;
- проводить качественные оценки входных данных и выходных результатов, оперировать не только значениями, но и степенью достоверности данных;
- быстро моделировать сложные динамические процессы и сравнивать их между собой с заданной степенью точности;
- оценивать ключевые показатели не точными, а интервальными значениями, характеризующимися функцией принадлежности (степенью принадлежности) к диапазону шкалированных параметров.

Представленные преимущества метода в достаточной мере соответствуют сложным задачам анализа существующих проблемных санитарно-эпидемиологических ситуаций, связанных с причинением вреда здоровью населения в условиях многокомпонентного загрязнения атмосферного воздуха [29, 30].

В связи с этим в качестве адекватной методологической основы оценки эффективности митигации рисков и вреда при планировании и внедрении воздухоохраных мероприятий предложен подход, основанный на теории нечетких множеств, использование элементов которой позволяет оценивать условия многокомпонентных негативных воздей-

ствий, обуславливающих множественные негативные эффекты, в том числе в виде причиненного вреда здоровью. При этом ключевые показатели оцениваются не точечными, а интервальными значениями, характеризующимися функцией принадлежности к диапазону шкалированных параметров. Опыт применения методов нечетких множеств для решения такого рода задач на сегодняшний день крайне недостаточен. Как следствие, представлялись актуальными разработка и апробация на базе методов нечетких множеств научно-методических подходов, позволяющих оценивать эффективность предотвращения и устранения причиненного вреда при планировании и внедрении хозяйствующими субъектами воздухоохраных мероприятий в условиях существующих множественностей и неопределенностей.

Цель настоящего исследования – предложить методические подходы к комплексной оценке эффективности митигации вреда здоровью населения на основе теории нечетких множеств при планировании и внедрении воздухоохраных мероприятий.

Материалы и методы. В качестве объекта исследований была выбрана территория крупного промышленного города с повышенным уровнем загрязнения атмосферного воздуха. Исходной информацией для оценки аэрогенной экспозиции населения являлись результаты натурных исследований качества атмосферного воздуха селитебной территории, выполненные аккредитованными лабораторными центрами системы Росгидромета и ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии» Роспотребнадзора.

Инструментальные данные были дополнены результатами сводных расчетов рассеивания примесей⁵. Зоны выделяли путем построения регулярной сетки с шагом 200×200 м, покрывающей всю исследуемую территорию. В каждом узле сетки рассчитывали приземную концентрацию с использованием метода линейной интер- и экстраполяции данных ближайших точек постов инструментальных исследований.

Зоны разной экспозиции выделяли по критериям соответствия качества атмосферного воздуха селитебной территории гигиеническим нормативам химических веществ (ПДК_{сс}, ПДК_{сг}) и/или референтным концентрациям (Rf/C_{ch} для хронических ингаляционных воздействий)⁶. Для проведения сравнительных оценок выделена территория, характеризующаяся отсутствием превышений гигиениче-

⁵ Приказ Минприроды России (Министерство природных ресурсов и экологии РФ) от 6 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [Электронный ресурс] // Гарант: информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71642906/> (дата обращения: 03.03.2020); Приказ Минприроды России от 29.11.2019 г. № 813 «Об утверждении правил проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию» (Зарегистрировано в Минюсте России 24.12.2019 г. № 56955) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_341489/ (дата обращения: 03.03.2020).

⁶ Р 2.1.10.1920.04 Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.

ских нормативов (или референтных концентраций) содержания химических веществ в атмосферном воздухе (условно – «зона вне экспозиции»). Зоны были сопоставимы по социально-экономическим, природно-географическим и климатическим показателям, уровню медицинского обслуживания населения (видам медицинской помощи, порядкам их оказания в соответствии со стандартами медицинской помощи).

Количественную оценку аэрогенной экспозиции лиц выполняли с учетом данных о приземных концентрациях примесей в каждом квадрате расчетной сетки. Экспозицию выражали среднегодовой суточной дозой (ADD_{ch} , мг/(кг·сут)), рассчитанной в соответствии с разделом 6.4.8 Руководства 2.1.10.1920.04.

Для установления факта причинения вреда здоровью граждан, проживающих в зоне под экспозицией, осуществлена репрезентативная выборка лиц, подлежащих углубленному медицинскому обследованию на индивидуальном уровне. В сравнительном плане для каждого индивидуума из групп под экспозицией и вне ее в соответствии с подходами и критериями, детально отраженными в методических рекомендациях⁷, проведен комплекс диагностических мероприятий. Мероприятия включали химико-аналитические исследования биологических сред на наличие ксенобиотиков и/или иных примесей техногенного происхождения, общие, биохимические, иммунологические и прочие лабораторные исследования, функциональные тесты, врачебный осмотр и постановку диагноза. Подтверждение (или не подтверждение) ассоциации выявленных нарушений здоровья с аэрогенной экспозицией осуществляли на основе анализа причинно-следственных связей между маркерами экспозиции и маркерами негативных эффектов.

На следующем этапе для определения численности лиц с установленным фактом заболевания, детерминированного аэрогенной экспозицией загрязняющих веществ, сформирована информационная база согласованных (в том числе по периоду наблюдения) значений данных по классу болезни в соответствии с диагнозом впервые выявленного хронического заболевания. При этом данные по заболеваниям каждого индивидуума были соотнесены с хронической средней суточной дозой каждого вещества.

Массив данных анализировали поэтапно с применением методов нечетких множеств, используя эти же подходы и для оценки эффективности воздухоохраных мероприятий (целевые показатели снижения выбросов в атмосферный воздух от источников их формирования (т/г), объем и источники финансирования и др.) по критерию митигации причиненного вреда здоровью экспонированного населения.

Результаты и их обсуждение. На примере оценки эффективности митигации причиненного вреда здоровью при планировании воздухоохраных мероприятий предложен и апробирован алгоритм, включающий последовательную этапность действий.

На первоначальном этапе проводится оценка суммарной численности лиц с впервые установленным за период наблюдения одним и тем же диагнозом хронического заболевания по каждому классу болезни отдельно ($\sum N^Z$) и в целом по всей совокупности выявленных классов болезней ($\sum N^K$), соотнесенных с хронической средней суточной дозой каждого вещества, детерминирующей, как отдельное заболевание по каждому выявленному классу болезней (ADV^Z), так и весь спектр заболеваний за годовой период наблюдения (ADV_i^K). При этом учитываются негативные ответы не только в соответствии с критическими органами и системами, но и коморбидными состояниями, выявленными в углубленных медицинских исследованиях.

