

О тенденциях рисков для здоровья от загрязнения атмосферы и изменения погодно-климатической комфортности на территории России до 2050 года

А. А. Макоско^{* * * *}, А. В. Матешева^{* * * *},

С. В. Емелина^{* * * *}

Исследованы тенденции рисков здоровью человека, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением погодно-климатической комфортности, на территории России за 2020—2050 гг. с учетом двух климатических сценариев. В целом ожидается умеренная динамика рисков, характеризующаяся межсценарной изменчивостью и дисперсией по климатическим районам страны. В отдельных районах отмечены весьма заметные тренды, прежде всего, на территории Сибири. Показана необходимость в дополнительном внимании при планировании мер адаптации к изменениям климата в южных и центральных областях европейской части России, на большей части территории Западной Сибири, в Магаданской области и на Камчатке.

Ключевые слова: изменение климата, загрязнение атмосферы, риск для здоровья, погодно-климатическая комфортность, адаптация.

DOI: 10.52002/0130-2906-2024-2-107-119

Введение

Наблюдаемые в последние десятилетия изменения климата, которые в России, особенно в высоких широтах, происходят быстрее и масштабнее [5, 15], чем в среднем по земному шару, ведут к изменению комфортности (характерных погодно-климатических условий), что может приводить к угрозам здоровью человека в виде повышения заболеваемости и снижения производительности труда. В загрязненной атмосфере данные угрозы становятся более опасными, поскольку изменение метеорологических условий способно усиливать неблагоприятное воздействие вредных примесей на организм [12]. Например, при потеплении климата в Северном полушарии возрастет вероятность таких явлений погоды, как штормы, тайфуны, ураганы, увеличится число дней с высокой температурой воздуха, когда, как правило, наблюдается и повышенный уровень загрязнения атмосферы [8, 15]. В дополнение к этому вариации общей циркуляции атмосферы

^{*} Российская академия наук; e-mail: aam@pran.ru (Макоско Александр Аркадьевич).

^{**}Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук.

^{***}Российский университет транспорта.

^{****}Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации.

вследствие изменений климата могут привести к заметному перераспределению количества поступающих примесей и областей (источников), оказывающих влияние на регионы при дальнейшем загрязнении [7, 21]. Это в том числе означает возможное изменение уровня общего загрязнения атмосферы и качества воздуха на различных территориях. В связи с этим изучение рисков, связанных с влиянием на человека загрязнения атмосферы и с изменением погодно-климатической комфортности на территории России в условиях изменяющегося климата, представляет научный и практический интерес.

Целью настоящей работы является изучение тенденций рисков для здоровья, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением комфортности погодно-климатических условий, на территории России за 2020—2050 гг. при различных сценариях климатических изменений.

Метод и материалы исследования

1. Исследование риска для здоровья вследствие загрязнения атмосферы под влиянием погодно-климатических процессов в условиях меняющегося климата основывается на методологии оценки риска для здоровья от загрязнения окружающей среды Агентства по охране окружающей среды США (US EPA) [17] и предполагает оценку общего токсического эффекта для организма (неканцерогенного риска). Оценка риска как вероятности развития неонкологических заболеваний, обусловленных загрязнением атмосферы, проводится путем сравнения расчетной среднегодовой и критической концентраций [13, 16, 17, 20]:

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

где h — индекс относительной опасности неонкологических заболеваний (индекс опасности для здоровья) от загрязнения атмосферы; q_i — расчетная среднегодовая концентрация i -го вещества в атмосфере, $\text{мкг}/\text{м}^3$; H_i — критическая концентрация i -го вещества, $\text{мкг}/\text{м}^3$. Приемлемым уровнем суммарного индекса опасности неонкологических заболеваний считается единица и менее.

Существенную трудность в исследовании представляет оценка концентраций примесей, которая обусловлена рядом особенностей.

Первая особенность заключается в значительном количестве потенциальных источников, включая трансграничные, и наличии различных механизмов загрязнения атмосферы, вторая — в неопределенности количества, расположения и мощности источников потенциального воздействия на атмосферу.

В связи с этим для оценки концентраций применен метод решения сопряженной задачи [7, 8, 10], 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.

Отметим, что комбинированные подходы прямого и обратного моделирования, как подчеркнуто в работе [23], все чаще применяются для связи результатов возможных воздействий, выраженных в виде целевых функционалов, с параметрами моделей и источников.

