

К ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА В XXI В.

А. А. Макоско

Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН (Москва, Российская Федерация)

А. В. Матешева

Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 27 августа 2021 г.

Сформулирован методический подход к оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) в условиях изменяющегося климата. Исследована динамика риска для здоровья от загрязнения атмосферы микрочастицами PM₁₀, PM_{2.5} в районах пяти арктических городов от потенциальных близлежащих и удаленных источников в 1980–2050 гг. с учетом различных климатических сценариев. Выявлены общие тенденции к усилению опасности загрязнения атмосферы для человека в прогнозный период до 2050 г. на фоне изменений климата. Полученные результаты представляются важными для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности в Арктике при планировании пространственного развития АЗРФ и других территорий страны.

Ключевые слова: Арктическая зона Российской Федерации, загрязнение атмосферы, изменение климата, экологический риск, риск для здоровья, риск для растений.

Введение

Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) является стратегической ресурсной базой, локализацией жизненно важных интересов безопасности страны. Природная уникальность и чистота территории АЗРФ определяют хрупкость ее экологии. Загрязнение атмосферного воздуха является одной из актуальных экологических проблем [1–3] и представляет потенциальную опасность для здоровья населения [4–6] и природных экосистем [7; 8].

Наблюдаемые и прогнозируемые климатические изменения могут изменить уровень опасности, обусловленной загрязнением атмосферы. В частности, изменение общей циркуляции атмосферы в условиях изменяющегося климата может привести к заметному перераспределению количества поступа-

ющих загрязняющих веществ и областей, оказывающих влияние на различные районы Арктики при дальнейшем загрязнении [9; 10]. В связи с этим исследование экологических рисков, связанных с загрязнением атмосферного воздуха, представляет большой интерес для АЗРФ. И особенно актуально изучение рисков для здоровья населения и растений как важнейших критериев оценки экологической ситуации.

Целью настоящей работы является разработка методического подхода к оценке экологически обусловленных рисков (тенденций рисков) для здоровья населения и растений от загрязнения атмосферы с учетом изменения климата.

Область применения методического подхода — исследование динамики экологических рисков вследствие загрязнения атмосферы регионов, в частности территорий Арктической зоны, при стратегическом планировании пространственного

развития территорий в целях обеспечения экологической безопасности.

Методический подход направлен на решение следующих задач:

- оценка потенциальной опасности загрязнения для здоровья населения и растений региона от источников выбросов, расположенных как в рассматриваемом районе, так и за его пределами, включая источники трансграничного загрязнения, при различных сценариях изменения климата;
- определение источников или областей расположения источников, представляющих наибольшую потенциальную опасность для здоровья населения и растений рассматриваемого региона при различных сценариях изменения климата.

Метод и материалы исследования

Методический подход к оценке экологически обусловленного риска для здоровья населения базируется на методологии оценки риска от загрязнения окружающей среды Агентства по охране окружающей среды США (U.S. EPA) [11] и предполагает заблаговременную оценку канцерогенного и неканцерогенного риска.

Согласно [11], оценка канцерогенного риска от загрязнения атмосферы основывается на использовании единичного фактора риска [11—14], который характеризует вероятность онкологического заболевания на протяжении жизни человека вследствие воздействия химического вещества со среднегодовой концентрацией в воздухе, равной 1 мкг/м³:

$$r = \sum_{i=1}^N R_i q_i, \quad (1)$$

где r — индивидуальный риск онкологического заболевания; q_i — среднегодовая концентрация i -го вещества в атмосферном воздухе, мкг/м³; R_i — единичный фактор риска для i -го вещества, м³/мкг.

Пренебрежимо малым уровнем канцерогенного риска, который не требует никаких дополнительных мероприятий по его снижению, считаются значения $1 \cdot 10^{-6}$ и менее.

Возможное возникновение неонкологических заболеваний (неканцерогенный риск) вследствие загрязнения воздуха характеризуется показателем относительной опасности токсичного вещества, который представляет собой критический уровень содержания в атмосфере опасных веществ, действующих на человека в течение жизни. Критическими уровнями (критическими концентрациями) могут являться предельно допустимые концентрации (ПДК) или референтные концентрации, отражающие безопасный уровень воздействия. Оценка неканцерогенного риска как вероятности развития различных неонкологических заболеваний, обусловленных влиянием химических веществ, содержащихся в воздухе, проводится путем сравнения фактической и критической концентраций [11; 13—15]:

$$h = \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{H_j}, \quad (2)$$

где h — индекс опасности неонкологических заболеваний; H_j — показатель опасности j -го вещества, мкг/м³.

Приемлемым уровнем суммарного индекса опасности неонкологических заболеваний считается единица и менее (чем величина h больше единицы, тем более значительную опасность может представлять анализируемое воздействие).

Подход к оценке экологически обусловленного риска для растений вытекает из опыта оценки рисков от загрязнения атмосферы для здоровья человека, поскольку в настоящее время какие-либо руководящие и иные документы на этот счет отсутствуют или не известны авторам. В то же время имеется научно-исследовательский материал, основанный на опыте российских и зарубежных ученых, где по ряду веществ предложены ПДК веществ в атмосферном воздухе для растений, учитывающие вид растительности и характерный ландшафт или природно-климатическую зону [16; 17]. В связи с этим оценка экологического риска как опасности различных нарушений у растений выполняется по аналогии с оценкой неканцерогенного риска для человека — путем сравнения фактической концентрации примеси в атмосфере с критической или предельно допустимой концентрацией:

$$s = \sum_{m=1}^N \frac{q_m}{S_m}, \quad (3)$$

где s — индекс опасности загрязнения атмосферы для растений; S_m — показатель опасности m -го вещества для растений (ПДК для растений), мкг/м³.

Таким образом, показатели чувствительности организма человека и растений к концентрации в атмосферном воздухе загрязняющих веществ являются известными априори из результатов медицинских и биологических исследований. Главную трудность при решении поставленной задачи исследования экологических рисков представляет оценка концентраций примесей на территориях изучаемых районов, которая обусловлена рядом особенностей.