На втором этапе по результатам ранжирования значений хронической средней суточной дозы загрязняющих веществ, при которой за соответствующий период наблюдения выявляются лица с впервые установленными хроническими заболеваниями, ассоциированными с аэрогенной экспозицией, определяется перечень загрязняющих веществ, потенциально опасных по причинению вреда здоровью. Ранжирование осуществляется по степени потенциальной опасности причинения вреда, присвоенной в соответствии со шкалой опасности, представляющей собой шкалу отношений между хронической средней суточной дозой каждого вещества (в долях) и числом лиц, которым потенциально может быть причинен вред здоровью. В качестве критерия допустимости действующей хронической средней суточной дозы вещества (ПДД, мг/(кг·сут) и ассоциированным с ней числом лиц, которым может быть причинен вред здоровью, целесообразно использовать такую предельную величину «значимого воздействия», соответствующую средней суточной (годовой) дозе химического вещества при аэрогенной экспозиции, рассчитанной исходя из 0,5 ПДК ($0,5 \text{ ПДК}_{cr} \equiv 0,5 \text{ ПДД}_{cr} \equiv 0,5 \text{ ПДД}_{cc}$), с которой при повседневном воздействии в течение длительного времени на организм человека ассоциируется один дополнительный случай причинения вреда здоровью в виде состоявшегося серьезного хронического заболевания на один миллион экспонированных лиц в любые сроки жизни настоящего и последующего поколений ($1 \cdot 10^{-6}$) (табл. 1).

⁷ МУ 2.1.10.3165-14 Порядок применения результатов медико-биологических исследований для доказательства причинения вреда здоровью населения негативным воздействием химических факторов среды обитания [Электронный ресурс]. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293766/4293766706> (дата обращения: 04.03.2020).

Шкала потенциальной опасности причинения вреда здоровью при аэрогенных экспозициях загрязняющих веществ

Показатель шкалы	Ранг потенциальной опасности причинения вреда				
	1	2	3	4	5
	Степень потенциальной опасности причинения вреда				
	Пренебрежимо малая	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
Доли ПДД _{сс} (или ПДД _{сг}) для годового периода осреднения	(0; 0,25]	(0,25; 0,5]	(0,5; 1]	(1; 5]	(5; +∞)
Число лиц, которым может быть причинен вред, соотношенное с определенной численностью населения	(0; 1·10 ⁻⁸]	(1·10 ⁻⁸ ; 1·10 ⁻⁶]	(1·10 ⁻⁶ ; 1·10 ⁻⁴]	(1·10 ⁻⁴ ; 1·10 ⁻³]	(1·10 ⁻³ ; +∞)

Вещество является потенциально опасным по причинению вреда здоровью и рекомендуется для включения в планы воздухоохраных мероприятий, если его ранг потенциальной опасности соответствует уровню 2 и выше.

На третьем этапе с помощью теории нечетких множеств осуществляется доказательство причинения вреда здоровью экспонированных лиц в виде дополнительных случаев впервые выявленных за анализируемый период хронических заболеваний, детерминированных длительным комбинированным воздействием веществ. При этом значения причиненного вреда шкалируются на отрезке величин от 0 до 1. Основным инструментом реализации данного метода является функция принадлежности $\mu(x)$ трапециевидного нечеткого числа $x = (a_1, a_2, a_3, a_4)$, которая в общем виде представляет собой:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a_1, \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{если } a_1 \leq x < a_2, \\ 1, & \text{если } a_2 \leq x \leq a_3, \\ \frac{x - a_4}{a_3 - a_4}, & \text{если } a_3 < x \leq a_4, \\ 0, & \text{если } x > a_4. \end{cases} \quad (2)$$

Причиненный вред, соответствующий установленному факту заболевания (классу болезней) каждого индивидуума из группы экспонированных лиц, детерминированного совокупной аэрогенной химической экспозицией веществ, принимается в качестве переменной r , а ее значение соответствует переменной x в формуле общего вида (2) и диапазону значений a , соответствующему значению переменной r . Значение переменной r определяется в соответствии с комплексным анализом системы показателей, представляющих собой множество хронических средних суточных доз веществ, формирующих совокупную аэрогенную экспозицию, потенциально опасную в отношении причинения вреда в виде всей совокупности впервые выявленных серьезных хронических заболеваний при длительном комбинированном воздействии.

Для анализа системы показателей хроническая средняя суточная доза каждого вещества, включенного в перечень, принимается в качестве переменной (b_i), а ее количественное значение, обозначенное как B_i , принимается в качестве диапазона значений. Устанавливается принадлежность хронической средней суточной дозы каждого вещества (переменной b_i) одному из определенных диапазонов значений хронических средних суточных доз (B_{ik}). Значение функции принадлежности (или степени принадлежности) (μ_{ki}) хронической средней суточной дозы каждого вещества к одному из диапазонов значений хронических средних суточных доз, формирующих аэрогенную экспозицию и связанный с ней причиненный вред здоровью определенному количеству лиц, определяется по формуле (2). Диапазоны значений хронических средних суточных доз соответствуют диапазонам шкалы опасности причинения вреда при аэрогенной экспозиции (табл. 1), границы которых «размыты» ($\pm 20\%$), и значения соседних диапазонов могут пересекаться. Степень причиненного вреда дифференцируется по пяти категориям (табл. 2).

В отношении загрязняющих веществ, формирующих причинение вреда категории 2 (степень «низкая») и выше, требуется корректировка планов воздухоохраных мероприятий для обеспечения эффективной митигации вреда здоровью экспонированного населения.