Для решения задачи рассматривается перенос примеси q в атмосфере над Северным полушарием (область Ω) в пределах $0 \leq z \leq H$ (H — высота тропопаузы) со скоростью, характеризующей среднее перемещение в тропосфере (для определенности отнесем его к поверхности 500 гПа). Обобщение данного методического подхода на трехмерный случай осуществляется тривиально.

Следуя основной задаче переноса и диффузии примеси [3, 8—10], ставим в соответствие сопряженную задачу на основе тождества Лагранжа [10]:

$$\frac{q^*}{t} - \frac{1}{a \sin \theta} \frac{u q^*}{a \sin \theta} - \frac{1}{a \sin \theta} \frac{v \sin \theta}{a \sin \theta} \frac{q^*}{a^2 \sin^2 \theta} - \frac{q^*}{a^2 \sin \theta} \sin \theta \frac{q^*}{q^*} = p, \quad (2)$$

где $q^* = 0$ при $t = T$; u, v — составляющие скорости ветра по долготе и кошироте соответственно, м/с; a — средний радиус Земли, м; K — коэффициент горизонтального турбулентного обмена, м²/с; θ_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., с⁻¹; θ, φ — долгота и коширота сферической системы координат, град; p — функция, характеризующая экологически значимые зоны G ($G \subset \Omega$); t — время, с; $0 \leq t \leq T$, T — заблаговременность (интервал) расчетов, с.

Решение сопряженной задачи есть сопряженная функция q^* [10], 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

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

то из тождества Лагранжа следует двойственная форма этого функционала [10]

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

Выбрав в уравнении (2) функцию p в виде

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

где $\vec{r} = (\theta, \varphi)$, получим функционал

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

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

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

$$Q = \frac{1}{T_0} \int_0^T dt I q^* d. \quad (5)$$

Относя выражение (5) к i -му веществу, с учетом (1) запишем выражение для расчета индекса опасности для здоровья, обусловленного i -й примесью в атмосферном воздухе [9]:

$$h_i = \frac{1}{H_i T_0} \int_0^T dt I_i q_i^* d. \quad (6)$$

В общем виде выражение для расчета индекса опасности для здоровья от загрязнения атмосферы всеми примесями, поступающими от источников области, примет вид

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

При долгосрочных оценках информация о будущих выбросах и источниках, как правило, отсутствует. В этом случае представляется возможным рассматривать источник с единичным выбросом. Тогда выражения (6) и (7) будут характеризовать единичные нормированные риски или индексы опасности от загрязнения атмосферы только вследствие влияния погодноклиматических процессов. Если мощность источника станет известна (например, появится план развития территории или будет рассматриваться влияние на регион конкретного источника), 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 [8]. Поэтому ниже отметим только некоторые особенности ее построения.

Область решения задачи охватывала Северное полушарие. Сеточная область численной модели составляет $90^\circ \times 360^\circ$ узлов. Шаг сетки модели — 1° . Для численного решения сопряженного уравнения турбулентной диффузии использован метод расщепления [10, 11]. Учет фотохимических процессов, коагуляции, поглощения каплями тумана и осадков, радиоактивного распада осуществляется неявно через параметр γ в (2) [7, 8]. Поля ветра и других метеовеличин для расчетов по численной модели авторов берутся либо из реанализов, либо из результатов сценарных расчетов изменения климата. Это обеспечивает возможность оценки динамики риска в условиях изменяющегося климата.

В качестве данных об изменении климата в XXI в. использовались результаты моделирования по двум сценариям RCP (Representative Concentration Pathways) — “умеренного” (RCP4.5) и “жесткого” (RCP8.5), соответствующих различному уровню антропогенного воздействия на климатическую систему [18]. К сожалению, в новой группе сценариев SSP (Shared Socio-economic Pathways) [24], отличающихся от RCP дополнительным учетом в явном виде роли социально-экономических факторов в

воздействии на климат, пока нет в открытом доступе результатов моделирования климатических изменений в необходимом временном разрешении для задания сценарных полей ветра и других метеовеличин в интересах настоящего исследования. По этой причине в качестве необходимых полей метеовеличин использовались данные реанализа [22] для 2020 г. 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) [25, 26].

2. Исследование риска для здоровья человека, обусловленного изменением комфортности погодно-климатических условий, базируется на использовании биометеорологических индексов, характеризующих степень влияния погодно-климатических условий на человека [14, 19]. При выборе биометеорологических индексов, помимо их назначения, учитывалась доступность прогностических метеорологических параметров, необходимых для расчета данных индексов.

