

ИССЛЕДОВАНИЕ РИСКА ДЛЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ АЗРФ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА (В 1980—2050 гг.)

А. А. Макоско

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

А. В. Матешева, О. В. Лысова

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

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2022 г.

Исследована динамика риска для растений АЗРФ от загрязнения атмосферы SO_2 потенциальными источниками в 1980–2050 гг. с учетом климатических сценариев. В прогнозный период до 2050 г. показана незначительная динамика риска, характеризующаяся межсценарной изменчивостью и дисперсией по территории АЗРФ, обусловленная изменением общей циркуляции атмосферы. В целом при «умеренном» сценарии (RCP4.5) отмечена тенденция к увеличению риска для растений, при «жестком» сценарии (RCP8.5) – к снижению. Полученные результаты актуальны при стратегическом планировании развития АЗРФ и мер по обеспечению ее экологической безопасности.

Ключевые слова: АЗРФ, загрязнение атмосферы, изменение климата, риск для растений.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является одной из актуальных экологических проблем [1–3] и представляет потенциальную опасность как для здоровья человека [4; 5], так и для природных экосистем [6–8]. При этом известно [9–11], что наряду с человеком растения в целом обладают большей чувствительностью к воздействию загрязнения атмосферы, а также имеют видовые отличия по степени чувствительности к загрязняющим веществам [8–15]. Так, согласно [11; 14], наиболее чувствительными к воздействию токсичных веществ являются лишайники. Затем следуют хвойные деревья, лиственные деревья, травянистые растения и сельскохозяйственные культуры.

АЗРФ характеризуется относительно низким уровнем урбанизации по сравнению с более южными районами страны. Значительные площади здесь

представлены естественными растительными ландшафтами. Существенную часть территории АЗРФ занимают природные заповедники [16]. Для таких нетронутых или малоосвоенных человеком территорий существенное значение в экологическом плане представляют пространственно отдаленные объекты хозяйственной деятельности и источники выбросов в воздушную среду. Таким образом, состояние растительных экосистем российской Арктики является чутким индикатором дальнего, в том числе трансграничного загрязнения атмосферы.

Наблюдаемые и прогнозируемые климатические изменения могут изменить уровень опасности для природы Арктики, обусловленной загрязнением атмосферного воздуха. В частности, изменение общей циркуляции атмосферы в условиях меняющегося климата может привести к заметному изменению количества поступающих в Арктику загрязняющих веществ и областей, оказывающих влияние на ее различные районы при дальнем загрязнении [17; 18]. В связи с этим высоко актуальность для

экологической безопасности АЗРФ представляет исследование рисков, связанных с загрязнением атмосферного воздуха, и особенно изучение риска для растений как важнейшего критерия оценки экологической ситуации.

Метод и материалы исследования

Подход к исследованию риска для растительности от загрязнения атмосферного воздуха основан на опыте оценки рисков от загрязнения атмосферы для здоровья человека [19–23], поскольку в настоящее время какие-либо руководящие и иные документы на этот счет отсутствуют или неизвестны авторам.

Наиболее полная доступная научно-методическая информация по оценке экологического риска для различных компонентов и представителей окружающей среды содержится на портале Агентства по охране окружающей среды США (U.S. EPA) [24]. Из этих материалов следует, что оценка риска от загрязнения атмосферы, в частности для растений, базируется на тех же принципах, что и оценка риска для здоровья человека.

Также имеются научно-исследовательские материалы российских и зарубежных ученых, в которых по ряду веществ предложены предельно допустимые концентрации (ПДК) или критические уровни содержания в атмосферном воздухе для растений, учитывающие вид растительности и характерный ландшафт или природно-климатическую зону [9–15]. Необходимо отметить, что данные нормативы носят рекомендательный характер [25].

В связи с этим возможное возникновение различных нарушений у растений вследствие загрязнения воздуха (риск) можно охарактеризовать с помощью показателя относительной опасности токсичного вещества, который представляет собой критический уровень содержания в атмосфере опасных веществ, воздействующих на растения. Критическими уровнями (критическими концентрациями) могут являться ПДК или референтные концентрации, отражающие безопасный уровень воздействия. В этом случае оценка риска как опасности различных нарушений у растений вследствие загрязнения атмосферного воздуха выполняется по аналогии с оценкой неканцерогенного риска для человека — путем сравнения фактической концентрации примеси в атмосфере с критической или предельно допустимой концентрацией:

$$s = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{S_i}, \quad (1)$$

где s — индекс опасности загрязнения атмосферы для растений; q_i — фактическая концентрация i -го вещества в атмосфере; S_i — показатель опасности i -го вещества для растений (ПДК для растений), мкг/м³.