Первая особенность заключается в значительном количестве потенциальных источников, включая трансграничные, и наличии различных механизмов загрязнения атмосферы. Вторая особенность состоит в неопределенности относительно будущего воздействия на атмосферу: изменение количества, расположения и мощности источников выбросов.

Оценка концентраций может быть выполнена по крайней мере двумя способами. Первый состоит в многократном решении уравнения переноса примеси с источниками различной интенсивности и различным местоположением. Другой способ более наукоемкий, но требует только однократного реше-

ния сопряженной задачи [18], с помощью которого можно оценить степень потенциальной опасности загрязнения атмосферы в заданной зоне от всех источников, расположенных в области решения задачи, при заданных сценариях метеорологического режима атмосферы. Комбинированные подходы прямого и обратного моделирования, как подчеркнуто в [19], в последние годы все чаще применяются для связи результатов возможных воздействий, выраженных в виде целевых функционалов, с параметрами моделей и источников. Учитывая приведенные выше особенности, для оценки концентраций примесей с целью исследования динамики риска здоровью в данном случае целесообразно воспользоваться именно вторым способом, подробно изложенным авторами в [20; 21].

Для решения задачи будем рассматривать эволюцию примеси q в атмосфере над северным полушарием (область Ω) в пределах $0 \leq z \leq H$ (H — высота тропопавзы) со скоростью, характеризующей средний перенос в тропосфере. Для определенности будем считать, что это скорость движения воздуха на поверхности 500 гПа. Обобщение данного методического подхода на трехмерный случай осуществляется тривиально.

Основной задаче эволюции примеси [18, 20—22] ставится в соответствие сопряженная задача на основе тождества Лагранжа [18]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^*}{\partial t} - \frac{1}{a \sin \psi} \frac{\partial u q^*}{\partial \lambda} - \frac{1}{a \sin \psi} \frac{\partial v \sin \psi q^*}{\partial \psi} - \\ & - \frac{1}{a^2 \sin^2 \psi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \mu \frac{\partial q^*}{\partial \lambda} - \\ & - \frac{1}{a^2 \sin \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \mu \sin \psi \frac{\partial q^*}{\partial \psi} + \sigma q^* = p, \end{aligned} \quad (4)$$

$$q^* = 0 \text{ при } t = T,$$

где u, v — составляющие скорости ветра по долготе и широте соответственно; a — средний радиус Земли; μ — коэффициент горизонтального турбулентного обмена; $\sigma \geq 0$ — параметр, обратный величине интервала времени, за который интенсивность примеси по сравнению с начальной уменьшится в e раз, и характеризующий степень поглощения примеси каплями тумана, ее химические превращения, радиоактивный распад и др.; λ, ψ — долгота и широта сферической системы координат; t — время; функция p характеризует экологически значимые зоны G ($G \subset \Omega$), например районы расположения арктических городов.

Решение сопряженной задачи есть сопряженная функция q^* [18]. q^* — весовая функция, определяющая вклад каждого источника загрязнения I в величину загрязнения атмосферы в экологически значимой зоне (заданном районе) G .

Если в качестве основного рассматривать функционал

$$Q = (q, p) = \int_0^T dt \int_{\Omega} q p d\Omega,$$

то из тождества Лагранжа следует двойственная форма этого функционала [18]

$$Q = (q^*, I). \quad (5)$$

Выбрав в уравнении (4) функцию p в виде

$$p = \begin{cases} 1/(TG), & \vec{r} \in G \\ 0, & \vec{r} \notin G, \end{cases}$$

где $\vec{r} = (\lambda, \psi)$, получим функционал

$$Q = \int_0^T dt \int_{\Omega} I q^* d\Omega, \quad (6)$$

который будет характеризовать интегральный по территории рассматриваемого района G эффект загрязнения атмосферы за время T от источников, расположенных в области Ω . Таким образом, получаем выражение для решения первой задачи, обозначенной во Введении.

При решении второй задачи — по определению областей расположения источников, представляющих наибольшую опасность для населения и районов района G , — концентрацию примеси от источника, расположенного в отдельно взятой зоне k , принадлежащей области Ω , будет характеризовать функционал

$$Q_k = \int_0^T dt \int_{\Omega_k} I_k q_k^* d\Omega_k. \quad (7)$$

Исследование экологического риска выполняется на основе осредненных за определенный период (за год) концентраций загрязняющих веществ. Поэтому функционалы (6) и (7) принимают вид

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_{\Omega} I q^* d\Omega, \quad (8)$$

$$Q_k = \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_{\Omega_k} I_k q_k^* d\Omega_k. \quad (9)$$

С учетом (1) и (2) запишем выражения для расчета риска здоровью, обусловленного i -ми канцерогенными и j -ми неканцерогенными примесями:

• для решения первой задачи:

$$r_i = \frac{R_i}{T} \int_0^T dt \int_{\Omega} I_i q_i^* d\Omega \quad (10)$$

(канцерогенный риск),

$$h_j = \frac{1}{H_j T} \int_0^T dt \int_{\Omega} I_j q_j^* d\Omega \quad (11)$$

(опасность неонкологических заболеваний);

- для решения второй задачи:

$$r_{ik} = \frac{R_i}{T} \int_0^T dt \int_{\Omega_k} I_{ik} q_{ik}^* d\Omega_k \quad (12)$$

(канцерогенный риск),

$$h_{jk} = \frac{1}{H_j T} \int_0^T dt \int_{\Omega_k} I_{jk} q_{jk}^* d\Omega_k \quad (13)$$

(опасность неонкологических заболеваний).

Здесь R_i — единичный фактор риска для i -го вещества; H_j — показатель относительной опасности j -го вещества; I — интенсивность источника.

Запишем также в общем виде выражения для расчета экологических рисков для здоровья от примесей, выбрасываемых источниками области Ω :

$$r = \sum_{i=1}^N R_i Q_i \quad (\text{канцерогенный риск}), \quad (14)$$

$$h = \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{H_j} \quad (15)$$

(опасность неонкологических заболеваний).