В связи с этим для холодного времени года дискомфорт условий погоды оценивается по значениям индекса суровости погоды Бодмана [6, 14], характеризующего “жесткость” зимней (холодной) погоды в условных единицах по шкале в баллах: “несуровая, мягкая” ($S = 1$), “мало суровая” ($S = 1—2$), “умеренно суровая” ($S = 2—3$), “суровая” ($S = 3—4$), “очень суровая” ($S = 4—5$), “жестко суровая” ($S = 5—6$), “крайне суровая” ($S = 6$). Баллы рассчитываются по формуле

$$S = (1 - 0,04t)(1 + 0,272v), \quad (8)$$

где t — температура воздуха, °C; v — скорость ветра, м/с.

Для оценки комфортности погодно-климатических условий в летнее время года используется индекс эквивалентно-эффективной температуры [1, 14]:

$$\begin{aligned} \text{ЕЕТ}_A = & t[1 - 0,003(1 - f)] - 0,385v^{0,59}[(36,6 - t) + 0,622(v - 1)] + \\ & + (1 - f)[(0,0015v + 0,0008)(36,6 - t) - 0,0167], \end{aligned} \quad (9)$$

где f — относительная влажность, %.

Тепловая чувствительность по значениям данного индекса имеет следующую классификацию: “сильная” ($\text{ЕЕТ}_A = 30$), “умеренная” ($\text{ЕЕТ}_A = 24—30$), “комфорт” ($\text{ЕЕТ}_A = 18—24$), “умеренно тепло” ($\text{ЕЕТ}_A = 12—18$), “прохладно” ($\text{ЕЕТ}_A = 6—12$), “умеренно прохладно” ($\text{ЕЕТ}_A = 0…6$), “холодовой дискомфорт” ($\text{ЕЕТ}_A = 0$).

3. Исследование рисков здоровью человека, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением погодно-климатической комфортности в условиях изменяющегося климата, проводилось на основе районирования территории России с учетом климатических зон России согласно классификации климатов Б. П. Алисова [2]. Это позволило одновременно учитывать особенности атмосферной циркуляции, оказывающей влияние на распространение загрязняющих примесей, и сочетание характерных погодно-климатических факторов, в той или иной мере влияющих на организм человека.

Решение данной задачи осуществлялось в два этапа.

Сначала выполнялась оценка риска здоровью от каждого влияющего фактора в отдельности. И здесь необходимо отметить важный момент — в то время, как действие погоды на организм четко характеризуется сезонными эффектами (поэтому оценка комфортности разделяется для теплого и холодного периодов года), влияние загрязнения воздуха на здоровье хотя и зависит напрямую от концентраций веществ (которые, в свою очередь, имеют сезонные тренды), но также в значительной степени, что крайне важно, определяется физиологическими особенностями организма человека, а именно постепенным характером формирования нарушений здоровья — хронических заболеваний. То есть речь идет о накопительном эффекте влияния загрязняющих веществ, и сезонные всплески концентраций в данном случае не имеют существенного значения. Именно поэтому применяемая в исследовании методология оценки риска для здоровья от загрязнения воздушной среды, предложенная в США и принятая в России, построена на оценке именно среднегодовых концентраций загрязняющих веществ в атмосфере.

Учитывая указанное обстоятельство и в то же время необходимость соблюдения единообразия по времени (корректности) в получаемой интегральной оценке риска от двух изучаемых факторов, при расчетах интегрального риска рассматривался также и среднегодовой эффект влияния погоды, что является вполне допустимым и обоснованным с учетом столь большой заблаговременности проводимых оценок. Разумеется, итоговый результат из-за этого получается более сглаженным.

В исследовании рассматривалось 20 регионов, включая Калининградскую область и Крымский п-ов. Для каждого из них за период 2020—2050 гг. с шагом пять лет с учетом двух сценариев изменения климата в XXI в. рассчитаны среднегодовые значения единичного нормированного риска (индекса опасности) для здоровья от загрязнения атмосферы частицами PM_{10} , $PM_{2,5}$, оксидом углерода, оксидами азота, диоксидом серы с учетом выбросов от всех возможных источников, расположенных как в рассматриваемом районе, так и за его пределами, включая источники трансграничного поступления примесей, а также индексы комфортности (дискомфорта) погодно-климатических условий для каждого сезона года.

Анализ динамики рассчитанных индексов выявил тенденции рисков здоровью от загрязнения атмосферы и изменения погодно-климатической комфортности, что послужило основой для определения по обоим климатическим сценариям территорий, требующих внимания при планировании мер по адаптации к изменениям климата в РФ с целью управления исследуемыми рисками.