Для количественной оценки причиненного вреда экспонированной группе лиц осуществляется присвоение ранга негативному ответу (классу болезней в соответствии с МКБ-10 от C00 до R99) (l) с учетом его тяжести, ранжированном в диапазоне значений от 0 до 1. Вес (частота встречаемости) каждого ранжированного по степени тяжести класса болезни в совокупном негативном ответе (P_l) определяется по правилу Фишберна (3) [27]:

$$P_l = \frac{2(n-l+1)}{(n+1)n}, \quad (3)$$

где P_l – вес ранжированного класса болезни в совокупном негативном ответе; n – общее количество классов болезней, установленных в совокупном негативном ответе, связанном с аэрогенной экспозицией всех веществ; l – ранг негативного ответа (класса болезни).

Таблица 2

Шкала диапазонов значений хронических средних суточных доз веществ, детерминирующих причинение вреда здоровью определенному количеству лиц

Диапазон значений шкалы	Значение функции принадлежности хронических средних суточных доз веществ, причиняющих вред (ADV_i^Z), к диапазонам значений шкалы, мг/(кг·сут)	Причиненный вред	
		степень, k	ранг, Rg
$B_{i1} \in [0; 0,3 \text{ ПДД}]$	$\mu_1(ADV_i^Z) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq ADV_i^Z \leq 0,2 \text{ ПДД} \\ \frac{10}{\text{ПДД}}(0,2 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 0,2 \leq ADV_i^Z \leq 0,3 \end{cases}$	Пренебрежимо малая	1
$B_{i2} \in (0,2 \text{ ПДД}; 0,6 \text{ ПДД}]$	$\mu_2(ADV_i^Z) = \begin{cases} 1 - \frac{10}{\text{ПДД}}(0,3 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 0,2 \leq ADV_i^Z \leq 0,3 \\ 1, & \text{если } 0,3 \leq ADV_i^Z \leq 0,4 \\ \frac{10}{\text{ПДД}}(0,6 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 0,4 \leq ADV_i^Z \leq 0,6 \end{cases}$	Низкая	2
$B_{i3} \in (0,4 \text{ ПДД}; 1,2 \text{ ПДД}]$	$\mu_3(ADV_i^Z) = \begin{cases} 1 - \frac{10}{\text{ПДД}}(0,67 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 0,4 \leq ADV_i^Z \leq 0,67 \\ 1, & \text{если } 0,67 \leq ADV_i^Z \leq 0,94 \\ \frac{10}{\text{ПДД}}(1,2 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 0,94 \leq ADV_i^Z \leq 1,2 \end{cases}$	Средняя	3
$B_{i4} \in (0,8 \text{ ПДД}; 6 \text{ ПДД}]$	$\mu_4(ADV_i^Z) = \begin{cases} 1 - \frac{10}{\text{ПДД}}(2,53 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 0,8 \text{ ПДД} \leq ADV_i^Z \leq 2,53 \text{ ПДД} \\ 1, & \text{если } 2,53 \text{ ПДД} \leq ADV_i^Z \leq 4,26 \text{ ПДД} \\ \frac{10}{\text{ПДД}}(6 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 4,26 \text{ ПДД} \leq ADV_i^Z \leq 6 \text{ ПДД} \end{cases}$	Высокая	4
$B_{i5} \in (4 \text{ ПДД}; +\infty)$	$\mu_5(ADV_i^Z) = \begin{cases} \frac{10}{\text{ПДД}}(6 \text{ ПДД} - ADV_i^Z), & \text{если } 4 \text{ ПДД} \leq ADV_i^Z \leq 6 \text{ ПДД} \\ 1, & \text{если } ADV_i^Z \geq 6 \text{ ПДД} \end{cases}$	Очень высокая	5

Установленный вес каждого класса болезней (P_i) распространяется на каждое вещество, формирующее экспозицию и связанный с ней совокупный негативный ответ (P_i). Определение веса причиненного вреда по каждому классу болезни (наблюдаемого веса) осуществляется согласно правилу перехода от значений веса хронической средней суточной дозы вещества к весам причиненного вреда здоровью, детерминированного аэрогенной экспозицией, по формуле:

$$P_k = \sum_i G_i \mu_{ki}, \quad k = 1, 2, 3, 4, 5, \quad (4)$$

где P_k – вес причиненного вреда по каждому классу болезни, выявленному в совокупном негативном ответе, связанном с совокупной аэрогенной экспозицией; G_i – вес каждого вещества, формирующего аэрогенную экспозицию и связанный с ней совокупный негативный ответ; μ_{ki} – значение функции принадлежности хронической средней суточной дозы каждого вещества, отнесенное к соответствующему

диапазону шкалы значений хронических средних суточных доз веществ, причиняющих вред; k – категория степени причиненного вреда.

Значение совокупного причиненного вреда (r) рассчитывается на основании установленного веса причиненного вреда по каждому классу болезни, выявленному в совокупном негативном ответе и связанному с совокупной аэрогенной экспозицией, по формуле:

$$r = \sum_{k=1}^5 \bar{r}_k P_k, \quad (5)$$

где r – значение совокупного причиненного вреда в виде факта заболевания (класс болезней), детерминированного аэрогенной химической экспозицией комплекса веществ; \bar{r}_k – середина каждого диапазона шкалы значений причиненного вреда; P_k – вес причиненного вреда по каждому классу болезни, выявленному в совокупном негативном ответе, связанном с совокупной аэрогенной экспозицией.

Шкала диапазонов значений степени причиненного вреда (R) представлена в табл. 3, ее графическое изображение приведено на рисунке.

Таблица 3

Шкала диапазонов значений степени причиненного вреда здоровью

Степень причиненного вреда, k	Диапазон значений степени причиненного вреда, R	Середина диапазона значений степени причиненного вреда
Пренебрежимо малая	$R_1 \in [0; 0,25]$	0,125
Низкая	$R_2 \in (0,15; 0,45]$	0,3
Средняя	$R_3 \in (0,35; 0,65]$	0,5
Высокая	$R_4 \in (0,55; 0,85]$	0,7
Очень высокая	$R_5 \in [0,75; 1]$	0,875

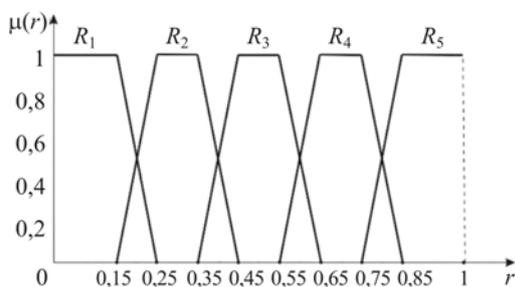


Рис. Диапазоны шкалы значений причиненного вреда

Оценка степени причиненного вреда (R) вычисляется на основании определения значения функции принадлежности степени причиненного вреда ($\mu_k(r)$) к диапазонам значений шкалы (табл. 4).

