

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАТИВОВ КАЧЕСТВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА

© 2020 г. Ю. И. Шокин^{a,*}, В. В. Москвичев^{a,**}, О. В. Тасейко^{a,b,***}, Е. Н. Бельская^{b,****}

^a Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
Новосибирск, Красноярск, Россия

^b Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва,
Красноярск, Россия

*E-mail: shokin@ict.nsc.ru

**E-mail: krasn@ict.nsc.ru

***E-mail: taseiko@gmail.com

****E-mail: ketrin_nii@mail.ru

Поступила в редакцию 27.05.2020 г.

После доработки 31.07.2020 г.

Принята к публикации 21.09.2020 г.

В статье с использованием методологии оценки риска здоровью населения веществ канцерогенного и неканцерогенного действия рассмотрены алгоритмы расчётной оценки нормативов качества атмосферного воздуха и питьевой воды. Проанализированы приемлемые уровни рисков для различных стран и групп воздействия. Показано, что уровни предельно допустимых концентраций указанных веществ, рассчитанных в зависимости от приемлемых рисков, значительно ниже действующих санитарно-гигиенических нормативов.

Ключевые слова: оценка риска здоровью населения, качество окружающей среды, вещества канцерогенного и неканцерогенного действия, предельно-допустимый уровень.

DOI: 10.31857/S0869587320120245

В “Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации” наряду с другими большими вызовами [1] выделяется возрастание антропогенных нагрузок на окружающую среду до масштабов, угрожающих воспроизводству природных ресурсов, а также связанный с неэффективным использованием этих ресурсов рост рисков для жизни и здоровья граждан. Качественные и количественные оценки таких рисков становятся важнейшей задачей, определяющей эффективность управленческих решений по

ШОКИН Юрий Иванович – академик РАН, научный руководитель ФИЦ ИВТ. МОСКВИЧЕВ Владимир Викторович – доктор технических наук, директор Красноярского филиала ФИЦ ИВТ. ТАСЕЙКО Ольга Викторовна – кандидат физико-математических наук, заведующая кафедрой безопасности жизнедеятельности СибГУ им. М.Ф. Решетнёва, БЕЛЬСКАЯ Екатерина Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности СибГУ им. М.Ф. Решетнёва.

обеспечению безопасности социально-природно-техногенных систем. Исследования, о которых далее пойдёт речь, развивают цикл работ, проведённых в этом направлении ранее [2–5].

Для оценки влияния антропогенных нагрузок на состояние окружающей среды разработаны экологические и санитарно-гигиенические нормативы, включающие предельно допустимые концентрации химических веществ (ПДК), предельно допустимые выбросы загрязнителей в атмосферный воздух (ПДВ) и предельно допустимые их сбросы в природные воды (ПДС). В Российской Федерации утверждено более 600 нормативов среднесуточных и максимальных разовых ПДК для атмосферного воздуха населённых мест [6], около 2500 ПДК воздуха рабочей зоны [7], более 1200 ПДК водных объектов рыбохозяйственного назначения и 1400 – хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения [8, 9]. В целом это наиболее обширная из существующих в мировой

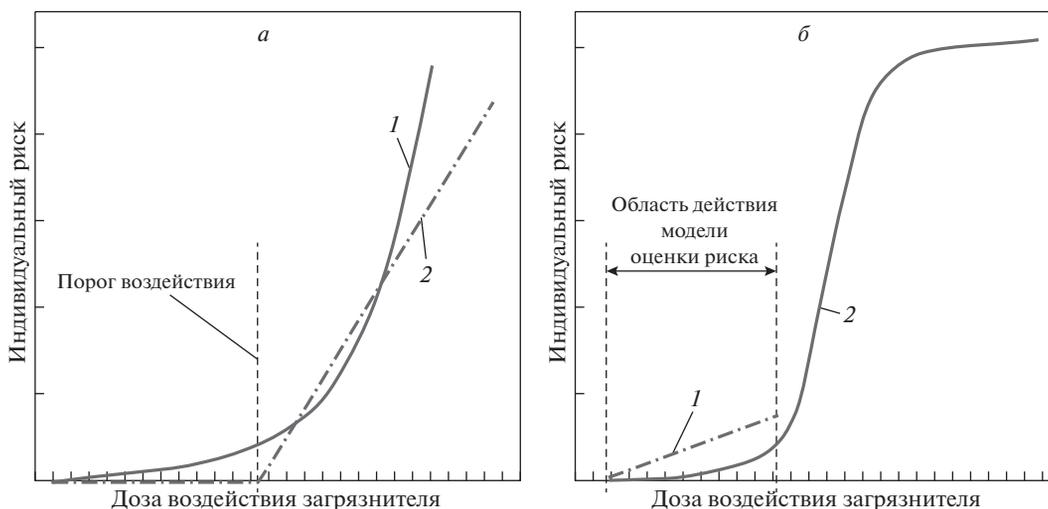


Рис. 1. Зависимость “доза–эффект” для веществ

a – неканцерогенного действия: 1 – экспоненциальная модель, 2 – пороговая модель; *б* – канцерогенного действия: 1 – расчётная модель, 2 – общий вид зависимости

практике систем нормирования качества окружающей среды.