Соответственно выражения для расчета рисков от источника k -й зоны области Ω :

$$r_k = \sum_{i=1}^N R_i Q_{ik} \quad (\text{канцерогенный риск}), \quad (16)$$

$$h_k = \sum_{j=1}^N \frac{Q_{jk}}{H_j} \quad (17)$$

(опасность неонкологических заболеваний).

Таким же образом с учетом (3) получаем выражения для расчета экологического риска для растений, обусловленного m -ми вредными примесями:

- для решения первой задачи:

$$s_m = \frac{1}{S_m T} \int_0^T dt \int_{\Omega} I_m q_m^* d\Omega \quad (18)$$

(опасность нарушений у растений),

- для решения второй задачи:

$$s_{mk} = \frac{1}{S_m T} \int_0^T dt \int_{\Omega_k} I_{mk} q_{mk}^* d\Omega_k \quad (19)$$

(опасность нарушений у растений).

Здесь S_m — показатель опасности m -го вещества для растений (ПДК для растений), $\text{мкг}/\text{м}^3$.

В общем виде выражения для расчета экологических рисков для растений от примесей таковы:

- поступающих от источников области Ω :

$$s = \sum_{m=1}^N \frac{Q_m}{S_m} \quad (20)$$

(опасность нарушений у растений),

- от источника k -й зоны области Ω :

$$s_m = \sum_{m=1}^N \frac{Q_{mk}}{H_m} \quad (\text{опасность нарушений у растений}). \quad (21)$$

При долгосрочных оценках информация о будущих выбросах и источниках может быть неизвестна. В этом случае методика позволяет рассматривать источник с единичным выбросом. Положим $I = \text{const}$ (для удобства записи ниже будем считать $I = 1$), тогда выражения (10)—(21) будут характеризовать единичные нормированные риски от загрязнения атмосферы только вследствие влияния погодноклиматических процессов. Если мощность источника станет известна (например, появятся план, сценарий, стратегия развития города, региона или будет рассматриваться влияние на регион конкретного источника или группы источников), будет достаточно (в линейном приближении влияния мощности источника, что допустимо при долгосрочном планировании) соответствующие члены подынтегральных выражений в (8)—(13), (18)—(19) или соответствующие слагаемые выражений (14)—(17), (20)—(21) умножить на фактическое значение выбросов.

Для решения сопряженного уравнения переноса и диффузии примеси и получения полей сопряженных функций используется численная модель, применявшаяся ранее в других работах авторов, включая решение сопряженной задачи в трехмерной постановке [21]. Поэтому ниже отметим только некоторые особенности ее построения.

Областью решения задачи является Северное полушарие. Сеточная область численной модели составляет 90×360 узлов. Шаг сетки модели — 1° . Для численного решения сопряженного уравнения турбулентной диффузии использован метод расщепления [18; 23].

Учет фотохимических процессов, коагуляции, поглощения каплями тумана и осадков, радиоактивного распада осуществляется неявно.

Поля ветра и других метеовеличин при расчетах берутся из реанализов либо из результатов сценарных расчетов изменения климата. Это обеспечивает возможность оценки тенденций экологических рисков в условиях изменяющегося климата.

Результаты и обсуждение

Для опробования представленного выше подхода выполнено исследование динамики единичного нормированного неканцерогенного риска для здоровья населения от загрязнения атмосферы микрочастицами PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ для пяти наиболее крупных городов Арктической зоны Российской Федерации, расположенных в различных районах, в 1980—2050 гг. с учетом изменения климата. В исследование были включены Мурманск, Архангельск, Салехард, Норильск и Анадырь.

Исследование риска для населения от загрязнения атмосферы микрочастицами обусловлено повышенной потенциальной опасностью этих ве-