Вред считается доказанным при выполнении условия, что установленное значение степени причиненного вреда принадлежит к диапазону шкалы значений, оцениваемому как «низкий» и выше (ранг 2 и выше). Для эффективной митигации вреда здоровью населения в зоне под экспозицией формируется перечень загрязняющих веществ, подлежащих обязательному регулированию, у которых ранг причинения вреда составляет 2 и выше.

Оценка вклада каждого вещества в причиненный вред здоровью проводится по формуле:

$$Q_i = \bar{r}_k G_i \mu_{ki} 100 \%, \quad (6)$$

где Q_i – вклад каждого вещества в причиненный вред здоровью; \bar{r}_k – середина каждого диапазона шкалы значений степени причиненного вреда; G_i – вес каждого вещества, формирующего аэрогенную экспозицию и связанный с ней совокупный негативный ответ; μ_{ki} – значение функции принадлежности хронической средней суточной дозы каждого вещества, отнесенное к соответствующему диапазону шкалы значений среднесуточных доз веществ, причиняющих вред.

Таблица 4

Шкала значений степени причиненного вреда здоровью

Диапазон значений шкалы	Функция принадлежности степени причиненного вреда к диапазонам значений шкалы	Причиненный вред	
		степень, k	ранг, Rg
$R_1 \in [0; 0,25]$	$\mu_1(r) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq r \leq 0,15, \\ 10(0,25 - r), & \text{если } 0,15 \leq r \leq 0,25 \end{cases}$	Пренебрежимо малая	1
$R_2 \in (0,15; 0,45]$	$\mu_2(r) = \begin{cases} 1 - 10(0,25 - r), & \text{если } 0,15 \leq r \leq 0,25, \\ 1, & \text{если } 0,25 \leq r \leq 0,35, \\ 10(0,45 - r), & \text{если } 0,35 \leq r \leq 0,45 \end{cases}$	Низкая	2
$R_3 \in (0,35; 0,65]$	$\mu_3(r) = \begin{cases} 1 - 10(0,45 - r), & \text{если } 0,35 \leq r \leq 0,45, \\ 1, & \text{если } 0,45 \leq r \leq 0,55, \\ 10(0,65 - r), & \text{если } 0,55 \leq r \leq 0,65 \end{cases}$	Средняя	3
$R_4 \in (0,55; 0,85]$	$\mu_4(r) = \begin{cases} 1 - 10(0,65 - r), & \text{если } 0,55 \leq r \leq 0,65, \\ 1, & \text{если } 0,65 \leq r \leq 0,75, \\ 10(0,85 - r), & \text{если } 0,75 \leq r \leq 0,85 \end{cases}$	Высокая	4
$R_5 \in [0,75; 1]$	$\mu_5(r) = \begin{cases} 1 - 10(0,85 - r), & \text{если } 0,75 \leq r \leq 0,85, \\ 1, & \text{если } 0,85 \leq r \leq 1 \end{cases}$	Очень высокая	5

Критерии оценки адекватности и достаточности воздухоохраных мероприятий

Название критерия	Критерий оценки	Категория оценки
Адекватность мероприятий в отношении перечня загрязняющих веществ	Запланированный перечень веществ полностью совпадает с уточненным перечнем веществ, потенциально опасных по причинению вреда здоровью и рекомендованных к включению в планы воздухоохраных мероприятий	Адекватны
	Запланированный перечень веществ частично (недостаточны или избыточны) совпадает с уточненным перечнем веществ, потенциально опасных по причинению вреда здоровью и рекомендованных к включению в планы воздухоохраных мероприятий	Частично адекватны
	Запланированный перечень веществ полностью не совпадает с уточненным перечнем веществ, потенциально опасных по причинению вреда и рекомендованных к включению в планы воздухоохраных мероприятий	Неадекватны
Достаточность мероприятий в отношении запланированного объема снижения выброса загрязняющих веществ	Степень опасности причинения вреда здоровью достигла целевого показателя ($Rg < 2$) после проведения воздухоохраных мероприятий	Достаточны
	Степень опасности причинения вреда здоровью снизилась, но не достигла целевого показателя ($Rg < 2$) после проведения воздухоохраных мероприятий (недостаточны)	Частично достаточны
	Степень опасности причинения вреда здоровью не изменилась после проведения воздухоохраных мероприятий	Недостаточны

Причиненный вред в виде негативного эффекта по конкретному классу болезни (Δr) определяется для экспонированной возрастной группы относительно аналогичной группы неэкспонированных лиц.

На основании доказанных фактов причинения вреда здоровью (состоявшееся заболевание) определенному числу экспонированных лиц и оценки вклада каждого вещества в причиненный вред здоровью устанавливается уточненный список веществ, выбросы которых подлежат регулированию,

На четвертом этапе проводится оценка адекватности воздухоохраных мероприятий по снижению фактических объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух на основании сравнительного анализа перечня веществ, включенных в планы, и рекомендуемого списка веществ, фактически участвующих в причинении вреда, подлежащих обязательному регулированию. Оценка достаточности мероприятий проводится на основании критериального сравнительного анализа величин причиненного вреда до и после проведения воздухоохраных мероприятий (табл. 5).

Перечень и объемы выбросов загрязняющих веществ, включенных в планируемые воздухоохраные мероприятия, корректируются только для тех веществ, в отношении которых эффективность мероприятий оценивается категориями: «частично адекватны» и «неадекватны», а также «частично достаточны» и «недостаточны».