4. Оценка потребности в адаптационных мерах выполнялась на основе подхода к интегральной оценке патогенности условий погоды [4]. Этот подход, в зависимости от решаемой задачи, позволяет учитывать ~15 показателей, характеризующих состояние атмосферы. Принимая во внимание цель настоящего исследования, сверхбольшую заблаговременность выполняемых оценок и характер исследуемых рисков, формула интегрального индекса патогенности погоды [4] сокращена до двух показателей, учитывающих комфортность погодно-климатических условий и опасность от загрязнения атмосферы:

$$k = \frac{k_{\text{atm}}(h) + k_{\text{comf}}(S, \text{EET}_A)}{n}, \quad (10)$$

где k — интегральный индекс, характеризующий прогнозируемые тенденции изучаемых рисков по степени выраженности потенциального неблагоприятного эффекта для здоровья при изменении рисков и, соответственно, потребности в мерах по адаптации; k_{atm} — индекс, характеризующий вариации риска для здоровья от загрязнения атмосферы по степени потенциального эффекта; h — вариации среднегодового значения единичного нормированного риска (индекса опасности) для здоровья от загрязнения атмосферы; k_{comf} — индекс, характеризующий вариации комфортности погодно-климатических условий по степени потенциального эффекта; S, EET_A — вариации среднегодовых значений погодно-климатической комфортности; $n = 2$ — число рассматриваемых показателей.

Расчеты выполнены для среднегодовых значений показателей, учитывающих комфортность погодно-климатических условий и опасность от загрязнения атмосферы.

Поскольку подобные исследования ранее не проводились, категории степени выраженности неблагоприятных эффектов на здоровье в зависимости от динамики рисков и соответствующие им значения индексов k_{atm} , k_{comf} , а также балльная шкала для определения интегрального индекса k и соответствующие баллам характеристики тенденций рисков взяты близкими к данным в [4] с поправкой на то, что в настоящей работе рассматриваются не абсолютные значения, а именно вариации рисков. Значения индексов в зависимости от направления трендов могут быть положительными (при повышении риска) или отрицательными (при снижении риска).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены тренды среднегодового риска здоровью от загрязнения атмосферы за период 2020—2050 гг. по климатическим районам России с учетом различных сценариев изменения климата.

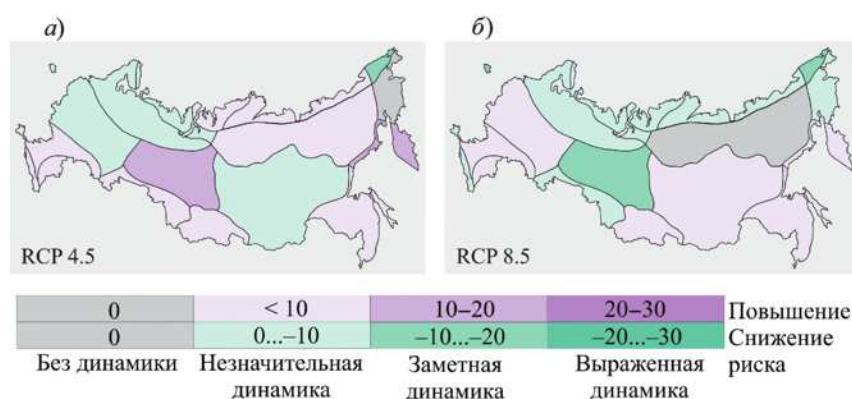


Рис. 1. Распределение трендов (%) единичного нормированного среднегодового риска (индекса опасности) для здоровья от загрязнения атмосферы по климатическим районам РФ в 2020—2050 гг. с учетом сценариев климата: а) RCP4.5; б) RCP8.5.

Рассчитанные тренды показывают, что при сценарии изменения климата RCP4.5 большинство территорий характеризуется незначительной динамикой риска здоровью — тренд менее 10%. При этом на отдельных территориях риск может измениться более заметно: в центре Западной Сибири, на Камчатке и охотском побережье Магаданской области — на 15% в сторону увеличения опасности, а на Чукотке — на 10% в сторону снижения.

При сценарии RCP8.5 также можно отметить на большинстве территорий незначительные изменения риска для здоровья. В то же время значимая тенденция к снижению опасности (тренд 10%) показана для Калининградской области и центра Западной Сибири. Более выраженное снижение риска (на 18%) определяется на Чукотке.

В целом для обоих сценариев характерны тенденции к незначительным или вполне умеренным изменениям уровня опасности для здоровья от загрязнения атмосферы, которые, однако, по-разному распределены по территории страны. Характер динамики риска в данном случае объясняется изменением направлений дальнего (трансграничного) переноса примесей в результате активизации меридионального переноса воздушных масс из-за вариаций циркуляции атмосферы вследствие изменений климата.