Показатели опасности S_i известны a priori из результатов биологических исследований.

Приемлемым уровнем суммарного индекса опасности загрязнения для растений может считаться единица и менее (чем величина s больше единицы, тем более значительную опасность может представлять анализируемое воздействие).

Существенную трудность представляет оценка концентраций примесей на территориях изучаемых районов АЗРФ, которая обусловлена рядом особенностей.

Первая особенность — значительное количество потенциальных источников, включая трансграничные, и наличие различных механизмов загрязнения атмосферы. Вторая особенность заключается в неопределенности количества, расположения и мощности источников потенциального воздействия на атмосферу.

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 решения сопряженной задачи [26], 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 [27], в последние годы все чаще применяются для связи результатов возможных воздействий, выраженных в виде целевых функционалов, с параметрами моделей и источников. Учитывая указанные особенности, для оценки концентраций примесей с целью исследования риска для растений в данном случае целесообразно воспользоваться именно вторым способом, подробно изложенным авторами в [28–30].

Для решения задачи рассматривается эволюция примеси q в атмосфере над Северным полушарием (область Ω) в пределах $0 \leq z \leq H$ (H — высота тропопаузы) 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 [26; 28–31] ставится в соответствие сопряженная задача на основе тождества Лагранжа [26]:

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

$q^* = 0$ при $t = T$, где u, v — составляющие скорости ветра по долготе и кошироте 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 коширота сферической системы координат; t — время; функция p характеризует экологически значимые зоны G ($G \in \Omega$), например, различные районы Арктической зоны; $0 \leq t \leq T$, T — заблаговременность (интервал) расчетов.

Решение сопряженной задачи есть сопряженная функция q^* [26], которая является весовой функцией, определяющей вклад каждого источника загрязнения I в величину загрязнения атмосферы в экологически значимой зоне (заданном районе) G .

Если в качестве основного рассматривать функционал

$$Q = (q, p) = \int_0^T dt \int_G q p d\Omega,$$

то из тождества Лагранжа следует двойственная форма этого функционала [26]

$$Q = (q^*, I). \quad (3)$$

Выбрав в уравнении (2) функцию p в виде

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

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

$$Q = \int_0^T dt \int_G I q^* d\Omega, \quad (4)$$

который будет характеризовать интегральный по территории рассматриваемого района G эффект загрязнения атмосферы за время T от источников, расположенных в области Ω .

Исследование риска для растений от загрязнения атмосферы выполняется на основе осредненных за определенный период T (за год) концентраций загрязняющих веществ. Поэтому функционал (4) принимает вид

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T dt \int_G I q_i^* d\Omega. \quad (5)$$

Относя выражение (5) к i -му загрязняющему веществу, с учетом (1) запишем выражение для расчета риска растениям, обусловленного i -й примесью в атмосферном воздухе [30]:

$$s_i = \frac{1}{S_i T} \int_0^T dt \int_G I_i q_i^* d\Omega. \quad (6)$$

В общем виде выражение для расчета риска для растений от загрязнения атмосферы всеми загрязняющими веществами, поступающими от источников области Ω , примет вид

$$s = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{S_i}. \quad (7)$$

При долгосрочных оценках информация о будущих (потенциальных) выбросах и источниках, как правило, отсутствует. В этом случае представляется естественным рассматривать источник с единичным выбросом. Тогда выражения (6) и (7) будут характеризовать единичные нормированные риски от загрязнения атмосферы только вследствие влияния погодно-климатических процессов. В случае, если мощность источника станет известна (например, появится 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 (5) и (6) или соответствующие слагаемые выражения (7) 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 [29]. 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 [26; 32].

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

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

Расчеты выполнялись для АЗРФ, которая была разделена на несколько районов, совпадающих с экономическими районами России¹ (в рамках материковой арктической территории) и полностью или частично — с границами федеральных округов. Поскольку некоторые районы (Западно-Сибирский, Восточно-Сибирский, Дальневосточный) имеют большую пространственную протяженность и на данных территориях отмечается существенная диф-

¹ Общероссийский классификатор экономических регионов. ОК 024-95. — Утв. постановлением Госстандарта России от 27 декабря 1995 г. № 640 (ред. от 27 декабря 2018 г.).

