

## ОЦЕНКИ ТЕНДЕНЦИЙ ДАЛЬНЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ РЕГИОНОВ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В XXI В.

**А. А. Макоско**

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН,  
Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при  
Президиуме РАН (Москва, Российская Федерация)

**А. В. Матешева**

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

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2017 г.

*Исследованы особенности динамики дальнего загрязнения регионов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) в современных условиях, в ближайшей и отдаленной перспективе с учетом изменяющегося климата.*

*Сформулирован методический подход к оценке тенденций дальнего загрязнения атмосферы для заданных экологически значимых зон с учетом прогнозируемых климатических изменений. Разработана математическая модель, реализующая данный подход, и выполнены расчеты введенных зонального и меридионального индексов загрязнения, характеризующих количество переносимой примеси в зональном и меридиональном направлениях, для января, апреля, июля, октября и года за 1980–2050 гг.*

*Результаты расчетов указывают в целом на вполне определенные тенденции дальнего загрязнения атмосферы: на некоторое усиление в 2020–2050 гг. по сравнению с 1980–2015 гг. вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом и полуостровом Таймыр. Эти результаты важны для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности АЗРФ и планированию экономического развития территорий страны, влияющих на загрязнение атмосферы арктических регионов. В частности, повышается актуальность контроля трансграничного загрязнения атмосферы со стороны ближайших стран Европы.*

**Ключевые слова:** АЗРФ, загрязнение атмосферы, дальний перенос примесей, уравнение переноса примеси, сопряженное уравнение, индексы загрязнения, климатические изменения.

### Введение

В последние десятилетия загрязнение Арктики затрагивает не только местные экосистемы, но и способствует климатическим изменениям, которые значительно опережают планетарные по скорости. Вследствие этого постоянно растет интерес к примесям, которые могут играть важную роль как в загрязнении арктической зоны, так и в нарушении радиационного баланса «атмосфера — подстилающая поверхность» (см., например, [1—3]).

При поступлении тяжелых металлов, сульфатных аэрозолей, сажи серьезную антропогенную нагрузку испытывают арктические экосистемы. Особую опасность представляет загрязнение стойкими органическими загрязнителями, которые имеют

антропогенное происхождение (продукты химической промышленности, сгорания топлива, транспорта, сельского хозяйства). Благодаря низкой летучести, высокой устойчивости и биоаккумуляции эти загрязнители переносятся на тысячи километров от источника (дальний перенос) и накапливаются в тканях растений и всех живых организмов, создавая риск здоровью человека [4—6].

Дальний перенос атмосферных примесей в Арктическую зону Российской Федерации (АЗРФ) происходит из урбанизированных и промышленных районов, районов природных пожаров и газо/нефтедобычи России и ближайших стран Европы. Активизация меридионального переноса воздушных масс из-за изменения общей циркуляции атмосферы вследствие наблюдаемых изменений климата может привести к заметному изменению количества поступающих

загрязняющих веществ и областей, влияющих при дальнейшем загрязнении АЗРФ. В этой связи большой интерес вызывают оценки вкладов и тенденций дальнего загрязнения атмосферы Арктической зоны. Результаты таких оценок имеют высокую научную и практическую значимость при планировании развития экономических территорий страны и обеспечении экологической безопасности АЗРФ. Особенную актуальность эти оценки приобретают в свете укрепления позиций России и освоения Арктики, что определено п. 15(ж) «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» как один из больших вызовов.

Дальнее загрязнение атмосферы изучается на основе математического моделирования глобально-регионального распространения примесей в атмосфере [7; 8], имеющих малые скорости седиментации и вследствие этого значительное время находящиеся во взвешенном состоянии и переносимых воздушными массами на большие расстояния, с помощью уравнения переноса примесей, учитывающего турбулентный обмен и взаимодействие примесей с окружающей средой и подстилающей поверхностью.

Следует отметить, что решение задачи дальнего загрязнения атмосферы может быть получено по крайней мере двумя способами [7; 8]. Первый состоит в многократном решении уравнения переноса примеси с источниками различной интенсивности и различным местоположением. Вторым способом основан на использовании однократного решения сопряженной задачи, 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.