На рис. 2 представлены тренды погодно-климатической комфортности (дискомфорта) для каждого сезона в сторону повышения или снижения в виде изменения градаций теплоощущений за период 2020—2050 гг. по климатическим районам России с учетом различных сценариев изменения климата.

Полученные тренды позволяют сделать вывод, что к 2050 г. зимой по обоим сценариям на обширной территории страны (юг европейской части России (ЕЧР), континентальные районы Сибири, побережье Карского моря) ожидается умеренное снижение комфортности; по сценарию RCP8.5 — оно ожидается также и в центре ЕЧР. Без существенных изменений по обоим сценариям останется ситуация в Причерноморье, горах Кавказа, на севере ЕЧР и Западной Сибири, восточно-сибирском побережье Северного Ледовитого океана, Камчатке и охотском побережье Магаданской области; по сценарию RCP4.5 — также в центре ЕЧР, а по сценарию RCP8.5 — в Горном Алтае и Саянах. Тенденции в сторону повышения комфортности по обоим сценариям показаны для сибирской и тихоокеанской областей субарктического пояса, на Чукотке, юге Дальнего Востока; при сценарии RCP4.5 — также в Горном Алтае и Саянах. Наиболее заметное смягчение погодно-климатических условий (на 2 градации) характерно для побережья Берингова моря при сценарии RCP8.5.

Весной при сценарии RCP4.5 около половины территории страны остается без существенной динамики комфортности (ЕЧР, север и юг Западной Сибири, север Восточной Сибири без арктического побережья, Камчатка, охотское побережье Магаданской области, юг Дальнего Востока), в то время как другая половина характеризуется умеренным (в арктическом поясе, континентальных районах Сибири, Горном Алтае и Саянах) либо заметным (на побережье Берингова моря) повышением комфортности. Согласно сценарию RCP8.5, практически на всей территории РФ прослеживается тенденция к умеренному смягчению погодно-климатических условий, кроме атлантической области субарктического пояса, где динами-