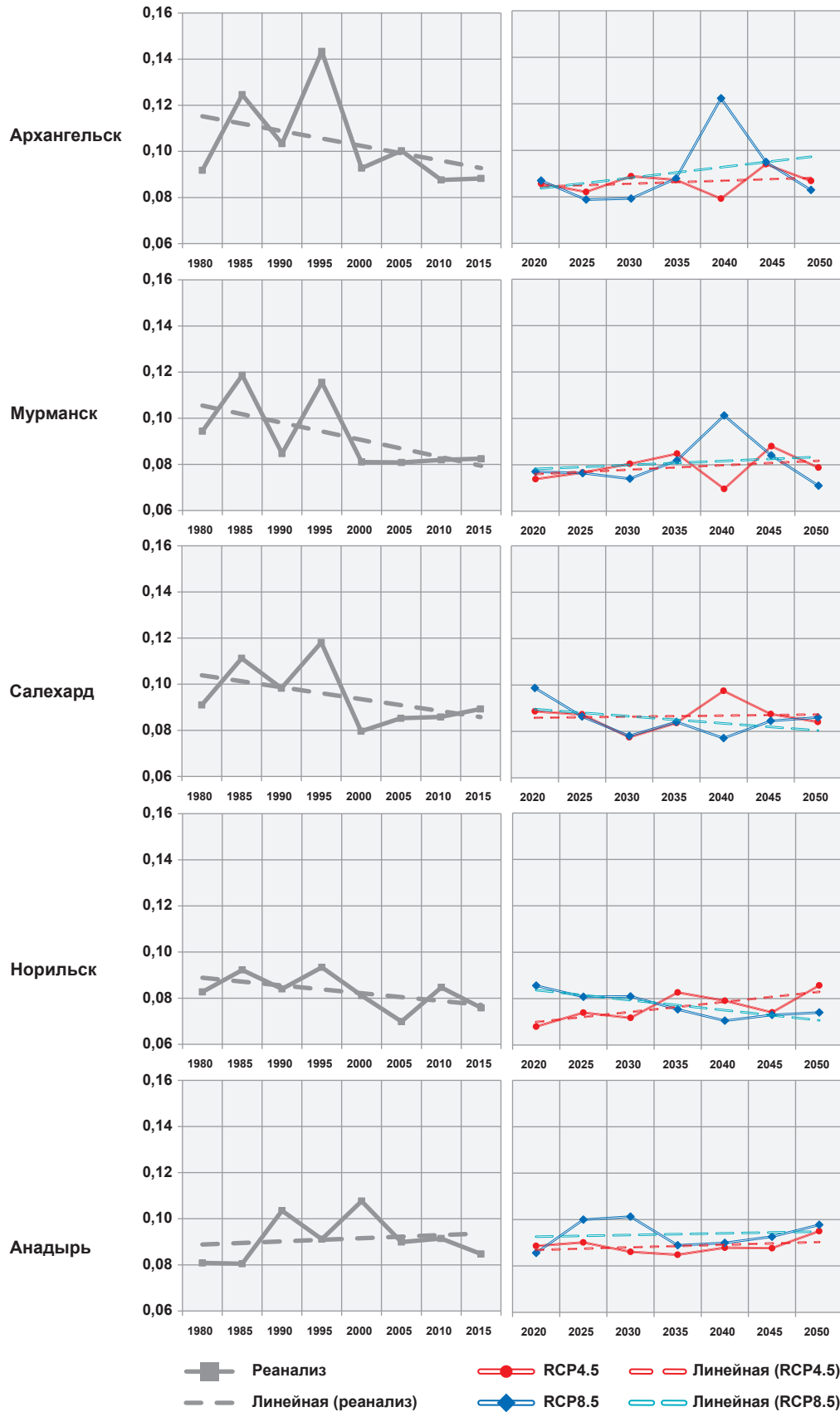


Рис. 1. Динамика единичного нормированного риска здоровью в городах АЗРФ от загрязнения атмосферы PM10, PM2.5 от потенциальных близлежащих и удаленных источников в 1980–2050 гг.
 Fig. 1. Dynamics of a unit normalized health risk in the cities of the Russian Arctic due to atmospheric pollution PM10, PM2.5 from potential nearby and remote sources in 1980–2050

ществ, которые по сути представляют собой смесь с разнообразными физическими и химическими характеристиками в зависимости от происхождения (продукты промышленности, сгорания топлива, транспорта, сельского хозяйства, природных пожаров, биологические агенты — микроорганизмы, пыльца и др.), и возможностью их переноса на тысячи километров от источника из урбанизированных и промышленных районов, районов природных пожаров, газо- и нефтедобычи, государств ближнего зарубежья [24].

Для каждого города проводилась оценка динамики риска от загрязнения атмосферы PM₁₀, PM_{2.5} вследствие выбросов от всех возможных источников, расположенных как в районе конкретного города и региона, так и за его пределами, включая источники трансграничного поступления примесей. С этой целью для изучаемых городов рассчитаны среднегодовые значения неканцерогенных рисков в виде индексов относительной опасности неонкологических заболеваний по двум веществам (PM₁₀, PM_{2.5}) с 1980 по 2050 гг. с шагом пять лет. При этом проводилось две серии расчетов с учетом двух характерных сценариев изменения климата в XXI столетии — «умеренного» (RCP4.5) и «жесткого» (RCP8.5), соответствующих различному уровню воздействия на климатическую систему. В качестве необходимых полей метеовеличин использовались данные реанализов [25; 26] для периода 1980—2020 гг. и данные расчетов по климатической модели Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН для периода 2025—2050 гг. (по сценариям RCP4.5 и RCP8.5) [27; 28].

На рис. 1 представлены графики динамики риска по рассматриваемым городам в 1980—2050 гг. с интервалом в пять лет с учетом различных климатических сценариев.

Расчеты показывают, что города, принадлежащие к различным районам АЗРФ, в 1980—2050 гг. характеризуются весьма неоднородной динамикой риска для здоровья от загрязнения атмосферы с точки зрения влияния погодно-климатического фактора. При этом прогнозируемая динамика риска по климатическим сценариям не всегда продолжает тенденции, наблюдаемые по ретроспективным данным.

За прошедшие несколько десятилетий (с 1980 по 2020 гг.) в арктических городах европейской части России, а также Западной и Восточной Сибири прослеживалась тенденция к снижению рассматриваемого риска с учетом погодно-климатических процессов. Заметное снижение (более 10%) отмечено в Архангельске, Салехарде и Норильске. Особенно выражена эта тенденция в Мурманске — более чем на 20%.

В дальневосточной части АЗРФ, представителем которой выступает Анадырь, за прошедший период отмечается незначительный рост показателей опасности загрязнения атмосферы (менее 10%).

В прогностический период 2025—2050 гг. при «умеренном» сценарии изменения климата RCP4.5 практически без динамики остается риск в Салехарде. В остальных городах намечается тенденция к увеличению риска: незначительная (менее 10%) — на территории европейской России (в Архангельске и Мурманске) и на Дальнем Востоке (в Анадыре), заметная (до 20%) — в Норильске.

При более «жестком» климатическом сценарии RCP8.5 динамика риска по городам более разнообразна. В арктических городах европейской территории России и на Дальнем Востоке на протяжении ближайших десятилетий ожидаются условия, способствующие повышению риска для здоровья. Незначительное увеличение риска характерно для Мурманска и Анадыря. Более выраженные изменения (рост опасности на 20%) прогнозируется в Архангельске. В Арктической зоне Сибири намечается тренд к снижению опасности загрязнения атмосферы для человека. Незначительное снижение риска ожидается для Салехарда, заметное снижение — для Норильска.

В целом для обоих сценариев по рассматриваемым городам характерны тенденции к незначительным или заметным, но вполне умеренным изменениям уровней риска для здоровья, которые, однако, по-разному распределены по территории АЗРФ.

На рис. 2 представлена оценка динамики единичного нормированного риска для здоровья от загрязнения атмосферы микрочастицами PM₁₀, PM_{2.5} с точки зрения влияния погодно-климатических процессов за 1980—2050 гг.