Закономерности дальнего распространения примесей в свободной атмосфере изучены фрагментарно. В 80-х годах прошлого столетия был выполнен значительный цикл работ, посвященных распространению примесей при так называемой ядерной зиме [9—11]. Моделирование глобального переноса атмосферной примеси на основе сопряженных уравнений изучалось в [12]. Сопряженные уравнения были использованы для исследования влияния глобального загрязнения на всю Арктическую зону [7; 8]. Однако вопросы динамики дальнего загрязнения регионов АЗРФ в условиях изменяющегося климата не рассматривались.

Цель настоящей работы состоит в изучении на основе математического моделирования особенностей динамики дальнего загрязнения регионов АЗРФ в современных условиях, в ближайшей и отдаленной перспективе с учетом изменяющегося климата для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности АЗРФ и по планированию экономического развития территорий страны, влияющих на загрязнение атмосферы арктических регионов.

### Методический подход к оценке тенденций дальнего загрязнения атмосферы с учетом климатических изменений

Рассмотрим перенос общего содержания примеси в тропосфере в пределах  $0 \leq z \leq H$ , где  $H$  — высота тропопаузы. Пусть перенос примеси происходит со скоростью, характеризующей средний перенос в тропосфере. Для определенности будем считать, что это скорость движения воздуха на поверхности 500 гПа. Отметим также, что обобщение данного методического подхода на трехмерный случай осуществляется тривиально.

Для дальнего переноса особый интерес представляют примеси с малыми скоростями седиментации, которые значительное время находятся во взвешенном состоянии и переносятся с воздушными массами. В этом случае для примесей применимы положения теории турбулентности, используемые в моделях общей циркуляции для описания турбулентного обмена температуры и влажности [8].

Пусть  $q = \sum q_i(\lambda, \psi, t)$  — интегральная интенсивность невесомой (седиментация отсутствует) примеси (концентрация), мигрирующей вместе с потоком воздуха в атмосфере над областью  $\Omega(\lambda, \psi)$ , где  $\lambda, \psi$  — долгота и коширота сферической системы координат;  $t$  — время. С достаточной точностью трансграничный перенос в средней атмосфере будет описываться двумерным уравнением [7; 8]

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{u}{a \sin \psi} \frac{\partial q}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial q}{\partial \psi} - \frac{1}{a^2 \sin^2 \psi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \mu \frac{\partial q}{\partial \lambda} - \frac{1}{a^2 \sin \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \mu \sin \psi \frac{\partial q}{\partial \psi} + \sigma q = I, \quad (1)$$

где  $u, v$  — составляющие скорости ветра по долготе и кошироте соответственно;  $a$  — средний радиус Земли,  $\mu$  — 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.;  $I$  — интенсивность источников.

В дальнейшем будем рассматривать ситуации, когда концентрация всех примесей в среде удовлетворяет соотношению  $\sum q_i \ll \rho$ , где  $\rho$  — плотность чистой среды. Это означает, что движение среды можно описывать как движение однофазной жидкости [8].

Закон сохранения массы атмосферы с достаточной точностью для данной постановки задачи выражается двумерным уравнением неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \sin \psi}{\partial \psi} = 0.$$

Уравнение (1) рассматривается на сфере (полусфере северного полушария) с начальными условиями

$$q = q_0 \text{ при } t = t_0. \quad (2)$$

При решении поставленной задачи фоновое загрязнение атмосферы не представляет интереса. Поэтому далее полагается, что  $q_0 = 0$ .

Задача (1), (2) рассматривается на интервале времени  $t \in [0, T]$ .

На основе тождества Лагранжа [7] задаче (1), (2) можно поставить в соответствие сопряженную задачу

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial q^*}{\partial t} - \frac{1}{a \sin \psi} \frac{\partial u q^*}{\partial \lambda} - \frac{1}{a \sin \psi} \frac{\partial v \sin \psi q^*}{\partial \psi} - \\ & - \frac{1}{a^2 \sin^2 \psi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \mu \frac{\partial q^*}{\partial \lambda} - \frac{1}{a^2 \sin \psi} \frac{\partial}{\partial \psi} \mu \sin \psi \frac{\partial q^*}{\partial \psi} + \end{aligned} \quad (3)$$

$$+ \sigma q^* = p,$$

$$q^* = 0 \text{ при } t = T.$$

Функция  $p$  характеризует экологически значимые зоны  $G$  ( $G \in \Omega$ ), а  $q^*$  есть сопряженная функция<sup>1</sup>.