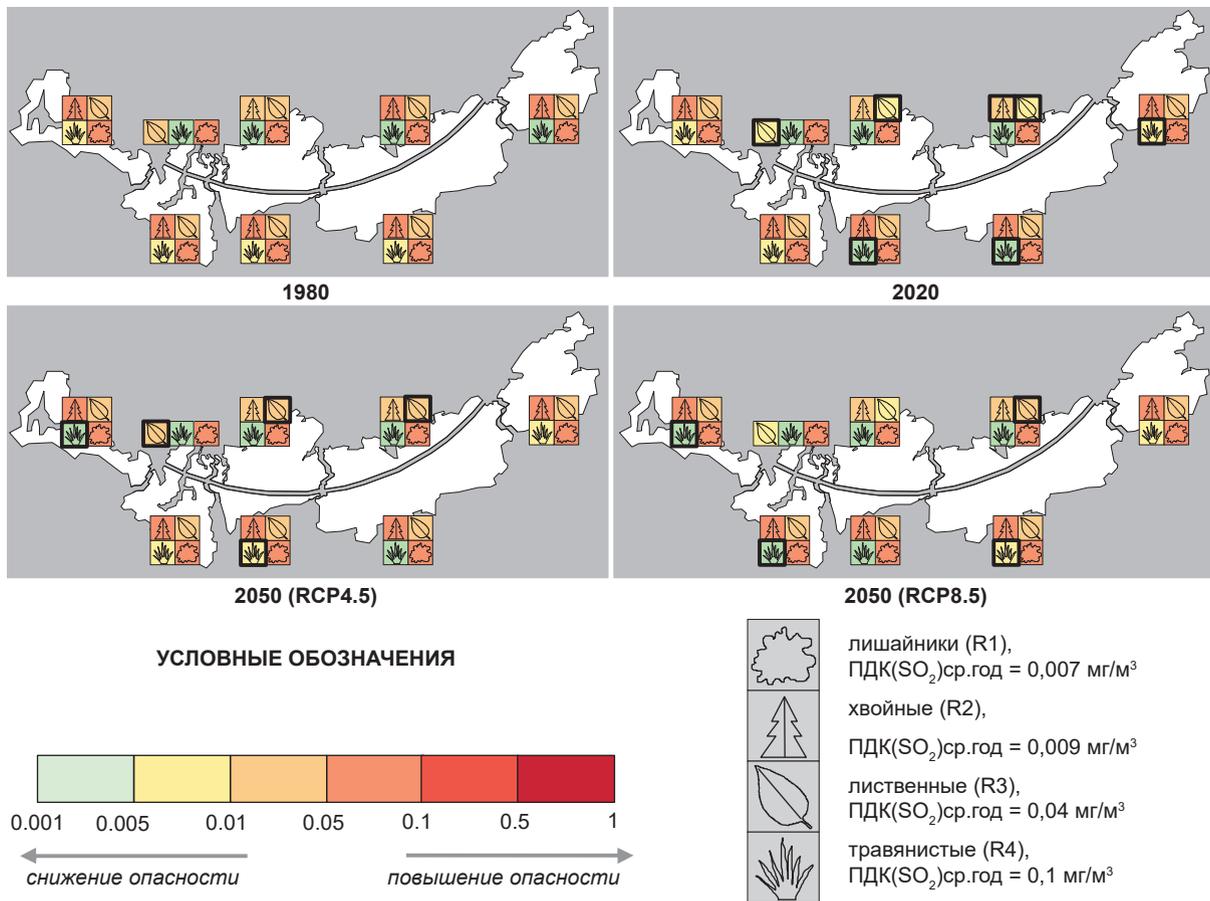


Рис. 1. Распределение единичного нормированного риска от загрязнения атмосферы SO₂ для различных растений по районам российской Арктики для 1980, 2020 и 2050 гг. с учетом климатических сценариев (жирной линией выделены изменения риска относительно предыдущей временной точки)

Fig. 1. Distribution of a single normalized risk from SO₂ atmospheric pollution for various plants in the regions of the Russian Arctic for 1980, 2020 and 2050, taking into account climate scenarios bold line indicates changes in risk relative to the previous time point)

ференциация видов экономической деятельности, обусловленная климато-географическими условиями, при расчетах данные территории были дополнительно разделены на несколько частей.

В частности, отдельно выделены северные части указанных районов выше 70° северной широты. Сюда вошла территория западнее полуострова Таймыр, полуостров Таймыр и зона восточнее Таймыра. Дальневосточный экономический район ниже 70° с. ш. в границах АЗРФ также разделен на две зоны: западную — Республику Саха (Якутия) и восточную — Чукотский автономный округ.

В итоге указанного разделения выделено восемь экологически значимых зон, для которых исследовался риск для растительных экосистем от загрязнения атмосферы. Для каждой из обозначенных зон рассчитаны среднегодовые значения единичного нормированного риска от загрязнения атмосферы диоксидом серы SO₂ для различных растений (растительных ландшафтов) с 1980 по 2050 гг. с шагом пять лет. При этом проводились 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 [33]. В качестве необходимых полей метеовеличин использовались данные реанализов [34; 35] 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) [36; 37].