Поскольку риск для здоровья вследствие загрязнения атмосферы зависит не только от эмиссии источников, но и в значительной степени обусловлен погодно-климатическими процессами, полученные оценки динамики риска тесно связаны с особенностями вариаций переноса примесей, выявленными в ходе проведенного ранее исследования динамики загрязнения атмосферы регионов России в XXI столетии [10; 21].

Помимо представленных выше результатов была решена вторая задача — изучение пространственно-временной динамики областей расположения источников загрязнения атмосферы повышенного риска по отношению к одному из наиболее крупных из рассматриваемых городов — Архангельску при различных сценариях изменения климата («умеренного» — RCP4.5 и «жесткого» — RCP8.5).

На основе предложенного подхода по заданным сценариям выполнена оценка и построены карты динамики единичного нормированного неканцерогенного риска от загрязнения атмосферы микрочастицами PM₁₀, PM_{2.5} в 1980—2050 гг., который может создавать потенциальный источник выбросов, расположенный в различных областях относительно изучаемого города. Расчеты выполнялись при тех же условиях, что и в приведенной выше первой задаче.

| Город | По данным реанализа в 1980—2020 гг. | Климатический сценарий RCP 4.5 в 2025—2050 гг. | Климатический сценарий RCP 8.5 в 2025—2050 гг. |
|-------------|-------------------------------------|--|--|
| Мурманск | 25 | 7 | 6 |
| Архангельск | 18 | 6 | 20 |
| Салехард | 18 | — | 6 |
| Норильск | 13 | 19 | 16 |
| Анадырь | 6 | 5 | 2 |

| | | | | |
|--------------|-------------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| — | < 10 | 10—20 | 20—30 | — рост риска |
| | < 10 | 10—20 | 20—30 | — снижение риска |
| без динамики | незначительная динамика | заметная динамика | выраженная динамика | |

Рис. 2. Динамика единичного нормированного риска для здоровья в городах АЗРФ от загрязнения атмосферы PM10, PM2.5 от потенциальных близлежащих и удаленных источников в 1980—2050 гг., %
Fig. 2. Dynamics of a unit normalized health risk in the cities of the Russian Arctic due to atmospheric pollution with PM10, PM2.5 from potential nearby and remote sources in 1980—2050, %

Поскольку представление в статье всех карт за рассматриваемый период требует значительного их уменьшения в масштабе и ведет, таким образом, к крайне низкой информативности, ниже в качестве примера показаны две карты для Архангельска с одной из наибольших и наименьших по площади областей расположения источников повышенного риска за 1995 и 2040 гг. при сценарии климата RCP4.5 (рис. 3). Области различного цвета демонстрируют уровень риска, создаваемого источником в изучаемом городе при расположении источника в данной области.

Анализ полученных результатов показал, что при обоих климатических сценариях на исследуемой территории отмечается тенденция к усилению в начале XXI в. атмосферной турбулентности и соответственно к улучшению условий рассеивания примесей на севере европейской территории России. Как следствие в 2010—2025 гг. отмечается сужение зоны расположения источников, создающих максимальный уровень риска в районе Архангельска. Фактически область более высокого риска, отличающаяся на порядок, уменьшается по нескольким направлениям относительно Архангельска на сотни километров.

Это означает, что на порядок снижается опасность для здоровья населения в районе Архангельска от удаленных источников выбросов микрочастиц. Однако уже в 1930-х годах наметилась некоторая тенденция к увеличению риска от загрязнения атмосферы. При этом данная тенденция более выражена при «жестком» климатическом сценарии RCP8.5.

Как и во второй половине XX в., в первой половине XXI столетия главное влияние на севере евро-

пейской территории России (в районе Архангельска) ожидается от источников выбросов микрочастиц, расположенных на западном-юго-западном направлении относительно города. При трансграничном загрязнении опасность представляют источники на территориях скандинавских государств, Прибалтики, стран Восточной и Центральной Европы, Украины и Белоруссии. Однако в XXI столетии вектор опасности по обоим сценариям смещается в сторону влияния источников, расположенных на южном направлении — в центре и на юге европейской территории России (при трансграничном загрязнении, прежде всего на территориях кавказских государств и Казахстана).

Таким образом, можно отметить за 1980—2050 гг. наличие определенной пространственно-временной динамики и межсценарной изменчивости уровней риска с точки зрения влияния погодноклиматических процессов.

Необходимо подчеркнуть, что полученные оценки риска намного ниже приемлемого уровня (единицы). Это связано с тем, что оценивался единичный нормированный риск — риск, обусловленный источником интенсивностью 1 г/с, который, однако, может быть расположен в любой точке (зоне) рассматриваемой территории. Фактическое значение риска, как указывалось выше (в линейном приближении влияния мощности источника, что допустимо при долгосрочном планировании), можно получить путем умножения единичного нормированного риска на фактическое значение интенсивности источника.

В целом с учетом известных неопределенностей, свойственных долгосрочным оценкам, представленные результаты следует рассматривать как тен-