Для устранения потенциальной опасности причинения вреда здоровью населения и достижения эффективности планируемых воздухоохраных мероприятий категории «достаточно» рассчитывается величина рекомендуемого дополнительного снижения хронической средней суточной дозы для каждого вещества, включенного в перечень компонентов, подлежащих обязательному регулированию, по формуле (7):

$$\Delta ADD_{IN}^K = \frac{(ADV_{IN}^K - 0,5ПДД)}{ADD_{IN}^K} 100\%, \quad (7)$$

где ΔADD_{IN}^K – дополнительная доля хронической средней суточной дозы вещества, рекомендуемая для устранения потенциальной опасности причинения вреда здоровью населению, %; ADV_{IN}^K – хроническая средняя суточная доза вещества, не создающая потенциальной опасности причинения вреда здоровью (ни по одному из всего спектра выявленных заболеваний) в условиях комбинированного воздействия при НМУ, мг/(кг·сут).

Расчет требуемого объема выброса каждого вещества в атмосферный воздух, обеспечивающего дополнительное снижение аэрогенной нагрузки, достаточной для митигации причиненного вреда, осуществляется с учетом вклада каждого хозяйствующего субъекта в суммарный объем выброса загрязняющего вещества на основе решения обратной задачи или расчетов рассеивания.

Оценка эффективности митигации причиненного вреда здоровью проводится на основании повторной оценки причиненного вреда в виде негативного эффекта по конкретному классу болезни (Δr_N) после проведенных воздухоохраных мероприятий. Среднее значение причиненного вреда в виде негативного эффекта, детерминированного аэрогенной экспозицией, по совокупности всех выявленных классов болезней, до ($ср\Delta r$) и после ($ср\Delta r_N$) проведенных воздухоохраных мероприятий вычисляется по формуле общего вида:

$$ср\Delta r = \frac{\sum \Delta r_K}{K}, \quad (8)$$

где $ср\Delta r$ – среднее значение причиненного вреда в виде негативного эффекта, детерминированного

аэрогенной экспозицией по совокупности всех выявленных классов болезней, до (или после) проведенных воздухоохраных мероприятий; Δr_K – значение причиненного вреда в виде негативного эффекта детерминированного аэрогенной экспозицией по совокупности всех выявленных классов болезней, до (или после) проведенных воздухоохраных мероприятий; K – общее количество всех выявленных классов болезней.

Эффективность снижения причиненного вреда, детерминированного аэрогенной экспозицией, после проведенных воздухоохраных мероприятий оценивается по формуле (9):

$$\Theta = \left(\frac{\text{ср}\Delta r - \text{ср}\Delta r_N}{\text{ср}\Delta r} \right) 100\%, \quad (9)$$

где Θ – эффективность снижения причиненного вреда, детерминированного аэрогенной экспозицией, после проведенных воздухоохраных мероприятий (предотвращенный вред), %; $\text{ср}\Delta r$ – среднее значение причиненного вреда в виде негативного эффекта (по совокупности всех выявленных классов болезней), детерминированного аэрогенной экспозицией, до проведенных воздухоохраных мероприятий; $\text{ср}\Delta r_N$ – среднее значение причиненного вреда в виде негативного эффекта (по совокупности всех выявленных классов болезней), детерминированного аэрогенной экспозицией, после проведенных воздухоохраных мероприятий.

Оценка эффективности предотвращенного вреда, детерминированного аэрогенной экспозицией, после проведенных воздухоохраных мероприятий осуществляется в соответствии со шкалой, представленной в табл. 6.

При отсутствии или низкой эффективности воздухоохраных мероприятий требуется разработка (планирование) дополнительных мер, а при их избыточности целесообразна корректировка для перевода степени эффективности в категорию «достаточно».

Апробация предложенных методических подходов выполнена на примере оценки адекватности, достаточности и эффективности комплекса воздухоохраных мероприятий, планируемых к внедрению

Таблица 6

Оценка эффективности запланированных (внедренных) воздухоохраных мероприятий по критериям предотвращенного вреда здоровью

Эффективность (Э), %	Степень эффективности
0–20	Неприемлемая
20–40	Низкая
40–60	Приемлемая
60–80	Достаточная
80–100	Высокая

нию основными субъектами хозяйственной деятельности территории с высокой аэрогенной нагрузкой.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие **выводы**:

- предложенные подходы к применению элементов теории нечетких множеств в задачах оценки эффективности митигации вреда здоровью населения позволяют проводить оценку достаточности и адекватности планируемых или внедренных воздухоохраных мероприятий в условиях существующих неопределенностей и могут рассматриваться как методы, дополняющие и уточняющие результаты иных исследований в системе «факторы среды обитания – здоровье населения»;

- применение углубленных медицинских исследований нарушений здоровья для доказательства вреда, причиненного комбинированной аэрогенной экспозицией, является принципиально важным этапом и позволяет повысить точность оценок как на индивидуальном, так и на групповом уровне;

- сопоставление перечня веществ, фактически участвующих в причинении вреда здоровью экспонированного населения, с компонентным составом планируемых к снижению валовых выбросов по конкретным соединениям позволяет оценить адекватность воздухоохраных мероприятий, а определение степени митигации вреда здоровью при их реализации – достаточность и эффективность мероприятий.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Клюев Н.Н., Яковенко Л.М. «Грязные» города России: факторы, определяющие загрязнение атмосферного воздуха // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2018. – Т. 26, № 2. – С. 237–250. DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-2-237-250
2. Загрязнение воздушного бассейна как фактор влияния на здоровье населения / В.Д. Суржиков, Д. В. Суржиков, С.С. Ибрагимов, Е.А. Пананотти // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. – 2013. – Т. 91, № 3–2. – Часть 1. – С. 135–139.
3. Циммерман В.И., Бадмаева С.Э. Воздействие отраслей промышленности на воздушную среду города // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 4. – С. 3–6.
4. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project / R. Beelen, O. Raaschou-Nielsen, M. Stafoggia, Z.J. Andersen, G. Weinmayr, B. Hoffmann, K. Wolf, E. Samoli, P. Fischer [et al.] // Lancet. – 2014. – Vol. 1, № 383 (9919). – P. 785–795. DOI: 10.1016/S0140-6736 (13) 62158-3
5. Air pollution and child health: prescribing clean air [Электронный ресурс] // World Health Organization. – 2018. – URL: <https://www.who.int/ceh/publications/air-pollution-child-health/en/> (дата обращения: 10.03.2020).
6. Long-term effects of ambient air pollution on lung function: a review / T. Götschi, J. Heinrich, J. Sunyer, N. Künzli // Epidemiology. – 2008. – Vol. 19, № 5. – P. 690–701. DOI: 10.1097/EDE.0b013e318181650f