В процессе исследования рассматривались риски для растений с учетом их физиологических особенностей и степени чувствительности к атмосферным загрязнителям: R1 — для лишайников, R2 — для хвойных пород, R3 — для лиственных пород, R4 — для травянистых растений, для которых предложены различные уровни ПДК по диоксиду серы [11]. При этом для каждой из экологически значимых зон рассчитывался свой набор рисков, который определялся на основании анализа биомов АЗРФ, насчитывающих с учетом подтипов более 20 разновидностей [38; 39]. Принцип включения в расчет растений был таков: учитывались все растения, произрастающие на территории конкретной зоны, в том числе присут-

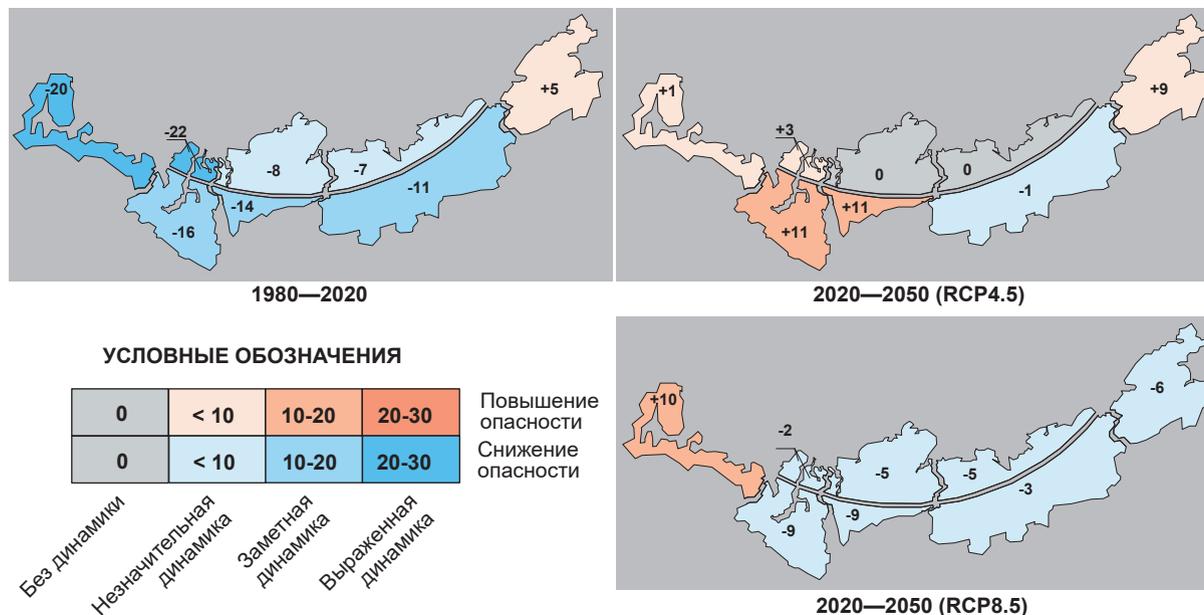


Рис. 2. Динамика единичного нормированного риска (в процентах за рассматриваемый период) от загрязнения атмосферы SO₂ для растительности материковой части российской Арктики в 1980–2050 гг. с учетом климатических сценариев
Fig. 2. Dynamics of a single normalized risk (in percent for the period under review) from SO₂ atmospheric pollution for the vegetation of the mainland of the Russian Arctic in 1980–2050, taking into account climate scenarios

ствующие в небольшом количестве. Согласно данному принципу практически для всех экологически значимых зон рассматривались риски для четырех групп растений за исключением территории западнее полуострова Таймыр, где отмечено отсутствие хвойных растений.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлено распределение рассчитанного единичного нормированного риска от загрязнения атмосферы диоксидом серы для различных растений по материковым районам российской Арктики для опорных временных точек, характеризующих начало (1980 г.) и конец (2050 г.) рассматриваемого периода, а также настоящее время (2020 г.). Риск за 2050 г. показан с учетом двух сценариев изменения климата.

Полученные результаты характеризуются низкими уровнями опасности (риск считается повышенным, если индекс опасности выше единицы). Это связано с тем, что риск определялся путем сравнения с ПДК фактической концентрации, обусловленной крайне низкой эмиссией. Кроме того, оценка выполнялась всего лишь по одному загрязняющему веществу. При необходимости и наличии данных полученные результаты можно нормировать на реальные значения выбросов, тогда уровни риска вполне могут оказаться гораздо более значимыми.