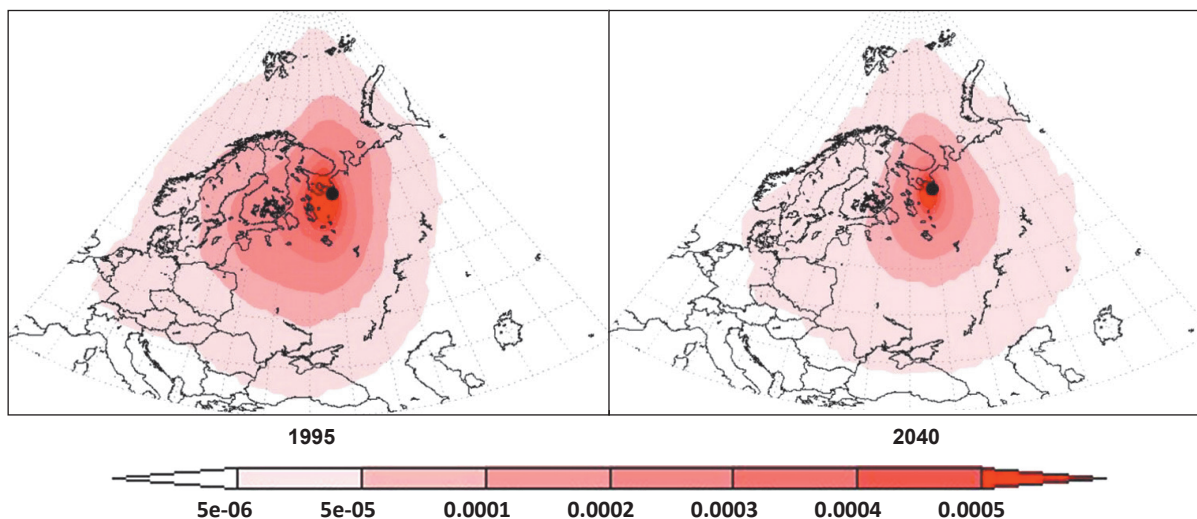


Рис. 3. Динамика единичного нормированного риска здоровью для Архангельска от потенциального источника PM10, PM2.5, расположенного в различных областях относительно Архангельска, в 1995 и 2040 гг. при сценарии климата RCP4.5 (Архангельск показан черной точкой)

Fig. 3. Dynamics of a unit normalized health risk for Arkhangelsk from potential source of PM10, PM2.5 located in various areas relative to Arkhangelsk in 1995 and 2040 under the climate scenario RCP4.5 (Arkhangelsk is shown by a black dot)

денции изменения экологически обусловленного риска для здоровья населения арктических городов России.

Заклучение

Сформулирован методический подход к оценке экологических рисков для человека и растительности от загрязнения атмосферы с учетом изменяющегося климата, который может применяться для арктических территорий.

С помощью этого подхода исследована динамика риска для здоровья населения наиболее крупных городов АЗРФ (Мурманска, Архангельска, Салехарда, Норильска и Анадыря) от загрязнения атмосферы PM10, PM2.5 потенциальными близлежащими и удаленными источниками (включая источники трансграничного загрязнения) в 1980—2050 гг. с точки зрения влияния погодно-климатических факторов по двум базовым сценариям в XXI столетии.

Расчеты показали, что за прошедшие четыре десятилетия в городах европейской и сибирской частей российской Арктики отмечалась некоторая заметная динамика к снижению рассматриваемого риска; на Дальнем Востоке, напротив, наблюдалось незначительное увеличение риска. Исследование будущих трендов до 2050 г. показало общие тенденции к усилению опасности загрязнения атмосферы для человека на фоне прогнозируемых изменений климата. Лишь при «жестком» климатическом сценарии RCP8.5 наряду с направленностью к повышению риска в арктических городах европейской территории России и Дальнего Востока в арктических городах Сибири намечилось снижение риска. При анализе полученных результатов

обращает на себя внимание выраженная динамика к увеличению риска для здоровья в Архангельске (наиболее густонаселенном городе АЗРФ) при «жестком» сценарии климата и в Норильске при «умеренном» сценарии климата.

Для Архангельска также исследована пространственно-временная динамика областей расположения источников загрязнения, которые могут создавать повышенный риск для здоровья в районе Архангельска, в 1980—2050 гг. при различных сценариях изменения климата в XXI в.

Результаты указывают на наличие определенной пространственно-временной динамики и межсценарной изменчивости уровней риска в районе Архангельска в 1980—2050 гг.: на умеренное сужение зоны повышенного риска в первой четверти XXI в. и некоторую тенденцию к увеличению риска во второй четверти текущего столетия. При «жестком» климатическом сценарии RCP8.5 тенденция к увеличению риска выражена более заметно. В период до 2050 г. главное влияние на здоровье населения в районе Архангельска ожидается от источников выбросов, расположенных с запада и юго-запада. При трансграничном загрязнении основную опасность представляют источники на территориях скандинавских государств, Прибалтики, стран Восточной и Центральной Европы, Украины и Белоруссии. Однако следует отметить следующую тенденцию: в XXI в. вектор опасности по обоим сценариям смещается в сторону влияния источников, расположенных на южном направлении.

В целом полученные при решении вышеприведенных задач выводы важны для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности

в российской Арктике при планировании пространственного развития АЗРФ и других территорий страны. В частности, требуется определенная осторожность при планировании экономического развития территорий страны, влияющих на загрязнение атмосферы в арктических районах. Кроме того, повышается актуальность контроля трансграничного загрязнения атмосферы со стороны западных, а также южных государств.

Работа подготовлена в рамках государственного задания.