В странах Европейского союза качество атмосферного воздуха контролируется прежде всего нормативами ПДВ, и, как следствие, уровень загрязнения оказывается ниже ПДК. В Российской Федерации приоритеты расставляются иначе: во главу угла ставится ПДК. Для характеристики воздуха рабочей зоны¹ в ЕС используются национальные стандарты, существенно различающиеся в разных странах. Отметим, что ПДК рабочей зоны в РФ для большинства веществ гораздо ниже, чем в странах ЕС. Нормативы ПДВ для отдельных источников в странах ЕС базируются на утверждённых концепциях, реально достижимых и экономически оправданных показателях. Большое значение придаётся минимизации выбросов, очистке и внедрению новых технологий. В России при сходном подходе задача минимизации выбросов ставится, как правило, в случае значительного превышения ПДК формируемыми уровнями загрязнения.

В разных странах ПДК и ПДВ устанавливаются на основе далеко не одинаковых принципов и подходов, в связи с этим сравнение нормативов затруднено различающимися интервалами определения. В ЕС каждая из входящих в него стран имеет право утверждать величину норматива, но она не должна превышать пределы, установленные сообществом. В Российской Федерации такое право есть у её субъектов (например, в Крас-

ноярском крае приняты региональные нормативы радиационного загрязнения). Однако это право реализуется довольно редко, кроме того, на федеральном уровне порядок ввода в действие региональных нормативов качества окружающей среды в настоящее время не определён [10]. В ряде нефтедобывающих регионов установлены собственные нормативы допустимого остаточного содержания нефтепродуктов в почве для отдельных категорий земель (Республика Татарстан, Чувашская Республика, Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, Ненецкий автономный округ, Республика Коми, Ставропольский и Красноярский края) [11–13].

Качество питьевой воды в Российской Федерации должно удовлетворять требованиям, перечисленным в соответствующем постановлении Главного государственного санитарного врача РФ [14]. Безопасные уровни содержания в ней вредных веществ определяются на основе концепции *пороговости вредного действия*, постулирующей, что для каждого вещества, вызывающего те или иные неблагоприятные эффекты в организме, существуют и могут быть найдены дозы (концентрации), при которых изменения функций организма будут минимальными (пороговыми) [15].

В настоящее время в области защиты окружающей среды практически во всех странах мира и международных организациях в качестве главного механизма разработки и принятия управленческих решений как на международном, государственном или региональном уровнях, так и на уровне отдельного производства или потенциального источника загрязнения окружающей среды рассматривается концепция *оценки риска для здоровья населения* [16–20]. Здесь следует отметить

¹ Рабочая зона — пространство высотой до 2 м над площадью постоянного или временного пребывания работающих. Место пребывания считается постоянным, если работник находится на нём более 50% суммарно или 2 ч непрерывно своего рабочего времени (ГОСТ 12.1.005-88).

существенное продвижение в разработке нормативно-правовой базы анализа рисков в Российской Федерации со стороны заинтересованных министерств и ведомств (Минприроды, МЧС, Минздрав, Ростехнадзор, Росгидромет, Роспотребнадзор, Росстандарт и др.) при активном научно-методическом участии РАН [21–25]. Однако, несмотря на очевидные преимущества методологии оценки риска, позволяющей учесть беспороговость воздействия веществ канцерогенного действия на здоровье населения, при реализации программ мониторинга качества атмосферного воздуха и питьевой воды в населённых пунктах используются концептуально устаревшие, но всё ещё действующие гигиенические нормативы.

Оценка рисков здоровью населения проводится не только по показателям, характеризующим уровни загрязнения атмосферного воздуха и питьевой воды, но и по различным индикаторам, описывающим климатические факторы [26–28]. В этой связи разрабатываются методологические аспекты перехода на риск-ориентированную модель деятельности Роспотребнадзора в соответствии со стратегическими изменениями системы государственного управления [27, 29]. В складывающейся ситуации целесообразно рассмотреть вопрос взаимосвязи и соответствия нормативных уровней рисков здоровью и гигиенических ПДК, учитывая при этом, что они однозначно имеют одинаковое целевое предназначение, касающееся оценки состояния окружающей среды.

Согласно документу [21], оценка риска для здоровья человека — это количественная и/или качественная характеристика вредных эффектов, которые могут развиться в результате воздействия факторов среды обитания человека на конкретную группу людей при специфических условиях экспозиции. Все вредные вещества, содержащиеся как в атмосферном воздухе, так и в питьевой воде принято разделять на две группы: канцерогенного и неканцерогенного действия. Международная методология оценки риска предполагает, что канцерогенные эффекты под влиянием химических канцерогенов, обладающих генотоксическим действием, могут возникать при любой дозе, вызывающей инициирование повреждений генетического материала. Для неканцерогенных веществ и канцерогенов с негенотоксическим механизмом действия предполагается существование пороговых уровней, ниже которых вредные эффекты не возникают [30]. Канцерогенные вещества включают две группы. *Генотоксические канцерогены*, взаимодействуя с ДНК, вызывают мутагенные повреждения клеточного генома, вследствие которых образуются опухолевые клетки. *Негенотоксические* повреждают геном лишь в большой концентрации, при длительном и непрерывном воздействии, нарушая межклеточное взаимодействие и способствуя активному канцерогенезу.

Таким образом, *канцерогенный риск* трактуется как вероятность развития злокачественных новообразований на протяжении всей жизни человека. Сама же вероятность обусловлена воздействием вещества, для которого доказано наличие канцерогенного эффекта. Канцерогенный риск представляет собой верхнюю доверительную границу дополнительного пожизненного риска [21]. *Неканцерогенный риск* оценивается с помощью нелинейной (пороговой) модели экспозиции, где в качестве риска используется показатель кратности превышения концентрации анализируемого вещества установленной референтной дозы или референтной концентрации [30]. Риски, оцениваемые таким образом, относятся не к реализованным, а к потенциальным.