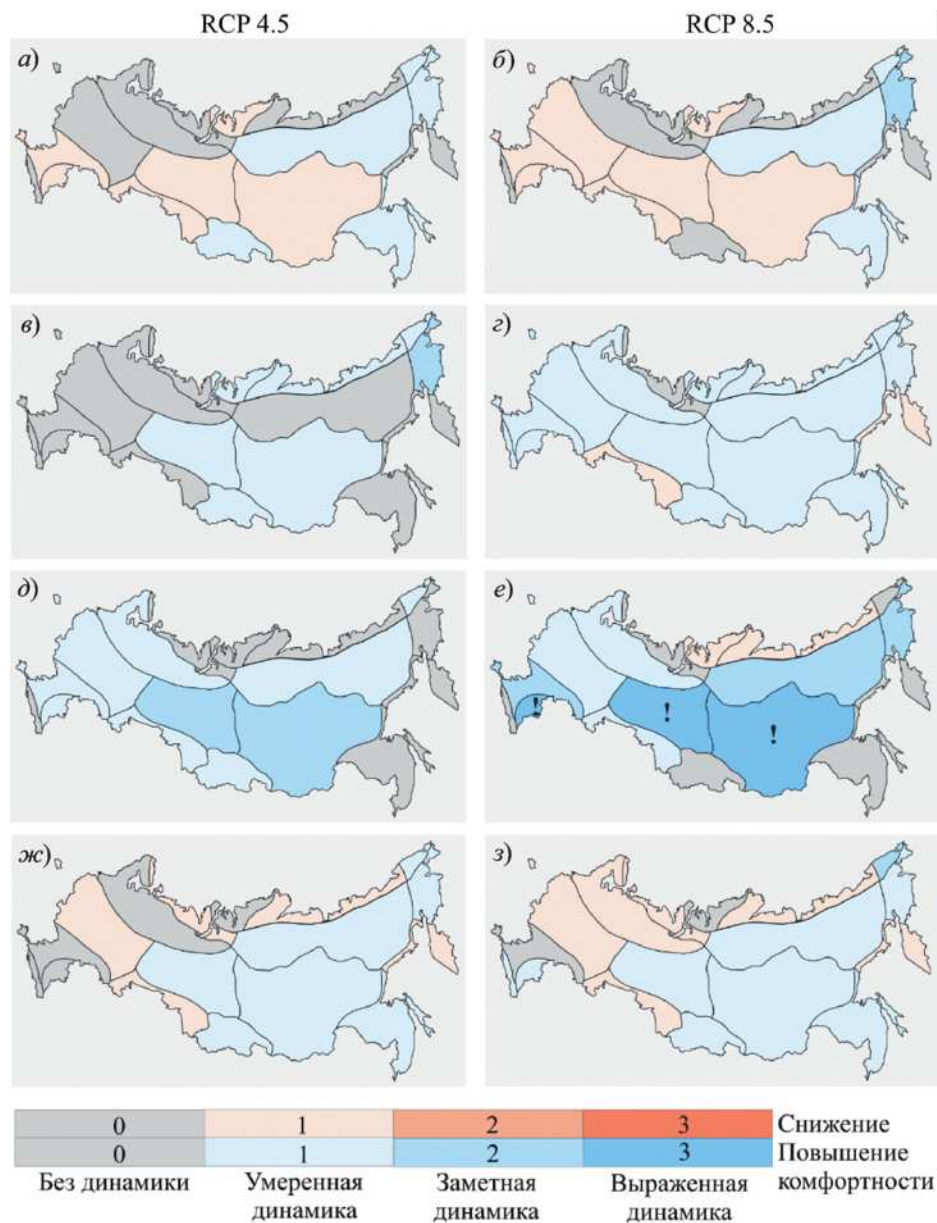


Рис. 2. Распределение трендов погоднo-климатической комфортности (в виде изменения градаций теплоощущений) для каждого сезона (а, б — зима; в, г — весна; д, е — лето; ж, з — осень) по климатическим районам РФ за период 2020—2050 гг. с учетом сценариев климата: RCP4.5 (а, в, д, ж) и RCP8.5 (б, г, е, з).

Восклицательный знак отмечает, что возможен переход из холодного дискомфорта в тепловой.

ка отсутствует, и юга Западной Сибири, Камчатки и охотского побережья Магаданской области, где ожидается усиление дискомфорта на 1 градацию.

Летом в целом по обоим сценариям почти на всей территории РФ ожидается повышение комфортности от умеренного до выраженного. Наиболее выражены (на 3 градации) тенденции в сторону смягчения погод-

но-климатических условий при сценарии RCP8.5 в Прикаспии и континентальных областях Сибири, что на данных территориях способно привести даже к переходу в сторону умеренного теплового дискомфорта. Без динамики остается ситуация в Причерноморье, горах Кавказа, атлантической области субарктического пояса, на Камчатке и охотском побережье Магаданской области, юге Дальнего Востока; при сценарии RCP4.5 — также в арктическом поясе, кроме Чукотки, и на побережье Берингова моря, при сценарии RCP8.5 — также на Чукотке, в Горном Алтае и Саянах. При сценарии RCP8.5, помимо этого, отмечается умеренное усиление дискомфорта на сибирском побережье Северного Ледовитого океана.

Осенью по обоим сценариям большая часть территории Сибири и Дальнего Востока характеризуется умеренным повышением комфортности (более заметно, на 2 градации, комфортность повысится на Чукотке при сценарии RCP8.5). Для ЕЧР и отдельных районов Сибири и Дальнего Востока, напротив, характерно умеренное снижение комфортности либо отсутствие динамики. В частности, при сценарии RCP4.5 дискомфорт усиливается в центре ЕЧР, на юге Западной Сибири, на арктическом побережье ЕЧР и в центре Ямала, на восточно-сибирском побережье Северного Ледовитого океана, Камчатке и охотском побережье Магаданской области; при сценарии RCP8.5 — также на севере ЕЧР.

В целом для многих районов РФ по обоим сценариям характерны умеренные изменения погодно-климатической комфортности. Наиболее заметные и даже выраженные вариации отмечаются летом на юге ЕЧР, в большей части Сибири и на побережье Берингова моря. Полученные оценки согласуются с ожидаемыми изменениями температурного, влажностного и ветрового режимов.