7. Авалиани С.Л., Ревич Б.А., Мишина А.Л. Роль оценки долевого вклада выбросов предприятий, находящихся за пределами исследуемой территории города, в различные виды рисков здоровью населения // *Здоровье населения и среда обитания*. – 2010. – Т. 212, № 11. – С. 41–43.
8. Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития: монография / под ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. – Пермь: ПНИПУ, 2014. – 738 с.
9. Горяев Д.В., Тихонова И.В., Кирьянов Д.А. Промышленные предприятия и категории риска причинения вреда здоровью // *Гигиена и санитария*. – 2017. – Т. 96, № 12. – С. 1155–1158. DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-12-1155-1158
10. Попова А.Ю., Зайцева Н.В., Май И.В. Опыт методической поддержки и практической реализации риск-ориентированной модели санитарно-эпидемиологического надзора: 2014–2017 гг. // *Гигиена и санитария*. – 2018. – Т. 97, № 1. – С. 5–9.
11. Камалтдинов М.Р., Кирьянов Д.А. Оценка риска причинения вреда здоровью человека при нарушении законодательства в сфере обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, проведенная для классификации объектов надзора // *Здоровье населения и среда обитания*. – 2015. – № 12 (273). – С. 8–11.
12. Оценка риска нарушений состояния здоровья у детей, проживающих в зоне влияния производства металлургического глинозема / Ю.В. Кольдибекова, М.А. Землянова, А.М. Игнатова, И.В. Тихонова, Н.И. Маркович, К.В. Четвёркина, В.М. Ухабов // *Гигиена и санитария*. – 2019. – Т. 98, № 2. – С. 135–141. DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-2-135-141
13. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Буштуева / под ред. Ю.А. Рахманина, Г.Г. Онищенко. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
14. Оценка риска неканцерогенных эффектов загрязнения атмосферного воздуха на сельских территориях города Уральска / А.А. Мамырбаев., Л.Д. Сакебаева, В.М. Сабырахметова, Г.И. Карашова, К.Н. Шаяхметова, Г.А. Умарова // *Медицинский журнал Западного Казахстана*. – 2016. – Т. 49, № 1. – С. 82–88.
15. Kliucininkas L., Velykiene D. Environmental health damage factors assessment in brownfield redevelopment // *Proceedings WIT Transactions on Biomedicine and Health*. – 2009. – Vol. 14. – P. 179–186. DOI: 10.2495/EHR090181
16. A risk-based model to assess environmental justice and coronary heart disease burden from traffic-related air pollutants / J.P. Fabisiak, E.M. Jackson, L.L. Brink, A.A. Presto // *Environ. Health*. – 2020. – Vol. 16, № 19 (1). – P. 34. DOI: 10.1186/s12940-020-00584-z
17. Lucas R.M., McMichael A.J. Association or Causation: evaluating links between «environment and disease» // *Bulletin of the World Health Organization: the International Journal of Public Health*. – 2005. – Vol. 83, № 10. – P. 792–795.
18. Hill A.B. The Environment and Disease: Association or Causation? // *Proceedings of the Royal Society of Medicine*. – 1965. – Vol. 58, № 5. – P. 295–300.
19. Science for Environment Policy. The precautionary principle: decision-making under uncertainty [Электронный ресурс]. – URL: https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/precautionary_principle_decision_making_under_uncertainty_FB18_en.pdf (дата обращения: 20.03.2020).
20. Симанков В.С., Бучацкая В.В., Теплоухов С.В. Подход к учету неопределенности исходной информации в системных исследованиях // *Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки*. – 2017. – Т. 206, № 3. – С. 100–107.
21. Шоина И.И. Оценка степени риска в условиях неопределенности // *Научный вестник МГТУ ГА*. – 2006. – № 106. – С. 165–169.
22. Кузьмин Е.А. Проблема неопределенности как научной категории // *Стратегические решения и риск-менеджмент*. – 2014. – № 3. – С. 90–100.
23. Клейн С.В., Зайцева Н.В., Май И.В. Вопросы формирования доказательной базы вреда здоровью населения в условиях экологического неблагополучия // *Охрана окружающей среды и природопользование*. – 2013. – № 2. – С. 28–32.
24. Обоснование биомаркеров экспозиции и эффекта в системе доказательства причинения вреда здоровью при выявлении неприемлемого риска, обусловленного факторами среды обитания / Н.В. Зайцева, М.А. Землянова, К.П. Лужецкий, С.В. Клейн // *Вестник Пермского университета. Серия: Биология*. – 2016. – № 4. – С. 374–378.
25. Бондаренко П.В., Фокина Е.А., Трухляева А.А. Применение теории нечетких множеств для оценки качества жизни населения региона // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 11–5. – С. 967–971.
26. Zadeh L., Bellman R. Decision-making in a fuzzy environment // *Management Science*. – 1970. – Vol. 17, № 4. – P. 141–164. DOI: 10.1287/mnsc.17.4.B141
27. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / пер. с англ. Н.И. Ринго; под ред. Н.Н. Моисеева, С.А. Орловского. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
28. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология [Электронный ресурс]. – URL: <http://os.x-pdf.ru/20ekonomika/411551-1-diligenskiy-dimova-sevastyanov-nechetkoe-modelirovanie-mnogokriter.php> (дата обращения: 04.03.2020).
29. Tah J.H.M., Carr V. A proposal for construction project risk assessment using fuzzy logic // *Construction Management & Economics*. – 2000. – Vol. 18, № 4. – P. 491–500. DOI: 10.1080/01446190050024905
30. Кочубей Н.А. Модели принятия решений на основе нечетких множеств // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2010. – Т. 182, № 17. – С. 63–67.