Ниже мы рассмотрим алгоритмы расчёта уровней предельно допустимых концентраций в зависимости от допустимых (приемлемых) рисков здоровью населения на основе моделей, используемых в нормативных документах [21, 31, 32] для вредных веществ неканцерогенного ПДК_р^{нк} и канцерогенного ПДК_р^к действия.

Алгоритм расчёта ПДК_р^{нк} для веществ неканцерогенного действия. При оценке риска развития неканцерогенных эффектов, как указано выше, исходят из предположения о наличии *порога вредного действия*, ниже которого вредные эффекты не проявляются (рис. а, 2). Однако для отдельных загрязнителей окружающей среды наличие данного порога не доказано (например, для взвешенных веществ). Оценка риска воздействия на здоровье веществ неканцерогенного действия, согласно документу [21], предполагает использование порогового характера действия неканцерогенных веществ на здоровье человека (оценку выполняют службы Роспотребнадзора). Риск развития неканцерогенных эффектов для отдельных веществ характеризуется коэффициентом опасности воздействия вещества:

$$HQ = C/RfC, \quad (1)$$

где HQ — коэффициент опасности; C — средняя концентрация, мг/м³; RfC — референтная (безопасная) концентрация, мг/м³.

Если рассчитанный коэффициент опасности (HQ) вещества менее единицы, вероятность развития у человека вредных эффектов при ежедневном поступлении вещества в течение жизни несущественна, и такое воздействие характеризуется как допустимое. При коэффициенте опасности выше единицы вероятность возникновения вредных эффектов у человека возрастает пропорционально увеличению HQ.

Риск развития неканцерогенных эффектов при комбинированном и комплексном воздействии химических соединений оценивается индексом

опасности (HI), который для условий одновременного поступления нескольких веществ одним и тем же путём (например, ингаляционным или пероральным) рассчитывается по формуле:

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i, \quad (2)$$

где HQ_i – коэффициент опасности для отдельных компонентов смеси воздействующих веществ. Если значения коэффициента опасности не превышают единицы, вероятность развития у человека вредных эффектов при ежедневном поступлении вещества в течение жизни незначительна, и такое воздействие также характеризуется как допустимое. При коэффициенте опасности выше единицы вероятность возникновения вредных эффектов у человека возрастает пропорционально увеличению HQ_i , однако точно указать величину этой вероятности невозможно [21].

Оценка опасности при комплексном поступлении веществ осуществляется без учёта коэффициента поглощения в органах дыхания и желудочно-кишечном тракте, то есть на основе воздействующих доз и концентраций. Это обусловлено тем, что величины безопасных уровней воздействия химических веществ (RfD, RfC) всегда устанавливаются как экспозиционные, а не поглощённые дозы [21].

Согласно методическим рекомендациям [31], в экспериментальных исследованиях при обосновании нормативов предельного содержания вредных веществ в объектах окружающей среды в качестве пороговых концентраций принимаются минимальные из них, вызывающие достоверный ($P < 0.05$) эффект токсического действия. Неканцерогенный риск, оцениваемый по беспороговым моделям, как правило, ориентирован на ожидаемый рост патологий, связанных с особенностями токсического действия приоритетных веществ, находящихся в питьевой воде или атмосферном воздухе [31, 32].

Для оценки неканцерогенных рисков здоровью населения нами, в отличие от упомянутых методических рекомендаций [31], использована экспоненциальная модель зависимости уровня риска от загрязнения (рис. а, 1), с учётом уточнений:

$$[R] = 1 - \exp[-0.174 \cdot (C/\text{ПДК}_{\text{cc}})^b / K_z], \quad (3)$$

где $[R]$ – уровень риска, C – среднегодовая концентрация, $\text{мг}/\text{м}^3$; K_z – коэффициент запаса; ПДК_{cc} – предельно-допустимая среднесуточная концентрация, $\text{мг}/\text{м}^3$. Параметр $b = 1$ рекомендован для расчётов при времени экспозиции 25 лет. В качестве реальной обычно выбирается средняя концентрация вещества, поступающего в организм человека в течение его жизни, оцениваемой в 70 лет [32].

При определении коэффициента запаса K_z (отношение минимально действующей концентрации в хроническом опыте к ПДК), согласно методическим указаниям [33], необходимо исходить из следующих положений: K_z должен увеличиваться с возрастанием абсолютной токсичности, увеличением коэффициента возможного ингаляционного отравления, уменьшением зоны острого действия, увеличением кумулятивных свойств, при значительных различиях в видовой чувствительности, при выраженном кожно-резорбтивном действии (для веществ, находящихся в газовой фазе). Решение в каждом конкретном случае зависит от особенностей действия вредного вещества, от адекватности и чувствительности показателей, избранных для определения минимально действующей концентрации. В обычных случаях коэффициент запаса не должен быть менее 3 и не должен превышать 20 (при оценке атмосферных загрязнений). Он принимается равным 100 у веществ с выраженной вероятностью отдалённых последствий и 10 у остальных веществ (при оценке токсикологической опасности питьевой воды) [31].

На основе формулы (3) представляется возможным выполнить расчёт предельно допустимых концентраций ($\text{ПДК}_p^{\text{нк}}$) в зависимости от нормативных (приемлемых) значений риска $[R]$:

$$\text{ПДК}_p^{\text{нк}} = C / \sqrt[b]{(-K_z/0.174) \cdot \ln(1 - [R])}. \quad (4)$$

В рассматриваемом контексте риск выступает в роли прогностической оценки вероятности неблагоприятного исхода развивающейся ситуации.