Неоднородность риска по арктическим районам и по времени в данном случае обусловлена влиянием исключительно климатических факторов. В то же

время на рисунках видно, что в некоторых районах для одних растений (лишайников, хвойных) отсутствует видимая динамика риска, для других (лиственных, травянистых) заметна. Это объясняется различиями в предельно допустимых концентрациях вещества для разных растений: от самых низких значений для лишайников до самых высоких для травянистых.

Дальнейшее исследование заключается в том, чтобы проследить динамику риска для растений Арктики за рассматриваемый период. Это позволит выявить тенденции риска для растительных экосистем для обеспечения экологической безопасности АЗРФ при стратегическом планировании пространственного развития этих территорий.

На рис. 2 представлена динамика единичного нормированного риска для растительных экосистем в материковых районах российской Арктики от загрязнения атмосферы диоксидом серы с точки зрения влияния погодно-климатических процессов за период 1980–2050 гг. Отдельно показаны тренды за прошедшие десятилетия (1980–2020 гг.) и динамика риска на прогнозируемом отрезке времени (2020–2050 гг.). Значения трендов на территории каждого района показаны одной цифрой, поскольку в исследовании изучается влияние исключительно климатических изменений, и динамика риска для всех растений внутри одного района будет одинакова.

Расчеты показывают, что территория АЗРФ в 1980–2050 гг. характеризуется неоднородной динамикой риска для растительности 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 четыре десятилетия на большей части арктического пространства России наблюдалась тенденция к снижению опасности для растений от загрязнения атмосферы. В некоторых районах динамика достаточно выражена (на европейской территории и севере Западной Сибири выше 70° с. ш.) — тренд порядка 20%. В остальной сибирской части Арктики снижение риска заметно (тренд около 15%) ниже 70° с. ш. и не является значимым (тренд менее 10%) выше 70° с. ш. На Дальнем Востоке в целом динамика риска также незначительная: в западной части и выше 70° с. ш. — незначительная тенденция к снижению, в восточной части — к росту.

Исследование будущих трендов на большей части арктической территории показало незначительную динамику риска. При этом на фоне более мягкого климатического сценария RCP4.5 в целом можно отметить тенденцию к изменению опасности для растений от загрязнения атмосферы с отрицательного на положительный знак, т. е. повышение риска. Наибольшие изменения риска отмечаются в Сибири ниже 70° с. ш.

При сценарии RCP8.5, напротив, наблюдается малозначимое снижение риска практически на всей территории АЗРФ за исключением севера европейской территории России, где изменение риска наиболее заметно и имеет положительный знак.

В целом за 1980—2050 гг. можно отметить наличие определенной динамики и межсценарной изменчивости рассматриваемого риска с точки зрения влияния погодно-климатических факторов. Отмеченные в прогнозируемом периоде межсценарные различия обусловлены сложной динамикой процессов и обратными связями в климатической системе Земли.

Характер динамики риска в данном случае объясняется изменением направлений дальнего (в том числе трансграничного) атмосферного переноса загрязняющих веществ, в результате чего меняются количество поступающих примесей и области (источники) влияния на арктические районы при дальнем загрязнении. Этот процесс — результат активизации меридионального переноса воздушных масс из-за вариаций циркуляции атмосферы вследствие изменений климата. В этой связи, обратившись к ранее проведенным исследованиям тенденций дальнего загрязнения атмосферы на территории российской Арктики за рассматриваемый период [17], можно проследить общее сходство в динамике риска для растительности и вариациях направлений переноса загрязняющих примесей. Так, в целом более высокая вариабельность в направлениях дальнего поступления примесей характерна для севера европейской территории России, районов Сибири ниже 70° с. ш., восточной части Дальнего Востока.

В основном именно на этих территориях прослеживается и наибольшая динамика риска. С учетом результатов, представленных в [17], в прогнозируемом периоде область наиболее опасных для растительности Арктики источников загрязнения атмосферы сместится с ЗЮЗ-ЮЗ на ЮЮЗ-ЮВ направления по отношению к районам АЗРФ.

Учитывая известные неопределенности, свойственные долгосрочным оценкам, представленные результаты следует рассматривать как тенденции изменения риска для растительных экосистем российской Арктики от загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата.

Заключение

На основе сформулированного методического подхода исследована динамика риска для растительных экосистем на материковой территории российской Арктики от загрязнения атмосферы диоксидом серы потенциальными источниками (включая источники трансграничного загрязнения) в 1980—2050 гг. с точки зрения влияния погодно-климатических факторов по двум базовым сценариям изменения климата.