*Комплексная оценка эффективности митигации вреда здоровью на основе теории нечетких множеств при планировании воздухоохраных мероприятий / Н.В. Зайцева, М.А. Землянова, И.В. Май, В.Б. Алексеев, П.В. Трусов, Е.В. Хрущева, А.А. Савочкина // *Анализ риска здоровью*. – 2020. – № 1. – С. 25–37. DOI: 10.21668/health.risk/2020.1.03*



EFFICIENCY OF HEALTH RISK MITIGATION: COMPLEX ASSESSMENT BASED ON FUZZY SETS THEORY AND APPLIED IN PLANNING ACTIVITIES AIMED AT AMBIENT AIR PROTECTION

**N.V. Zaitseva¹, M.A. Zemlyanova^{1,2}, I.V. May¹, V.B. Alekseev¹,
P.V. Trusov², E.V. Khrushcheva¹, A.A. Savochkina²**

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

²Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskiy Ave., Perm, 614990, Russian Federation

When industrial objects emitting substantial masses of dust and gas mixtures are located within a settlement or close to its borders, it often results in poorer quality of the environment and damages to population health. Such a situation is typical for many cities in the country; primarily, for those that are included into "Pure air" Federal project, a part of the "Ecology" National project. Negative effects are produced by a set of various substances emitted from various industries. And it is quite often that great numbers of people are exposed to such emissions and as a result multiple and variable responses from their health are registered. Assessment of share contributions made by different emissions sources and each particular substance into aggregated negative responses from human health is a fundamental stage in assessing damages to health that occurred due to them; it is significant for working out an action plan aimed at hazardous impacts mitigation.

Given that, we proposed an approach based on fuzzy sets theory as a relevant methodological basis for assessing efficiency of risk mitigation and damage to health when planning and implementing activities aimed at ambient air protection. Application of this methodology allows assessing conditions of multi-component negative impacts producing multiple negative effects including direct damage done to human health. And here key parameters are assessed not as per point values but as per interval ones that are characterized with their belonging to a range of scaled parameters. Our research goal was to suggest methodical approaches to assessing efficiency of risk mitigation and damage to health when planning and implementing activities aimed at ambient air protection; the approaches were based on fuzzy sets theory. Results obtained via hygienic (field or calculated examinations of ambient air quality in settlements under exposure and beyond it) and epidemiologic (controlled medical and biological) research are taken as initial data for fuzzy modeling of multiple parameters ratios within "damage to health – mitigation efficiency" system. Principles applied for research design take into account key postulates of exposure assessment, "dose – effect" relationship for an influencing substance, a concept of exposure risk acceptability, peculiarities related to body reactions under combined aerogenic burdens, and plans for ambient air protection activities (including complex ones).

Comparing a list of substances that do actual damage to exposed population's health with a list of substances included into plans on aggregated emissions reduction allows assessing adequacy; determining to what extent damage to health is mitigated allows assessing whether activities aimed at ambient air protection are sufficient and effective.

Key words: damage to health, exposed population, ambient air contamination, mitigation, adverse effects, fuzzy sets theory, ambient air protection, adequacy, sufficiency, effectiveness.

© Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., May I.V., Alekseev V.B., Trusov P.V., Khrushcheva E.V., Savochkina A.A., 2020

Nina V. Zaitseva – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Scientific Director (e-mail: znv@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-34; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4315-5307>).

Marina A. Zemlyanova – Doctor of Medical Sciences, Chief Researcher acting as the Head of the Department for Biochemical and Cytogenetic Diagnostic Techniques (e-mail: zem@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 236-39-30; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8013-9613>).

Irina V. May – Doctor of Biological Sciences, Professor, Deputy Director responsible for research work (e-mail: may@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8997-5493>).

Vadim B. Alekseev – Doctor of Medical Sciences, Director (e-mail: alekseev@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 236-32-70; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8997-5493>).

Petr V. Trusov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Mathematic Modeling of Systems and Processes Department, Chief Researcher (e-mail: tpv@matmod.pstu.ac.ru; tel.: +7 (342) 239-16-07; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8997-5493>).

Ekaterina V. Khrushcheva – Mathematician at Risk Management Techniques and Technologies Laboratory (e-mail: zem@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 238-33-37; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2107-8993>).

Anna A. Savochkina – Senior lecturer at the Higher Mathematics Department (e-mail: aidas_76@mail.ru; tel.: +7 (342) 239-16-97; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2591-6632>).