Алгоритм расчёта $\text{ПДК}_p^{\text{к}}$ для веществ канцерогенного действия. Для оценки рисков здоровью населения вследствие загрязнения атмосферного воздуха и питьевой воды веществами канцерогенного действия за основу берётся линейная модель, представленная в рекомендациях [21].

Характеристиками зависимости “доза–эффект” (рис. б, 1), наиболее часто используемыми для оценки канцерогенного риска, а также рисков для здоровья при воздействии некоторых наиболее распространённых химических загрязнений, достаточно подробно изученных в эпидемиологических исследованиях [34], являются: величина наклона зависимости, отражающая возрастание вероятности развития вредной реакции при увеличении дозы (концентрации) на 1 $\text{мг}/\text{кг}$ или 1 $\text{мг}/\text{м}^3$; уровень воздействия, связанный с определённой вероятностью эффекта (показатели этой группы применяются для установления реперных, то есть опорных доз и концентраций [21]). Оценка зависимости “доза–эффект” у канцерогенов с беспороговым механизмом действия осуществляется путём линейной экстраполяции реально наблюдаемых в эксперименте или в эпиде-

миологических исследованиях зависимостей в области малых доз и нулевого канцерогенного риска [35].

Особенность действующей методологии оценки риска — акцент на продолжительные воздействия относительно низких концентраций химических веществ (например, хроническое ежедневное поступление). Расчёт канцерогенного риска проводится только для того диапазона доз (концентраций) химического вещества, который соответствует линейному участку зависимости “доза (концентрация)—эффект”. В реальности же общий вид зависимости далёк от линейного (см. рис. б, л).

Расчёт индивидуального канцерогенного риска ICR_i здоровью населения от загрязнений атмосферного воздуха (питьевой воды) проводится по формуле:

$$ICR_i = C_i \cdot SF_i \cdot \frac{1}{BW} \cdot DAC = C_i \cdot SF_i \cdot \frac{1}{70} \cdot 20, \quad (5)$$

где SF_i — фактор канцерогенного потенциала, установленный для каждого вещества (мг/кг/сут.); BW — стандартное значение массы тела человека (для взрослого человека — 70 кг); DAC — суточное потребление воздуха для взрослого человека — 20 м³/сут. (воды — 2 л/сут.); C_i — средняя концентрация вещества в исследуемом объекте окружающей среды за весь период усреднения экспозиции: для воздуха (мг/м³) принимается на уровне ПДК среднесуточного (при оценке атмосферных загрязнений) для соответствующего вещества ($C = ПДК_{сс}$) [6] или ПДК в воздухе рабочей зоны для профессиональных групп ($C = ПДК_{рз}$); для воды (мг/л) принимается на уровне ПДК химических веществ в водных объектах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования [36].

На основе формулы (5) проводится оценка расчётного значения для веществ канцерогенного действия:

$$ПДК_p^k = ICR \cdot \frac{BW}{SF_i \cdot DAC} \quad (6)$$

В качестве значения ICR используем допустимый уровень риска, получая соответственно $ПДК_p^k$ для населения и для профессиональных групп.

Приемлемые уровни риска. Для расчёта $ПДК_p^k$ принципиальное значение имеет обоснованность допустимого уровня риска здоровью в формулах (4) и (6). В связи со значительным различием методов определения канцерогенных и неканцерогенных рисков различаются и приемлемые уровни, устанавливаемые для них.

Для выбора приемлемого значения неканцерогенного риска необходимо учесть, что в абсолютном большинстве случаев химическое веще-

ство, содержащееся в питьевой воде либо в атмосферном воздухе, воздействует на организм не изолированно, а в комплексе с другими химическими веществами, обладающими установленными эффектами синергизма и антагонизма. Кроме того, химический состав атмосферного воздуха и питьевой воды, потребляемых человеком в течение суток, различен. Исключение могут составлять, как правило, лишь изолированные коллективы людей [31, 32].

Приемлемый допустимый уровень неканцерогенного риска $[R]$ в формуле (4) обосновывается, исходя из экономических и социальных факторов (табл. 1) [32, 33, 36–38].

Методы определения канцерогенного риска, так же как и приемлемый уровень риска заболевания раком, различаются в разных странах и организациях (табл. 2) [16, 39]. Не существует общего международного научного консенсуса относительно “приемлемого” уровня канцерогенного риска, связанного с провоцированием рака, для веществ, которые не являются пороговыми генотоксичными канцерогенами. Большинство контролирующих организаций и органов власти, регулирующих качество воздуха и питьевой воды, природоохранную деятельность и функционирование фармацевтической промышленности, обычно устанавливают приемлемые или нормативные пределы канцерогенного риска в диапазоне от 1×10^{-5} до 1×10^{-7} для разных групп воздействия (в зависимости от возраста, характера профессиональной деятельности) [40].

Под профессиональным риском понимают вероятность повреждения (утраты) здоровья или смерти, связанную с исполнением обязанностей по трудовому договору (контракту) и в иных установленных законом случаях [41]. Для некоторых учреждений используются аналитические (расчётные) пределы воздействия для пороговых генотоксических канцерогенов.