Расчеты показали, что за прошедшие четыре десятилетия на большей части арктического пространства России наблюдалась тенденция к снижению опасности для растений от загрязнения атмосферы. В некоторых районах эта тенденция была достаточно заметна (север европейской территории России и Западная Сибирь). Исследование будущих трендов на большей части Арктической зоны показало незначительную динамику риска, характеризующуюся, однако, определенной межсценарной изменчивостью. На фоне более мягкого климатического сценария (RCP4.5) на территории АЗРФ становится заметной некоторая дисперсия в направлении тренда опасности, но в целом можно отметить тенденцию к увеличению риска для растений. В то же время при сценарии RCP8.5 тренд опасности ослабевает за исключением севера европейской России, где происходит увеличение риска порядка 10%. Отмеченная динамика риска и межсценарная изменчивость обусловлены изменением общей циркуляции атмосферы из-за изменений климата и, как следствие, изменением количества поступающей примеси и областей (источников) влияния на районы АЗРФ при дальнем загрязнении с ЗЮЗ-ЮЗ на ЮЮЗ-ЮВ направления.

Поскольку значительная часть АЗРФ представлена естественными растительными ландшафтами, включая природные заповедники, полученные выводы и в целом подобные исследования актуальны при стратегическом планировании развития арктических территорий и мер по обеспечению их экологической безопасности, в частности, сохранению природной идентичности российской Арктики.

Работа подготовлена в рамках госзадания.

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 2020 году» / Минприроды России; МГУ им. М. В. Ломоносова. — М., 2021. — 864 с.
4. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. — М.: Федер. служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. — 256 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. 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. (Аркт.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова. — Архангельск: САФУ, 2018. — С. 15—17.
7. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF). Arctic Biodiversity Assessment: Report for Policy Makers. CAFF. — Akureyri, Iceland, 2013.
8. Полищук Ю. М., Токарева О. С. Методические вопросы картографирования зон экологического риска воздействия нефтедобычи на растительный покров // Изв. Том. политехн. ун-та. — 2011. — Т. 318, № 1. — С. 166—169.
9. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1985. — 272 с.
10. Пименова Е. В., Насртдинова Т. Ю., Лихачев С. В. Гигиеническое и экологическое нормирование качества окружающей среды: Учебное пособие / М-во сельского хоз-ва РФ, ФГБОУВО «Пермский гос. аграрно-технолог. ун-т им. акад. Д. Н. Прянишникова». — Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2017. — 151 с.
11. 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>.
12. Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. / World Health Organization. Regional Office for Europe. — 2000. — URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335>.
13. Nali C., Pucciarriello C., Lorenzini G. Mapping Ozone Critical Levels for Vegetation in Central Italy // Water,

- Air, & Soil Pollution. — 2002. — 141. — С. 337—347. — URL: <https://doi.org/10.1023/A:1021314016284>.
14. Mills G. et al. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. — Chapter 3: Mapping critical levels for vegetation / ICP Vegetation Programme Coordination Centre, Centre for Ecology and Hydrology. — Bangor, UK, 2017. — 66 p. — URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2017/AIR/EMEP/Final__new_Chapter_3_v2_August_2017_.pdf.
15. Cape J. N. et al. Evidence for changing the critical level for ammonia // Environmental Pollution. — 2009. — Vol. 157, iss. 3. — P. 1033—1037. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.049>.
16. Горбатовский В. В., Тишков А. А., Белоновская Е. А. и др. Атлас государственных природных заповедников России (к 100-летию заповедной системы России). — М.: Рус. геогр. о-во, ИГРАН, НП «Прозрач. мир», Роскартография, 2017. — 512 с.
17. 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.
18. Makosko A. A., Matessheva 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>.
19. Air Toxics Hot Spots Program, 2015: Risk Assessment Guidelines. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments / U.S. EPA, California. 231 p.
20. Air Toxics Hot Spots Program, 2009: Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines. Pt. II: Technical Support Document for Cancer Potency Factors / U.S. EPA, California, 89 p.
21. Integrated Risk Information System (IRIS) Database / U.S. EPA. — URL: <http://www.epa.gov/IRIS/>.
22. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: Р 2.1.10.1920-04. — Утв. главным гос. санитарным врачом Рос. Федерации 5 марта 2004 г. Введ. 5 марта 2004 г. — М.: Федер. центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. — 340 с.
23. Air Toxics Hot Spots Program, 2008: Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines: Technical Support Document for the Derivation of Noncancer Reference Exposure Levels. U.S. EPA, California. — 131 p.
24. Ecological Risk Assessment / U.S. EPA. — URL: <https://www.epa.gov/risk/ecological-risk-assessment>.
25. Шарыгина И. О., Игнатьева Ю. С., Вельбовец Ю., Столярова С. А. Перспективы развития экологического нормирования качества атмосферного воздуха в рамках реализации положений Федерально-