Литература

1. *Виноградова А. А., Веремейчик А. О.* Модельные оценки содержания антропогенной сажи (black carbon) в атмосфере Российской Арктики // *Оптика атмосферы и океана*. — 2013. — Т. 26. — С. 443—451.
2. *Акимов В. А., Козлов К. А., Косоруков О. А.* Современные проблемы Арктической зоны Российской Федерации. — М.: ВНИИ ГОЧС, 2014. — 308 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». — М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. — 844 с.
4. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2018 году: Государственный доклад. — М.: Федер. служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2019. — 254 с.
5. *Салтыкова М. М., Бобровницкий И. П., Балакаева А. В.* Влияние загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения арктического региона: обзор литературы // *Экология человека*. — 2020. — № 4. — С. 48—55. — DOI: 10.33396/1728-0869-2020-4-48-55.
6. *Чащин В. П., Гудков А. Б., Попова О. Н. и др.* Характеристика основных факторов риска нарушений здоровья населения, проживающего на территориях активного природопользования в Арктике // *Экология человека*. — 2014. — № 1. — С. 3—12.
7. *Белоусова М. Е., Слобода А. А., Жильцов Д. В.* Состояние эпифитного лишайникового покрова в условиях загрязнения атмосферного воздуха Архангельского промузла // *Биомониторинг в Арктике: Сборник тезисов докладов участников международной конференции (26—27 ноября 2018 года)* / Отв. ред. Т. Ю. Сорокина; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. — Архангельск: САФУ, 2018. — С. 15—17.
8. Arctic Biodiversity Assessment: Report for Policy Makers / Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF). — Akureyri, Iceland, 2013.
9. *Маноско А. А., Матешева А. В.* Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы Арктической зоны России в 1980—2050 гг. с учетом сценариев изменения климата // *Арктика: экология и экономика*. — 2020. — № 1 (37). — С. 45—52. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-45-52.
10. *Makosko A. A., Matesheva A. V.* Assessment of the effect of long-range transport on air pollution trends for different Russian regions // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — 2020. — Vol. 606, iss. 012034. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/606/1/012034>.
11. Risk Assessment Guidelines. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments / Air Toxics Hot Spots Program. — U.S. EPA, California, 2015. — 231 p.
12. Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines. — Pt. 2: Technical Support Document for Cancer Potency Factors / Air Toxics Hot Spots Program. — U.S. EPA, California, 2009. — 89 p.
13. Integrated Risk Information System (IRIS) Database / U.S. EPA. — URL: <http://www.epa.gov/IRIS/>.
14. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. — Утв. гл. гос. санитар. врачом Рос. Федерации 5 марта 2004 г. — М.: Федер. центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. — 340 с.
15. Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines: Technical Support Document for the Derivation of Noncancer Reference Exposure Levels / Air Toxics Hot Spots Program. — U.S. EPA, California, 2008. — 131 p.
16. *Пименова Е. В., Насртдинова Т. Ю., Лихачёв С. В.* Гигиеническое и экологическое нормирование качества окружающей среды: Учебное пособие / М-во сел. хоз-ва РФ; Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Перм. гос. аграрно-технолог. ун-т им. акад. Д. Н. Прянишникова». — Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2017. — 151 с.
17. *Коплан-Дикс В. А., Алехова М. В.* К вопросу разработки экологических нормативов качества атмосферного воздуха. — 2009. — URL: <https://distant.msu.ru/mod/resource/view.php?id=14264>.
18. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
19. *Пененко В. В., Цветова Е. А., Пененко А. В.* Развитие вариационного подхода для прямых и обратных задач гидротермодинамики и химии атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. — 2015. — Т. 51, № 3. — С. 358—367. — DOI: 10.7868/S0002351515030098.
20. *Маноско А. А., Матешева А. В.* Оценка тенденций дальнего загрязнения атмосферы регионов российской Арктики в XXI в. // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 4 (28). — С. 59—71. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-59-71.
21. *Маноско А. А., Матешева А. В.* Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. — М.: Рос. акад. наук, 2020. — 257 с.
22. *Алоян А. Е.* Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. — М.: ИВМ РАН, 2002. — 201 с.
23. *Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б.* Математические модели в геофизической гидродинами-

- ке и численные методы их реализации. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 296 с.
24. Воздействие взвешенных частиц на здоровье: Значение для разработки политики в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии / Всемир. орг. здравоохранения, Европ. регион. бюро. — Копенгаген, 2013. — 15 с.
25. Saha S. et al. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010 / Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Lab. — 2010. — URL: <https://doi.org/10.5065/D6513W89>.
26. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999 / Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Lab. — URL: <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.
27. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP4.5, served by ESGF / World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. — [S. l.], 2013. — URL: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r4>.
28. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5, served by ESGF / World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. — [S. l.], 2013. — URL: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.

Информация об авторах

Макоско Александр Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3), заместитель главного ученого секретаря Президиума РАН (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 14), e-mail: aam@presidium.ras.ru.

Матешева Анна Владимировна, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Россия, Москва, Пыжевский пер., д. 3), доцент, Российский университет транспорта (127994, ГСП-4, Россия, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), e-mail: matesheva@ifaran.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Макоско А. А., Матешева А. В. К оценке экологических рисков от загрязнения атмосферы Арктической зоны в условиях изменяющегося климата в XXI в. // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 34—45. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-34-45.

ON THE ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISKS FROM AIR POLLUTION IN THE ARCTIC ZONE UNDER A CHANGING CLIMATE IN THE XXI CENTURY

Makosko, A. A.

Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (Moscow, Russian Federation)

Matesheva, A. V.

Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS, Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

The article was received on August 27, 2021

Abstract

The article formulates a methodological approach to assessing environmental risks from atmospheric pollution in the Arctic zone under a changing climate. It is based on the US EPA's health risk assessment methodology and impurity concentration estimates by solving the adjoint equation for impurities transport and diffusion.

The authors investigate the dynamics of health risk from atmospheric pollution PM10, PM2.5 in the areas of five arctic cities due to emissions from potential nearby and remote sources (including sources of transboundary pollution) in 1980—2050 taking into account various scenarios of climate change. The results indicate general tendency towards an increase in the danger of air pollution for humans in the forecast period until 2050 against the background of climate changes.

The authors study the spatio-temporal dynamics in the location areas of PM10, PM2.5 sources that create the highest health risk in relation to Arkhangelsk. The results show the moderate narrowing of the high-risk zone in the first quarter of the XXI century and some upward trend in risk in the second quarter of this century. In the period up to 2050, the main impact on public health in the Arkhangelsk region is expected from emission sources located in the west and southwest. At the same time, the authors prove a tendency towards an increase in the influence of sources located in the southwestern and southern directions. In case of transboundary pollution, sources in the Scandinavian states, Baltics, the countries of Eastern and Central Europe, Ukraine and Belarus pose a danger.

The results are important to develop proposals for ensuring the environmental safety in Arctic when planning the spatial development of the Russian Arctic zone and other country territories.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation, atmospheric (air) pollution, climate change, environmental risk, health risk, risk to plants.

The work was prepared within the state assignment.