На рис. 3 представлено распределение по климатическим районам России среднегодового индекса k , отражающего интегральную оценку выявленных тенденций рисков для здоровья (среднегодовых) в 2020—2050 гг. при двух климатических сценариях. Положительные и отрицательные значения индексов характеризуют соответственно снижение и повышение по-

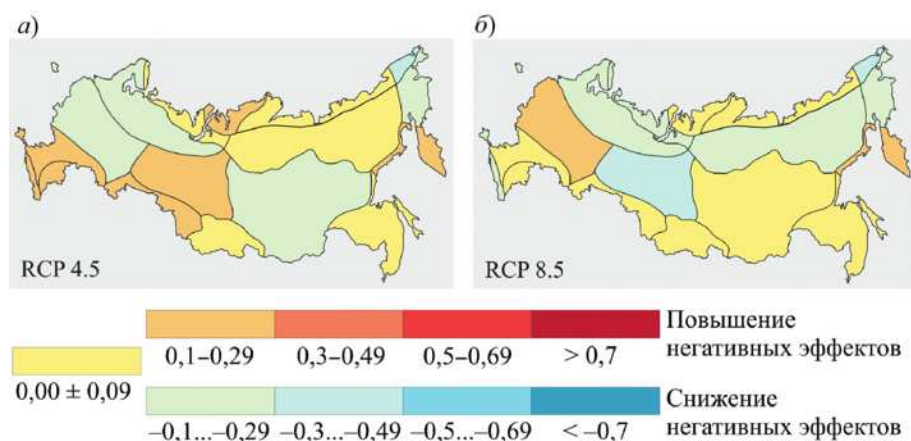


Рис. 3. Распределение интегрального среднегодового индекса k по климатическим районам РФ за период 2020—2050 гг. с учетом сценариев климата: а) RCP4.5; б) RCP8.5.

тенциального неблагоприятного воздействия на человека рассматриваемых факторов. Районы, окрашенные желтым цветом (диапазон значений k от 0,00 до $\pm 0,09$), характеризуются нейтральным эффектом.

Согласно интегральным оценкам, по обоим климатическим сценариям прогнозируются условно неблагоприятные тенденции исследуемых рисков, свидетельствующие о незначительном или умеренном усилении неблагоприятного воздействия на здоровье человека на Камчатке и в Магаданской области; при сценарии RCP4.5 — также на юге ЕЧР и большей части территорий Западной Сибири; при сценарии RCP8.5 — также в центре ЕЧР. Таким образом, можно сделать заключение, что с позиции двух факторов — загрязнения атмосферы и погодно-климатической комфортности — требуется дополнительное внимание к указанной совокупности территорий при планировании мер по адаптации к изменениям климата. На остальных территориях страны при данных сценариях ситуация остается без изменений или наблюдаются благоприятные тренды, и дополнительные меры по адаптации к изменениям климата с учетом динамики рассматриваемых рисков не требуются. Так, уверенная тенденция к незначительному (умеренному) снижению негативных эффектов для здоровья по обоим сценариям проявляется для северных районов ЕЧР и Западной Сибири, побережья Берингова моря; к заметному снижению — на Чукотке. Следует выделить и результаты расчетов для центральной части Западной Сибири, где при реализации сценария RCP8.5 отмечается весьма заметная тенденция к улучшению качества атмосферного воздуха и повышению погодно-климатической комфортности. В завершение анализа важно также отметить, что полученные результаты представляются достаточно осредненными по нескольким причинам. Во-первых, в настоящем исследовании выполнены интегральные среднегодовые оценки рисков, в результате чего произошло некоторое сглаживание сезонных всплесков изучаемых рисков. Другая причина — методического характера — состоит в том, что в настоящее время ни лежащий в основе подход [4], ни другие известные методы не позволяют учитывать нелинейность действия изучаемых факторов на организм человека, что крайне затрудняет учет вклада каждого из них и их совместного действия. Направлением дальнейших исследований авторов является более детальное изучение сезонных особенностей рассматриваемых рисков, а также поиск путей совершенствования методического аппарата для решения поставленных задач.

Выводы

В настоящей работе исследована динамика рисков для здоровья человека на территории России, обусловленных загрязнением атмосферы и изменением погодно-климатической комфортности, в 2020—2050 гг. при двух сценариях климатических изменений.

Согласно оценкам, в период до 2050 г. ожидается в целом умеренная динамика исследуемых рисков, характеризующаяся межсценарной изменчивостью и дисперсией по территории страны. В отдельных районах наблюдаются заметные тренды. Показана необходимость в дополнительном внимании при планировании мер адаптации к изменениям климата в южных и центральных областях ЕЧР, на большей части Западной Сибири

(преимущественно на юге и в центре), в Магаданской области и на Камчатке. Учитывая высокую плотность населения и наличие крупных промышленных узлов на некоторых территориях, повышается актуальность в более детальном изучении опасности от загрязнения атмосферы и динамики погодно-климатической комфортности в условиях изменяющегося климата.