- го закона от 21.07.2014 № 219-ФЗ // Управление качеством. — 2019. — № 12.
26. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
27. 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.
28. Маюско А. А., Матешева А. В. Оценки 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.
29. Маюско А. А., Матешева А. В. Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. — М.: Рос. акад. наук, 2020. — 257 с.
30. Маюско 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.
31. Алоян А. Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. — М.: ИВМ РАН, 2002. — 201 с.
32. Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 296 с.
33. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. — 151 p.
34. 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. — URL: <https://doi.org/10.5065/D6513W89>.
35. 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>.
36. 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. — URL: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r4>.
37. 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. — URL: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.
38. Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / Под ред. Г. Н. Огуреевой. — М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. — 623 с.
39. Огуреева Г. Н., Леонова Н. Б., Булдакова Е. В. и др. Карта «Биомы России» 1:7 500 000: Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Всемир. фонд дикой природы, 2018.

Информация об авторах

Маюско Александр Аркадьевич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий лабораторией, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3), заместитель президента РАН, Российская академия наук (119991, Москва, Ленинский просп., д. 14), e-mail: aam@pran.ru.

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

Лысова Ольга Владимировна, инженер-исследователь, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3), аспирант, Российский университет транспорта (127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), e-mail: lov1998@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Маюско А. А., Матешева А. В., Лысова О. В. Исследование риска для растительных экосистем АЗРФ от загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата (в 1980—2050 гг.) // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 138—148. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-138-148.

STUDY OF THE RISK FOR PLANT ECOSYSTEMS OF THE RUSSIAN ARCTIC FROM ATMOSPHERIC POLLUTION IN A CHANGING CLIMATE (1980—2050)

Makosko, A. A.

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

Matesheva, A. V., Lysova, O. V.

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

The article was received on September 19, 2022.

Abstract

The authors studied the risk dynamics for plant ecosystems on the mainland of the Russian Arctic from atmospheric pollution by sulfur dioxide from potential sources (including sources of transboundary pollution) in 1980—2050 in terms of the impact of weather and climatic factors under two base scenarios of climate change (RCP4.5 and RCP8.5).

They used the U.S. EPA environmental health risk assessment methodology basing on critical levels of substances in ambient air for plants, taking into account vegetation group and characteristic landscape or natural-climatic zone. Methodology for estimating the impurity concentration is based on solving the adjoint equation of impurity transfer and diffusion.

Calculations have revealed that in most of the Russian Arctic over the past four decades, there has been a downward tendency in the hazard to plants from atmospheric pollution. In some areas, this tendency is significant (the north of the ETR and Western Siberia). A study of further trends in most of the Arctic zone showed insignificant risk dynamics, characterized, however, by some inter-scenario variability. Against the background of a milder climatic scenario (RCP4.5), some scatter in the direction of the hazard trend becomes noticeable in the Russian Arctic, but in general, a trend towards an increase in risk for plants can be noted. At the same time, under the RCP8.5 scenario, the hazard trend decreases, with the exception of the north of the ETR, where there is an increase in risk of about 10%. The observed risk trends and inter-scenario variability are due to changes in overall atmospheric circulation from climate change and, as a result, changes in the amount of incoming impurity concentrations and areas (sources) of influence on the Russian Arctic regions during long-range pollution from NW-SW to SW-SE directions.

The findings are relevant to strategic planning of the development of the Arctic territories and measures to ensure environmental safety, in particular, for the preservation of the natural identity of the Russian Arctic.

Keywords: *Russian Arctic, atmospheric pollution, climatic changes, risk for 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, 864 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, Federalnaya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley 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. *Human Ecology*, 2020, no. 4, pp. 48—55. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-4-48-55. (In Russian).
6. 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. *Arkhangelsk, SAFU*, 2018, pp. 15—12. *Biomonitoring 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). (In Russian).
7. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF). Arctic Biodiversity Assessment: Report for Policy Makers. CAFF. Akureyri, Iceland, 2013.
8. Polishchuk Yu. M., Tokareva O. S. Methodological issues of mapping the environmental risk zone of the impact of oil production or plant cover. *Izvestiya Tomsk Polytechnic Univ.*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 166—169. (In Russian).