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 [7]

$$Q = (q^*, I). \quad (4)$$

Выбирая различные функции  $p$ , можно получить различные функционалы и соответствующие сопряженные уравнения. Выберем

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

$$\text{где } \vec{r} = (\lambda, \psi).$$

В этом случае функционал будет характеризовать интегральный по  $G$  эффект загрязнения атмосферы при условии, что источник выбросов находится

в точке  $\vec{r}_0 \in \Omega$ . Количественное выражение этого эффекта таково:

$$Q = \int_0^T dt \int_{\Omega} I q^* d\Omega. \quad (5)$$

Положим  $I = \text{const}$  (для удобства записи ниже будем считать  $I = 1$ ), тогда функционал (5) будет характеризовать загрязнение атмосферы только вследствие влияния погодно-климатических процессов, что и требуется для достижения цели работы. В этом случае выражение (5) примет вид

$$Q = \int_0^T dt \int_{\Omega} q^* d\Omega = \int_0^T dt \int_{\psi_{ю}}^{\psi_{с}} d\psi \int_{\lambda_3}^{\lambda_в} q^* d\lambda, \quad (6)$$

где  $\lambda_3, \lambda_в, \psi_{ю}, \psi_{с}$  — соответственно западная, восточная, южная и северная границы области  $\Omega$ .

Расчеты по переносу примесей обычно проводятся на длительные сроки. Информация о поле скорости ветра и других метеовеличин, как правило, задается на основе фактического материала наблюдений либо на основе результатов численного моделирования, в том числе с учетом климатических изменений.

Тогда анализ изменений во времени поля  $Q$  позволяет оценивать тенденции дальнего загрязнения атмосферы заданного региона в условиях изменяющегося климата.

Однако для объективизации и количественной характеристики динамики загрязнения атмосферы целесообразно ввести индексы, характеризующие количество переносимой примеси в широтном или меридиональном направлениях. В качестве аналога удобно использовать подход А. Л. Каца к введению индексов циркуляции атмосферы [13].

Обозначим координаты центра области  $G$  через  $(\lambda_0, \psi_0)$ , при этом  $\lambda_3 \leq \lambda_0 \leq \lambda_в, \psi_{ю} \leq \psi_0 \leq \psi_{с}$ , и рассмотрим интегралы (индексы)

$$M_3 = \frac{1}{Q} \int_0^T dt \int_{\psi_{ю}}^{\psi_{с}} d\psi \left( \int_{\lambda_3}^{\lambda_0} q^* d\lambda - \int_{\lambda_0}^{\lambda_в} q^* d\lambda \right), \quad (7)$$

$$M_M = \frac{1}{Q} \int_0^T dt \int_{\lambda_3}^{\lambda_в} d\lambda \left( \int_{\psi_N}^{\psi_0} q^* d\psi - \int_{\psi_0}^{\psi_s} q^* d\psi \right).$$

Безразмерный индекс  $M_3$  ( $-1 \leq M_3 \leq 1$ ), который целесообразно назвать зональным индексом загрязнения, показывает, в какой мере западно-восточный (при  $M_3 > 0$ ) или восточно-западный (при  $M_3 < 0$ ) перенос примеси влияет на загрязнение экологически значимой зоны  $G$ . Аналогично индекс  $M_M$  ( $-1 \leq M_M \leq 1$ ) показывает, в какой мере южный (при  $M_M > 0$ ) или северный (при  $M_M < 0$ ) перенос примеси влияет на загрязнение зоны  $G$ . Этот индекс

<sup>1</sup> Сопряженная функция является весовой функцией, определяющей вклад каждого источника загрязнения  $I$  и начального состояния функции  $q^*$  в величину загрязнения атмосферы в зоне  $G$  [7]. По значениям функции  $q^*$  можно районировать область  $\Omega \times [0, T]$ , выделяя опасные зоны по отношению к загрязнению атмосферы в  $G$ .