References

1. Klyuev N.N., Yakovenko L.M. «Dirty» cities in Russia: factors determining air pollution. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2018, vol. 26, no. 2, pp. 237–250 (in Russian). DOI: 10.22363/2313-2310-2018-26-2-237-250
2. Surzhikov V.D., Surzhikov D. V., Ibragimov S.S., Pananotti E.A. Air pollution as the factor of the influence on the life quality of the population. *Byulleten' VSNTs SO RAMN*, 2013, vol. 91, no. 3–2, pp. 135–139 (in Russian).
3. Tsimmerman V.I., Badmaeva S.E. The impact of the industry branches on the city air environment. *Vestnik KrasGAU*, 2015, no. 4, pp. 3–6 (in Russian).
4. Beelen R., Raaschou-Nielsen O., Stafoggia M., Andersen Z.J. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet*, 2014, vol. 1, no. 383 (9919), pp. 785–795. DOI: 10.1016/S0140-6736(13)62158-3
5. Air pollution and child health: prescribing clean air. *World Health Organization*, 2018. Available at: <https://www.who.int/ceh/publications/air-pollution-child-health/en/> (10.03.2020).
6. Götschi T., Heinrich J., Sunyer J., Künzli N. Long-term effects of ambient air pollution on lung function: a review. *Epidemiology*, 2008, vol. 19, no. 5, pp. 690–701. DOI: 10.1097/EDE.0b013e318181650f
7. Avaliani S.L., Revich B.A., Mishina A.L. The role of assessment of pro rata contribution of emissions from businesses outside the study area of the city, into various kinds of risks to public health. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*, 2010, no. 11 (212), pp. 41–43 (in Russian).
8. Analiz riska zdorov'yu v strategii gosudarstvennogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya [Health risk analysis in the strategy for state social and economic development: a monograph]. In: G.G. Onishchenko, N.V. Zaitseva eds. Perm, PNIPU Publ., 2014, 738 p. (in Russian).
9. Goryaev D.V., Tikhonova I.V., Kir'yanov D.A. Industrial enterprises and health risk categories. *Gigiena i sanitariya*, 2017, vol. 96, no. 12, pp. 1155–1158 (in Russian). DOI: 10.18821/0016-9900-2017-96-12-1155-1158
10. Popova A.Yu., Zaitseva N.V., May I.V. experience of methodological support and practical implementation of the risk-oriented model of sanitary-epidemiological surveillance in 2014-2017. *Gigiena i sanitariya*, 2018, vol. 97, no. 1, pp. 5–9 (in Russian).
11. Kamaltdinov M.R., Kir'yanov D.A. Health risk assessment in violation of the legislation in the sphere of ensuring sanitary-epidemiological well-being of the population carried out to classify objects surveillance. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*, 2015, vol. 273, no. 12, pp. 8–11 (in Russian).
12. Kol'dibekova Yu.V., Zemlyanova M.A., Ignatova A.M., Tikhonova I.V., Markovich N.I., Chetverkina K.V., Ukhov V.M. Assessment of the risk for health disorders in children who live in a territory of the zone of exposure to production of metallurgical aluminum. *Gigiena i sanitariya*, 2019, vol. 98, no. 2, pp. 135–141 (in Russian). DOI: 10.18821/0016-9900-2019-98-2-135-141
13. Onishchenko G.G., Novikov S.M., Rakhmanin Yu.A., Avaliani S.L., Bushtueva K.A. Osnovy otsenki riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeistvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh ikh okruzhayushchuyu sredu [Assessing risks of health disorders in children living in a zone exposed to metallurgic alumina production]. In: Yu.A. Rakhmanina, G.G. Onishchenko eds. Moscow, NII ECh i GOS Publ., 2002, 408 p. (in Russian).
14. Mamyrbayev A.A., Sakebaeva L.D., Sabyrakhmetova V.M., Karashova G.I., Shayakhmetova K.N., Umarova G.A. Assessment of risk of non-carcinogenic effects due to the pollution of atmospheric air in residential areas of Uralsk city. *Meditinskii zhurnal Zapadnogo Kazakhstana*, 2016, vol. 49, no. 1, pp. 82–88 (in Russian).
15. Kliucininkas L., Velykiene D. Environmental health damage factors assessment in brownfield redevelopment. *Proceedings WIT Transactions on Biomedicine and Health*, 2009, vol. 14, pp. 179–186. DOI: 10.2495/EHR090181
16. Fabisiak J.P., Jackson E.M., Brink L.L., Presto A.A. A risk-based model to assess environmental justice and coronary heart disease burden from traffic-related air pollutants. *Environ Health*, 2020, vol. 16, no. 19 (1), pp. 34. DOI: 10.1186/s12940-020-00584-z
17. Lucas R.M., McMichael A.J. Association or Causation: evaluating links between «environment and disease». *Bulletin of the World Health Organization: the International Journal of Public Health*, 2005, vol. 83, no. 10, pp. 792–795.
18. Hill A.B. The Environment and Disease: Association or Causation? *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, 1965, vol. 58, pp. 295–300.
19. Science for Environment Policy. The precautionary principle: decision-making under uncertainty. Available at: https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/precautionary_principle_decision_making_under_uncertainty_FB18_en.pdf (20.03.2020).
20. Simankov V.S., Buchatskaya V.V., Teploukhov S.V. Approach to the accounting for initial information uncertainty in system researches. *Vestnik Adygeiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki*, 2017, vol. 3, no. 206, pp. 100–107 (in Russian).
21. Shoina I.I. Risk appraisal in conditions of uncertainty. *Nauchnyi vestnik MGTU GA*, 2006, no. 106, pp. 165–169 (in Russian).
22. Kuz'min E.A. The problem of uncertainty as a scientific category. *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment*, 2014, no. 3, pp. 90–100 (in Russian).
23. Kleyn S.V., Zaitseva N.V., May I.V. Questions form of evidence of harm to public health in terms of ecological trouble. *Okhrana okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanie*, 2013, no. 2, pp. 28–32 (in Russian).
24. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Luzhetskii K.P., Kleyn S.V. Scientific justification of the exposure and effect biomarkers in terms of proving health impact when identifying environmentally-determined unacceptable risk. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya Biologiya*, 2016, no. 4, pp. 374–378 (in Russian).

25. Bondarenko P.V., Fokina E.A., Trukhlyaeva A.A. Application of the theory of fuzzy sets for assessment of the quality of life population of the region. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, no. 11–5, pp. 967–971 (in Russian).
26. Zadeh L., Bellman R. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. 41–164. DOI:10.1287/mnsc.17.4.B141
27. Zade L.A. Ponyatie lingvisticheskoi peremennoi i ego primenenie k prinyatiyu priblizhennykh reshenii [A concept of linguistic variable and its application in getting approximate solutions]. In: N.N. Moiseev, S.A. Orlovskii eds. Moscow, Mir Publ., 1976, 165 p. (in Russian).
28. Diligenskii N.V., Dymova L.G., Sevast'yanov P.V. Nechetkoe modelirovanie i mnogokriterial'naya optimizatsiya proizvodstvennykh sistem v usloviyakh neopredelennosti: tekhnologiya, ekonomika, ekologiya [Fuzzy modeling and multi-criteria optimization of industrial systems under uncertainty: technology, economy, and ecology]. Available at: <http://os.x-pdf.ru/20ekonomika/411551-1-diligenskiy-dimova-sevastyanov-nechetkoe-modelirovanie-mnogokriter.php> (04.03.2020) (in Russian).
29. Tah J.H.M., Carr V. A proposal for construction project risk assessment using fuzzy logic. *Construction Management & Economics*, 2000, vol. 18, no. 4, pp. 491–500. DOI: 10.1080/01446190050024905
30. Kochubei N.A. Modeli prinyatiya reshenii na osnove nechetkikh mnozhestv [Models for decision-making based on fuzzy sets]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika*, 2010, vol. 17, no. 182, pp. 63–67 (in Russian).

Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., May I.V., Alekseev V.B., Trusov P.V., Khrushcheva E.V., Savochkina A.A. Efficiency of health risk mitigation: complex assessment based on fuzzy sets theory and applied in planning activities aimed at ambient air protection. Health Risk Analysis, 2020, no. 1, pp. 25–37. DOI: 10.21668/health.risk/2020.1.03.eng

Получена: 18.02.2020

Принята: 24.03.2020

Опубликована: 30.03.2020