9. Berlyand M. E. Prediction and Regulation of Air Pollution. Leningrad, Hydrometeoizdat, 1985, 272 p. (In Russian).
10. Pimenova E. V., Nasrtdinova T. Yu., Likhachev S. V. Hygienic and ecological regulation of the environment quality: a tutorial. M-vo sel'skogo khoz-va RF, federalnoe gos. budg. obraz. Permskiy gos. agrarno-tekhnologicheskii un-t im. akad. D. N. Pryanishnikova. Perm, IPTs "Prokrost", 2017, 151 p. (In Russian).
11. 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).
12. Air quality guidelines for Europe, 2nd ed. World Health Organization. Regional Office for Europe. 2000. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107335>.
13. Nali C., Pucciariello C., Lorenzini G. Mapping Ozone Critical Levels for Vegetation in Central Italy. Water, Air, & Soil Pollution, 2002, 141, pp. 337–347. Available at: <https://doi.org/10.1023/A:1021314016284>.
14. Mills G. et al. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Chapter 3: Mapping critical levels for vegetation. ICP Vegetation Programme Coordination Centre, Centre for Ecology and Hydrology. Bangor, UK, 2017, 66 p. Available at: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2017/AIR/EMEP/Final_new_Chapter_3_v2_August_2017_.pdf.
15. Cape J. N. et al. Evidence for changing the critical level for ammonia. Environmental Pollution, 2009, vol. 157, iss. 3, pp. 1033–1037. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.09.049>.
16. Gorbatovsky V. V., Tishkov A. A., Belonovskaya E. A. et al. Atlas of the state nature reserves of Russia (to the 100th anniversary of the reserve system of Russia). Moscow, Russian Geographical Society, IgRAN, NP "Transparent World", Roskartografiya, 2017, 512 p. (In Russian).
17. 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).
18. 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>.
19. Air Toxics Hot Spots Program, 2015: Risk Assessment Guidelines. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. U.S. EPA, California, 231 p.
20. Air Toxics Hot Spots Program, 2009: Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines Part II: Technical Support Document for Cancer Potency Factors. U.S. EPA, California, 89 p.
21. Integrated Risk Information System (IRIS) Database. U.S. EPA. Available at: <http://www.epa.gov/IRIS/>.
22. Guidelines for Assessing public health risk when chemicals polluting the environment: R 2.1.10.1920-04. Moscow, Federalnyy tsentr Gossanepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004, 340 p. (In Russian).
23. Air Toxics Hot Spots Program, 2008: Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines: Technical Support Document for the Derivation of Noncancer Reference Exposure Levels. U.S. EPA, California, 131 pp.
24. Ecological Risk Assessment. U.S. EPA. Available at: <https://www.epa.gov/risk/ecological-risk-assessment>.
25. Sharygina I. O., Ignateva Yu. S., Velbovec Yu. I., Stolyarova S. A. Prospects for the development of environmental regulation of atmospheric air quality in the framework of the implementation of the provisions of Federal Law No. 219-FZ of 21.07.2014. Upravlenie kachestvom, 2019, no. 12. (In Russian).
26. Marchuk G. I. Mathematical modeling in the environmental problem. Moscow, Nauka, 1982, 320 p. (In Russian).
27. 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. (In Russian).
28. 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).
29. 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. (In Russian).
30. Makosko A. A., Matesheva A. V. On the assessment of environmental risks from air pollution in the Arctic zone in a changing climate in the 21st century. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, no. 12, no. 1, pp. 34–45. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-34-45. (In Russian).
31. Aloyan A. E. Dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere. Moscow, IVM RAN, 2002, 201 p. (In Russian).
32. Marchuk G. I., Dymnikov V. P., Zalesnyi V. B. Mathematical models in geophysical hydrodynamics and numerical methods for their implementation. Moscow, Gidrometeoizdat, 1987, 296 p. (In Russian).
33. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014, 151 p.
34. Saha S. et al. 2010. 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. Available at: <https://doi.org/10.5065/D6513W89>.

35. 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>.

36. 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. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r4>.

37. 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. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.

38. Biodiversity of Russian biomes. Equal biomes. Ed. by G. N. Ogureeva. Moscow, FGBU "IGKE", 2020, 623 p. (In Russian).

39. Ogureeva G. N., Leonova N. B., Buldakova E. V. et al. The Biomes of Russia Map 1:7 500 000. 2nd edition, revised and expanded. Moscow, Vsemirnyi fond dikoi prirody, 2018. (In Russian).

Information about the authors

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

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

Lysova, Olga Vladimirovna, Research Engineer, Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (3, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017), Postgraduate, Russian University of Transport (9-9, Moscow, Obraztsova str., 127994, GSP-4), e-mail: lov1998@yandex.ru.

Bibliographic description of the article

Makosko, A. A., Matesheva, A. V., Lysova, O. V. Study of the risk for plant ecosystems of the Russian Arctic from atmospheric pollution in a changing climate (1980—2050). *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2023, vol. 13, no. 1, pp. 138—148. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-138-148. (In Russian).

© Makosko A. A., Matesheva A. V., Lysova O. V., 2023