Приемлемый уровень канцерогенного риска для населения, согласно ВОЗ, принимается в диапазоне $1 \times 10^{-4} \dots 1 \times 10^{-6}$ (в зависимости от степени доказанности канцерогенного эффекта), в России диапазон на порядок ниже и составляет $1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-7}$. Для профессиональных рисков самые высокие приемлемые уровни установлены в Японии и составляют $1 \times 10^{-3} \dots 1 \times 10^{-4}$, в США — 1×10^{-4} , в Германии и Нидерландах — 4×10^{-5} , в Финляндии и Великобритании — 1×10^{-5} , в России — $1 \times 10^{-4} \dots 1 \times 10^{-5}$. При этом ряд организаций, в частности SCOEL (EU Scientific Committee on Occupational Exposure Limits), DFG (German Research Foundation — Deutsche Forschungsgemeinschaft) и DECOS (Dutch Expert Committee on Occupational Safety, a committee of the Health Council of the Netherlands), устанавливают стандарты воздействия на здоровье, не связанные с

Таблица 1. Уровни приемлемого неканцерогенного риска

Вид риска	Приемлемое значение
Минимальный риск приемлемого действия	
Выражается в вероятности ощущения населением неприятных запахов или развития иных рефлекторных реакций (слезотечение, кашель), дискомфортных состояний, головной боли и пр., что создаёт основной поток жалоб населения	0.02...0.05 (допускается, что от 20 до 50 из каждой тысячи человек, подвергнутых воздействию максимальных уровней загрязнения, могут проявить рефлекторные реакции, тогда как для большей части населения в этом случае подобные проявления маловероятны)
Хронический (неканцерогенный) риск	
Выражается в вероятности развития симптомов хронической интоксикации на протяжении определённого времени, что количественно связывают с ростом общей заболеваемости без появления каких-либо специфических форм заболевания	0.02 (или 20 дополнительных случаев на 1000 человек), что соответствует интервалу допустимой статистической ошибки

Источники: [32, 33, 36–38].

Таблица 2. Приемлемые уровни канцерогенного риска

Организация, страна	Приемлемый уровень канцерогенного риска	Примечания
Профессиональные риски		
Committee of Hazardous Substances of the German Federal Ministry of Labour and Social Affairs (AGS), Германия	4×10^{-5}	Приемлемый уровень 1×10^{-4} был установлен как переходный на период 2013–2018 гг. Риск 1×10^{-3} допустим при условии, что работодатель постоянно стремится снизить уровень до “приемлемого”
US National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), США	1×10^{-4}	Этот уровень следует рассматривать как отправную точку для постоянного снижения рисков с целью минимизации остаточного риска
Декларация Российского научного общества анализа риска “Об установлении предельно допустимого уровня риска”, РФ	$1 \times 10^{-4} \dots 1 \times 10^{-5}$	Для России предельно допустимый уровень индивидуального риска рекомендуется принимать в диапазоне от 10^{-4} (для функционирующих объектов) до 10^{-5} (для вновь строящихся объектов) в год
Окружающая среда		
National Environment Protection Council, Австралия	1×10^{-5}	Установлен руководством по качеству атмосферного воздуха
World Health Organization (WHO)	1×10^{-4}	Различные уровни рисков установлены для поддержки органов власти в процессе принятия решений по снижению рисков
	1×10^{-5}	
	1×10^{-6}	
Министерство здравоохранения РФ	$1 \times 10^{-5} \dots 1 \times 10^{-7}$	Показывает вероятность возникновения дополнительных случаев заболеваний раком

Источники: [16, 22].

непороговыми генотоксичными канцерогенами [16] (см. табл. 2).

Сравнение действующих ПДК и рассчитанных ПДКр на основе нормативных рисков. Предложенные для расчёта ПДКр соотношения (4) и (6) могут быть использованы в случаях как ингаляционного,

так и перорального воздействия. Для оценки неканцерогенных рисков необходимо использовать среднегодовые уровни загрязнения среды воздействия (атмосферного воздуха или питьевой воды). По данным ВОЗ, загрязнение воздуха оказывается наиболее важным фактором экологического риска.

Таблица 3. Сведения о параметрах опасности развития неканцерогенных эффектов и пороговые значения концентраций

Вещество/показатель, мг/м ³	Взвешенные вещества	СО	NO ₂	Фенол	Ксилол	SO ₂	HF
Класс опасности	3	4	3	2	3	3	1
ПДК _{сс} (среднесуточные)	0.15	3	0.04	0.006	0.2	0.05	0.005
ПДК _{рз} (в воздухе рабочей зоны)	—	20	2	0.1	50	10	0.1
Референтные концентрации для хронического ингаляционного воздействия, RfC	0.05	3	0.04	0.006	0.1	0.05	0.014
Референтные концентрации для острого ингаляционного воздействия, ARFC	0.15	23	0.47	6	4.3	0.66	0.2
ПДК _р ^{нк} для населения	0.074	0.92	0.025	0.0003	0.009	0.0006	0.0028

Источники: [21, 42].

В связи с этим в примерах расчётов использованы только ингаляционные воздействия, на основе данных наблюдений за состоянием атмосферного воздуха населённых мест. На основе соотношений (3)–(4) определены значения ПДК_р^{нк} (табл. 3) приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха для уровня приемлемого индивидуального риска развития неканцерогенных эффектов для населения 5×10^{-2} год⁻¹ (см. табл. 1). При расчёте ПДК_р^{нк} использовались среднегодовые значения веществ в атмосферном воздухе Красноярска (за 2015–2017 гг.), поскольку город стабильно входит в список самых экологически неблагоприятных городов России (см. табл. 3).