Поскольку в настоящее время ряд таких территорий, как Арктика, Дальний Восток, некоторые южные районы, становятся центром притяжения все больших стратегических интересов России, различных инвесторов и спектр видов экономической деятельности со временем здесь будет расширяться, полученные результаты представляются весьма актуальными при планировании пространственного развития страны, в частности — в решении задач управления экологическими и климатическими рисками в целях создания комфортных условий для обеспечения жизнедеятельности населения, проживающего и работающего на территориях опережающего социально-экономического развития РФ. Отдельный интерес полученные оценки могут представлять для транспортного комплекса и других отраслей, где значимый ряд профессий и рабочих мест связан с длительным пребыванием работников на открытом воздухе.

Работа выполнена в соответствии с госзаданием Института физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской академии наук при поддержке программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030” (стратегический проект № 5 Российского университета транспорта), а также при частичной поддержке гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 22-17-00247).

Литература

1. Айзенштат Б. А., Айзенштат Л. Б. Формула для расчета эквивалентно-эффективной температуры. — Вопросы биометеорологии, 1974, № 20 (101).
2. Алисов Б. П. Климат СССР. — М., Высшая школа, 1969, 104 с.
3. Алоян А. Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. — М., ИВМ РАН, 2002, 201 с.
4. Васин В. А., Голицын Г. С., Гранберг И. Г. и др. Система медицинского прогноза погоды на федеральных курортах Кавказских Минеральных Вод: Методическое пособие. — Пятигорск, ПНИИК ФФГБУ ФМБА России, 2009, 23 с.
5. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. — СПб, Росгидромет, ГГО, 2017, 106 с.
6. Исаев А. А. Экологическая климатология. — М., Научный мир, 2001, 456 с.
7. Макоско 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.
8. Макоско А. А., Матешева А. В. Загрязнение атмосферы и качество жизни населения в XXI веке: угрозы и перспективы. — М., РАН, 2020, 257 с.
9. 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.
10. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М., Наука, 1982, 320 с.
11. Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. — Л., Гидрометеиздат, 1987, 296 с.

12. Ревич Б. А. Здоровье населения Арктики в условиях меняющегося климата и загрязнение окружающей среды: задачи мониторингов. /В сб.: II Всероссийская научная конференция с международным участием “Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны”. Расширенные тезисы докладов. — М., ИГКЭ, ИГ РАН, 2020, с. 229—233.
13. Руководство по оценке риска здоровью населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду: Р 2.1.10.1920-04. — Утв. главным гос. санитарным врачом Российской Федерации 5 марта 2004 г.; введено 5 марта 2004 г. — М., Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004, 340 с.
14. Руководство по специализированному обслуживанию экономики климатической информацией, продукцией и услугами. /Под ред. Н. В. Кобышевой. — СПб, 2008, 336 с.
15. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. /Под ред. В. М. Катцова. — СПб, Научно-технологии, 2022, 676 с.
16. Air Toxics Hot Spots Program, 2008: Air Toxics Hot Spots Risk Assessment Guidelines: Technical Support Document for the Derivation of Noncancer Reference Exposure Levels. — California, U.S. EPA, 131 p.
17. Air Toxics Hot Spots Program, 2015: Risk Assessment Guidelines. The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments. — California, U.S. EPA, 231 p.
18. 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. — Geneva, Switzerland, IPCC, 2014, 151 p.
19. Emelina S. V., Konstantinov P. N., et al. Evaluation of the informativeness of several biometeorological indices for three areas of the European part of Russia. — Russ. Meteorol. Hydrol., 2014, vol. 39, pp. 448—457; doi: 10.3103/S1068373914070036.
20. Integrated Risk Information System (IRIS) Database. U.S. EPA; <http://www.epa.gov/IRIS/>.
21. Makosko A. A. and Matesheva A. V. Assessment of the effect of long-range transport on air pollution trends for different Russian regions. — IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2020, vol. 606, 012034; doi: 10.1088/1755-1315/606/1/012034.
22. 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; <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.
23. Penenko V. V., Tsvetova E. A., and Penenko A. V. Development of variational approach for direct and inverse problems of atmospheric hydrodynamics and chemistry. — Izv., Atmos. Oceanic Phys., 2015, vol. 51, pp. 311—319; doi: 10.1134/S0001433815030093.
24. Van Vuuren D. P., Kriegler E., O'Neill B. C., et al. A new scenario framework for climate change research: Scenario matrix architecture. — Climatic Change, 2014, vol. 122, pp. 373—386.
25. Volodin E. and Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP4.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. l.], 2013; <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r>.
26. Volodin E. and Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. l.], 2013; <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.