References

1. Vinogradova A. A., Veremeychik A. O. Model estimates of the content of anthropogenic black carbon (black carbon) in the atmosphere of the Russian Arctic. *Optika atmosfery i okeana*, 2013, vol. 26, pp. 443—451. (In Russian).
2. Akimov V. A., Kozlov K. A., Kosorukov O. A. Actual problems of the Arctic zone of the Russian Federation. Moscow, VNIIGChS, 2014, 308 p. (In Russian).
3. State report “On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2018. Moscow, Minprirody Rossii, NPP “Kadastr”, 2019, 844 p. (In Russian).
4. On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2018: State report. Moscow, Feder. sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteli i blagopoluchiya cheloveka, 2019, 254 p. (In Russian).
5. Saltykova M. M., Bobrovnikskii I. P., Balakaeva A. V. Air pollution and population health in the Russian Arctic: a literature review. *Ekologiya cheloveka*, 2020, no. 4, pp. 48—55. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-4-48-55. (In Russian).
6. Chashchin V. P., Gudkov A. B., Popova O. N., Odland Yu. O., Kovshov A. A. Description of main health deterioration risk factors for populations living on territories of active natural management the Arctic. *Ekologiya cheloveka*, 2014, no. 1, pp. 3—12. (In Russian).
7. Belousova M. E., Sloboda A. A., Zhiltsov D. V. The state of the epiphytic lichen cover when the air pollution of the Arkhangelsk industrial hub. *Biomonitring v Arktike: sbornik tezisov dokladov uchastnikov mezhdunarodnoy konferentsii (26—27 noyabrya 2018 goda)*. Otv. red. T. Yu. Sorokina; Sev. (Arktich.) feder. un-t im. M. V. Lomonosova. Arkhangelsk, SAFU, 2018, pp. 15—12. (In Russian).
8. Arctic Biodiversity Assessment: Report for Policy Makers. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF). Akureyri, Iceland, 2013.
9. Makosko A. A., Matesheva A. V. Assessment of the long-range pollution trends of the atmosphere in the Arctic zone of Russia in 1980—2050 considering climate change scenarios. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy]. 2020, no. 1 (37), pp. 45—52. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-45-52. (In Russian).
10. Makosko A. A., Matesheva A. V. Assessment of the effect of long-range transport on air pollution trends for different Russian regions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 606, iss. 012034. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/606/1/012034>.
11. Risk Assessment Guidelines. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. Air Toxics Hot Spots Program. U.S. EPA, California, 2015, 231 p.
12. Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines Part II: Technical Support Document for Cancer Potency Factors. Air Toxics Hot Spots Program. U.S. EPA, California, 2009. 89 p.
13. Integrated Risk Information System (IRIS) Database. U.S. EPA. Available at: <http://www.epa.gov/IRIS/>.
14. Guidelines for Assessing public health risk when chemicals polluting the environment: P 2.1.10.1920-04. *Utv. gl. gos. sanit. vrachom Ros. Federatsii 5 marta 2004 g.* Moscow, Feder. tsentr Gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004, 340 p. (In Russian).
15. Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines: Technical Support Document for the Derivation of Noncancer Reference Exposure Levels. Air Toxics Hot Spots Program, U.S. EPA, California, 2008, 131 p.
16. Pimenova E. V., Nasrtdinova T. Yu., Likhachev S. V. Hygienic and ecological regulation of the environment quality: a tutorial. *M-vo sel. khoz-va RF, Feder. gos. budget. obrazovat. Uchrezhdenie vyssh. obrazovaniya “Perm. gos. agrarno-tehnolog. un-t im. akad. D. N. Pryanishnikova*. Perm, IPTs “Prokrost”, 2017, 151 p. (In Russian).

17. *Koplan-Diks V. A., Alekhova M. V.* On the development of environmental standards for atmospheric air quality. 2009. Available at: <https://distant.msu.ru/mod/resource/view.php?id=14264>. (In Russian).
18. *Marchuk G. I.* Mathematical modeling in the environmental problem. Moscow, Nauka, 1982, 320 p. (In Russian).
19. *Penenko V. V., Tsvetova E. A., Penenko A. V.* Development of variational approach for direct and inverse problems of atmospheric hydrodynamics and chemistry. Proceedings of the RAS. Atmospheric and Oceanic Physics, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 311—319. DOI: 10.1134/S0001433815030093.
20. *Makosko A. A., Matesheva A. V.* Evaluations of the frequency pollution trends of the atmosphere of the regions of the Russian Arctic in the 21st century. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2017, no. 4 (27), pp. 59—71. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-59-71. (In Russian).
21. *Makosko A. A., Matesheva A. V.* Air pollution and the quality of population life in the XXI century: threats and prospects. Moscow, Russian Academy of Sciences, 2020, 257 p. (ISBN 978-5-907036-71-0). (In Russian).
22. *Aloyan A. E.* Dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere. Moscow, IVM RAN, 2002, 201 p. (In Russian).
23. *Marchuk G. I., Dymnikov V. P., Zalesnyy V. B.* Mathematical models in geophysical hydrodynamics and numerical methods for their implementation. Moscow, Gidrometeoizdat, 1987, 296 p. (In Russian).
24. Health effects of particulate matter: Policy implications for countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. WHO: Regional Office for Europe. Copenhagen, 2013, 14 p.
25. *Saha S. et al.* NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Lab. 2010. Available at: <https://doi.org/10.5065/D6513W89>.
26. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Lab. — Available at: <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.
27. *Volodin E., Diansky N.* INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP4.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. I.], 2013. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r4>.
28. *Volodin E., Diansky N.* INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. I.], 2013. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.

Information about the authors

Makosko, Alexander Arkadievich, Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of Laboratory, Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (3, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017), Deputy Chief Scientific Secretary of the Presidium of the RAS, Russian Academy of Sciences (14, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: aam@presidium.ras.ru.

Matesheva, Anna Vladimirovna, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Leading Researcher, Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (3, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017), Associate Professor, Russian University of Transport (9-9, Obraztsova str., Moscow, Russia, GSP-4, 127994), e-mail: matesheva@ifaran.ru.

Bibliographic description of the article

Makosko, A. A., Matesheva, A. V. On the assessment of environmental risks from air pollution in the Arctic zone under a changing climate in the XXI century. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 34—45. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-34-45. (In Russian).