Сравнение расчётных нормативов ПДК_р^{нк}, полученных с учётом реального загрязнения атмосферного воздуха города с действующими ПДК_{сс}, показывает, что полученные значения существенно ниже действующих нормативов (табл. 3). Это означает, что даже при наличии в воздухе городов загрязнения, не превышающего регламентированные уровни, риск здоровью населения от ингаляционного воздействия остаётся значительным. При этом следует отметить, что среднесуточные (среднегодовые) концентрации, использованные для получения расчётных значений ПДК_р^{нк}, не учитывают длительности воздействия на организм и химического состава рассматриваемой среды (взаимодействия веществ между собой).

Результаты расчётов ПДК_р^к веществ канцерогенного действия для населения и профессиональных воздействий с использованием соотношений (5)–(6) приведены в таблице 4, как и основные показатели опасности развития канцерогенных эффектов, установленные различными гигиени-

ческими нормативными документами: едиличный риск для ингаляционного пути поступления, среднесуточные предельно допустимые концентрации и концентрации в воздухе рабочей зоны, референтные концентрации веществ.

Рассчитанные показатели ПДК_р^к содержания в атмосферном воздухе загрязняющих веществ с учётом их влияния на здоровье населения, определённые в соответствии с методологией оценки рисков здоровью населения (см. табл. 4), меньше ПДК, установленных для соответствующих веществ на 1–3 порядка; для профессиональных групп эти показатели по бенз(а)пирену, формальдегиду, этилбензолу, свинцу и анилину превышают существующие ПДК. Недооценка уровней загрязнения атмосферного воздуха городов вредными веществами может приводить к росту количества патологических состояний, связанных с их воздействием [43]. Другое отличие предлагаемых нормативов от действующих ПДК в том, что применяемые в нашей стране предельно допустимые концентрации не всегда обоснованы по эффектам, напрямую связанным со здоровьем: 53% ПДК для водных объектов (ПДК_{хп}) обоснованы по органолептическому признаку вредности и 20% – по общесанитарному показателю; 30% ПДК для атмосферного воздуха населённых мест установлены по рефлекторным реакциям человека [44]. Оценка же рисков, используемая в предлагаемом нами подходе, основывается исключительно на критериях, отражающих непосредственное влияние химических веществ на здоровье наиболее чувствительных групп населения. Кроме того, регламентированные ПДК относятся к нормативам среднесуточным; предложенные, в отличие от регламентированных, – стандарты среднегодовые.

Таблица 4. Сведения о показателях опасности развития канцерогенных эффектов и пороговые значения концентраций

Вещество/показатель	Бенз(а)пирен	Формальдегид	Свинец	Этилбензол	Бензол	Анилин
МАИР	2А	2А	2А	2В	1	3
ЕРА	В2	В1	В2	D	А	В2
Фактор канцерогенного потенциала (ингаляционно) SFi , $(\text{кг}\cdot\text{сут}/\text{мг})^{-1}$	3.9	4.6×10^{-2}	4.2×10^{-2}	3.9×10^{-3}	2.7×10^{-2}	5.7×10^{-3}
Класс опасности	1	2	1	3	2	2
ПДК _{сс} (среднесуточная, $\text{мг}/\text{м}^3$)	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-3}	3.0×10^{-4}	2.0×10^{-3}	1.0×10^{-1}	3.0×10^{-2}
ПДК _{рз} (в воздухе рабочей зоны, $\text{мг}/\text{м}^3$)	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-1}	5.0×10^{-2}	5	5	0.1
Референтные концентрации для хронического ингаляционного воздействия, $\text{мг}/\text{кг}$	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-3}	5.0×10^{-4}	1	3.0×10^{-2}	1.0×10^{-3}
ПДК _р ^к для населения, $\text{мг}/\text{м}^3$	8.97×10^{-7}	7.61×10^{-5}	8.3×10^{-5}	8.97×10^{-4}	1.3×10^{-4}	6.1×10^{-4}
ПДК _р ^к для профессиональных групп, $\text{мг}/\text{м}^3$	8.97×10^{-5}	7.61×10^{-3}	8.3×10^{-3}	8.97×10^{-2}	1.3×10^{-2}	6.1×10^{-2}

Источники: [21, 42–44].

Примечание: МАИР – классификация Международного агентства по изучению рака: категория 1 – канцерогенные для человека, категория 2А – весьма вероятно канцерогенные для человека, категория 2В – вероятно канцерогенные для человека, 3 – агент не может быть классифицирован с точки зрения его канцерогенности для человека. ЕРА – классификация степени доказанности канцерогенности для человека, США: А – канцерогены для человека, В1 – вероятные канцерогены для человека (ограниченные доказательства для человека), В2 – вероятные канцерогены для человека (достаточные доказательства для животных и недостаточные доказательства или отсутствие данных для человека), D – не классифицируемые как канцерогены для человека. SFi – факторы канцерогенного потенциала для ингаляционного пути поступления, $\text{кг}\cdot\text{сут}/\text{мг}$.

Сравнение предлагаемых нормативов среднегодовых ПДК_р с наблюдаемым уровнем загрязнения в промышленных центрах Сибири показывает существенное превышение содержания основных индикаторов канцерогенной опасности атмосферного воздуха для здоровья населения.

Необходимость установления санитарно-гигиенических нормативов (ПДК) с использованием методологии оценки рисков обусловлена наличием доказанных связей между допустимыми (приемлемыми) уровнями рисков и показателями заболеваемости и смертности населения. Утвержденные в качестве гигиенических нормативов в Российской Федерации ПДК_{сс}, к сожалению, не всегда обоснованно связаны с непосредственным воздействием на здоровье людей.

* * *

Представленные результаты указывают на необходимость пересмотра санитарно-гигиенических нормативов, что обуславливается, с одной стороны, отсутствием связи действующих ПДК со здоровьем населения, с другой стороны – общей неэффективностью системы управления качеством окружающей среды.

Сравнительный анализ действующих ПДК и рассчитанных ПДК_р подчеркивает необходимость

пересмотра действующих нормативов, несмотря на то, что по некоторым веществам нормативные значения выше рассчитанных. Представленные алгоритмы расчёта ПДК_р^{нк} неканцерогенного и ПДК_р^к канцерогенного действия через приемлемые значения рисков (принимались $5 \times 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ и $1 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ соответственно) позволяют утверждать, что полученные расчётные ПДК_р могут быть предложены в качестве новых среднегодовых стандартов. Единого международного документа, который бы устанавливал чёткие границы приемлемых рисков, не существует.

Национальными организациями здравоохранения разных стран рекомендовано принимать уровень неканцерогенных рисков от $2 \times 10^{-2} \text{ год}^{-1}$ до $5 \times 10^{-2} \text{ год}^{-1}$, риск заболевания раком для населения не выше 10^{-6} год^{-1} , для профессиональных воздействий не выше 10^{-4} год^{-1} .

Предлагаемые в статье ПДК_р должны уточняться с учётом одновременного поступления химических веществ всеми возможными путями (перорально, на кожу, ингаляционно) из всех приоритетных объектов среды обитания человека, при комбинированном действии с другими химическими соединениями, обладающими однородным влиянием и/или влияющим на одни и те же органы или системы.

Существующая в настоящее время противоречивость требований к нормативным оценкам окружающей среды и приемлемым уровням риска свидетельствует о необходимости активизации исследований в данном направлении.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 18-47-240006 “Методы и информационные технологии оценки рисков развития социально-природно-техногенных систем промышленного региона”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Российской Федерации от 01.12.2016 г. № 642 “О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации”.
2. *Moskvichev V.V., Shokin Yu.I.* Anthropogenic and Natural Risks on the Territory of Siberia // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012. V. 1. P. 69–78; *Москвичев В.В., Шокин Ю.И.* Антропогенные и природные риски на территории Сибири // Вестник РАН. 2012. Т. № 2. С. 131–140.
3. *Москвичев В.В., Бычков И.В., Потапов В.П. и др.* Информационная система территориального управления рисками развития и безопасностью // Вестник РАН. 2017. № 8. С. 696–705.
4. *Левкевич В.Е., Лепихин А.М., Москвичев В.В. и др.* Безопасность и риски устойчивого развития территорий. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014.
5. *Иванова У.С., Москвичев В.В., Тасейко О.В.* Ранжирование территорий Красноярского края с использованием риск-ориентированного подхода // Проблемы анализа риска. 2019. № 4. С. 48–63.
6. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 22 декабря 2017 № 165 (ред. от 31.05.2018) «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений”» (вместе с “ГН 2.1.6.3492-17. Гигиенические нормативы...”) (зарегистрировано в Минюсте России 09.01.2018, № 49557).
7. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 13 февраля 2018 № 25 «Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.2.5.3532-18 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны”» (вместе с “ГН 2.2.5.3532-18. Гигиенические нормативы...”) (зарегистрировано в Минюсте России 20.04.2018, № 50845).
8. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 “Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения”.
9. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования”.
10. *Панус В.Р., Рыбакова Г.А.* Нормативы качества атмосферного воздуха Российской Федерации и Европейского союза и их достижение // Современные наукоёмкие технологии. 2006. № 3. С. 56–57.
11. Постановление правительства Красноярского края от 18 декабря 2012 г. № 670-п «Об утверждении региональных нормативов качества окружающей среды “Допустимые значения радиационного загрязнения природной среды на территории Красноярского края”». <http://docs.cntd.ru/document/465800490> (дата обращения 20.07.2020).
12. *Шагидуллин Р.Р., Иванов Д.В., Шагидуллина Р.А., Петров А.М.* Региональные нормативы качества почв и их применение в системе государственного экологического надзора // Промышленная и экологическая безопасность, охрана труда. 2014. № 6 (92). <https://prominf.ru/article/regionalnye-normativy-kachestva-pochv-i-ih-primenenie-v-sisteme-gosudarstvennogo> (дата обращения 20.07.2020).
13. *Ильсцова А.Ф.* Разработка норматива допустимого содержания нефти и продуктов её трансформации в почве после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ // Химия. Экология. Урбанистика. 2018. Т. 1. С. 102–107.
14. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 26 сентября 2001 № 4 «О введении в действие санитарных правил “СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения”» (с изменениями на 2 апреля 2018 г.).
15. *Белицкий Г.А., Кирсанов К.И., Лесовая, Е.А., Яковлевская М.Г.* Лекарственный канцерогенез: факторы риска и возможности предотвращения // Успехи биологической химии. 2020. Т. 60. С. 173–226.
16. WES Review 2018. Non-threshold based genotoxic carcinogens. Accessory document to Recommending health-based workplace exposure standards and notations. Safe Work Australia (2018).
17. Occupational Cancer. A guide to prevention, assessment and investigation. AFOM Working Party on Occupational Cancer. The Australasian Faculty of Occupational Medicine. May 2003.
18. Оценка риска для здоровья от загрязнения воздуха — общие принципы. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ; 2016 г. https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/300876/Health-risk-assessment-air-pollution-General-principles-ru.pdf (дата обращения 20.07.2020).
19. Evolution and Use of Risk Assessment in the Environmental Protection Agency: Current Practice and Future Prospects. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK214619/> (дата обращения 20.07.2020).
20. *Авалиани С.Л., Безпалько Л.Е., Бобкова Т.Е., Мишина А.Л.* Перспективные направления развития ме-

- тодологии анализа риска в России // Гигиена и санитария. 2013. № 1. С. 33–35.
21. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Руководство. Р 2.1.10.1920-04 (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 05.03.2004).
22. Декларация Российского научного общества анализа риска “Об установлении предельно допустимого уровня риска”. http://sra-russia.ru/files/decl_o_pred_dop.pdf (дата обращения 17.04.2020).
23. ГОСТ Р 22.10.02-2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Допустимый риск чрезвычайных ситуаций. Дата введения 01.06.2017 г. <http://www.sra-russia.ru/upload/iblock/a71/a71d4971c95c00eaa768c5ae5f7dbae0.pdf> (дата обращения 17.07.2020).
24. ГОСТ Р 14.09-2005 Экологический менеджмент. Руководство по оценке риска в области экологического менеджмента. Дата введения 01.01.2007. <http://docs.cntd.ru/document/1200077552> (дата обращения 17.07.2020).
25. Оценка риска воздействия наноматериалов и наночастиц на организм человека: Методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2012. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293750/4293750742.pdf> (дата обращения 17.04.2020).
26. *Ракитский В.Н., Авалиани С.Л., Новиков С.М. и др.* Анализ риска здоровью при воздействии атмосферных загрязнений как составная часть стратегии уменьшения глобальной эпидемии неинфекционных заболеваний // Анализ риска здоровью. 2019. № 4. С. 30–36.
27. *Онищенко Г.Г., Зайцева Н.В., Май И.В. и др.* Анализ риска здоровью в стратегии государственного социально-экономического развития / Под общ. ред. Г.Г. Онищенко, Н.В. Зайцевой. М.; Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2014.
28. Изменение климата и здоровье: оценки, индикаторы, прогнозы / Под ред. Б.А. Ревича и А.О. Кокорина. М.: Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, 2019.
29. *Зайцева Н.В., Май И.В., Кирьянов Д.А. и др.* Проблемы и перспективы ведения реестров объектов санитарно-эпидемиологического надзора для задач перехода на риск-ориентированную модель деятельности // Анализ риска здоровью. 2015. № 1. С. 4–11.
30. U.S. EPA. Exposure Factors Handbook 2011 Edition (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, EPA/600/R-09/052F, 2011. <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=236252> (дата обращения 12.04.2020).
31. Методические рекомендации МР 2.1.4.0032-11. Интегральная оценка питьевой воды централизованных систем водоснабжения по показателям химической безвредности (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 31.07.2011).
32. *Фрумин Г.Т.* Оценка риска для здоровья населения Санкт-Петербурга при ингаляционном воздействии взвешенных веществ и бенз(а)пирена // Безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 38–41.
33. МУ 2163-80. Методические указания к постановке исследований для обоснования санитарных стандартов вредных веществ в воздухе рабочей зоны (утв. Главным государственным санитарным врачом СССР 4 апреля 1980 г. № 2163-80).
34. Cancer Risk Assessment Methodology: A Review and Recommendations. <http://www.nepc.gov.au/system/files/pages/9b067155-4726-423b-989b-5263263b9c16/files/b4-cancer-methodology-final-draft-sep2010.pdf> (дата обращения 12.07.2020).
35. *Monier R.* Fundamental aspects: mechanisms of carcinogenesis and dose-effect relationship // Comptes Rendus De L'Académie Des Sciences. Série III, Sciences De La Vie. 2000. 323(7):603-10.
36. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30 апреля 2003 г. № 78 «О введении в действие ГН 2.1.5.1315-03 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования”» (с изменениями на 13 июля 2017 г.) (зарегистрировано в Минюсте России 19.05 2003, № 4550).
37. *Маймулов В.Г., Нагорный С.В., Шабров В.А.* Основы системного анализа в эколого-гигиенических исследованиях. СПб.: ГМА им. И.И. Мечникова, 2000.
38. *Фрумин Г.Т.* Диагностика, оценка и процессы управления экологическими рисками в городской среде // Экология и гидрометеорология больших городов и промышленных зон [Россия–Мексика]. Т. II. Мониторинг окружающей среды / Под ред. Л.Н. Карлина и В.А. Шелутко. СПб.: РГГМУ, 2010.
39. *Kayser M., Henn M.* The risk-based concept for carcinogenic substances developed by the Committee for Hazardous Substances. Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAuA), 2013.
40. *Changsheng Q., Bing L., Haisuo W. et al.* Multi-pathway assessment of human health risk posed by polycyclic aromatic hydrocarbons // Environmental Geochemistry and Health. 2015. V. 37(3). P. 587–601.
41. Р 2.2.1766-03. 2.2. Гигиена труда. Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 24.06.2003).
42. ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 13.02.2018).
43. Руководство по комплексной профилактике экологически обусловленных заболеваний на основе оценки риска. М., 2017. <https://static-3.rosminzdrav.ru/system/attachments/attaches/000/036/600/original/Руководство.pdf?1512992582> (дата обращения 20.06.2019).
44. МосМР 2.1.9.004-03. “Критерии оценки риска для здоровья населения приоритетных химических веществ, загрязняющих окружающую среду”. <http://docs.cntd.ru/document/3715847> (дата обращения 20.06.2019).