соответственно следует называть меридиональным индексом загрязнения.

Высокому значению индекса  $M_3$  не обязательно соответствует малый индекс  $M_m$ . В определенные периоды и сезоны имеет место усиление или ослабление одновременно обоих индексов.

Наконец, для наглядности удобно использовать еще один индекс, количественно характеризующий направление, откуда идет загрязнение экологически значимой зоны  $G$ ,

$$M = \arccos \frac{M_3}{\sqrt{M_3^2 + M_m^2}}. \quad (8)$$

Таким образом, для оценки тенденций дальнего загрязнения атмосферы с учетом климатических изменений необходимо:

1. Получить поля сопряженной функции  $q^*$  для заданных моментов времени и заданной зоны  $G$  путем решения сопряженной задачи (3) с фактическими или прогностическими полями метеовеличин. В частности, для учета прогнозируемых климатических изменений могут быть использованы поля метеовеличин, полученные в рамках численного моделирования атмосферы по сценариям антропогенного воздействия, рекомендованным Межправительственной группой экспертов по изменению климата.

2. Выполнить расчеты с помощью выражения (6) и визуализировать поля  $Q$ . В силу существенного субъективизма визуализация не является обязательной, но позволяет наглядно представить особенности дальнего загрязнения атмосферы.

3. Выполнить расчеты с помощью выражений (7) и проанализировать полученные значения индексов  $M_3$  и  $M_m$ . Их динамика полностью будет характеризовать тенденции дальнего загрязнения атмосферы над областью  $\Omega$  при выборе  $G$  в качестве экологически заданной зоны. Для наглядности удобно пользоваться индексом (8).

### Численная модель, реализующая решение сопряженной задачи

Для практического применения предложенного методического подхода необходима численная модель расчета полей сопряженных функций.

Описание некоторых вариантов численной модели, реализующей решение сопряженной задачи (3) в трехмерной постановке, дано в работах [4; 14]. Поэтому ниже отметим только некоторые особенности ее построения.

Областью решения задачи является Северное полушарие. Сеточная область численной модели составляет  $90 \times 360$  узлов. Шаг сетки модели —  $1^\circ$ .

В дифференциальном уравнении в задаче (3) отсутствует учет недиагональных членов тензора турбулентной диффузии вследствие их крайне слабой изученности. Не учитываются в явном виде также фотохимические процессы, коагуляция,

поглощение каплями тумана и осадков, радиоактивный распад. Учет этих процессов осуществляется неявно.

Главными особенностями дифференциального уравнения в (3) является то, что оно описывает существенно положительные функции, имеющие большие пространственные градиенты. Для численного его решения согласно [15] осуществлялось нелинейное преобразование: вводилась знакопеременная функция  $\varphi = \sqrt{q^*}$ . В этом случае отсутствует необходимость применения монотонных численных схем для решения уравнения (1).

Для его конечно-разностного представления использовалась схема второго порядка точности по горизонтальным координатам и по времени на основе двучиклического метода расщепления [7]. Решение полученных одномерных уравнений по горизонтальным координатам осуществлялось методом факторизации для трехточечных уравнений [16]: по  $\lambda$  циклической прогонкой (по кругу широты), а по  $\psi$  — обычной прогонкой с однородными граничными условиями на экваторе.

Горизонтальный коэффициент турбулентности определяется аналогично [8].

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

### Результаты расчетов и их анализ

На рис. 1 и 2 приведены поля  $Q$  с 1980 по 2050 гг. с шагом 5 лет для двух экологически значимых зон  $G$ : региона Кольский полуостров и региона полуостров Таймыр. В качестве необходимых полей метеовеличин использовались данные реанализов для периодов 1980—1995 гг. [17] и 2000—2015 гг. [18] и данные расчетов по климатической модели Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН [19] для периода 2020—2050 гг. (самый «жесткий» сценарий RCP8.5). Область загрязнения на приведенных картах выделена оттенками красного цвета и определена как область значений, где  $Q \geq 0,1Q_{\max}$ ;  $Q_{\max}$  — максимальное значение анализируемого поля  $Q$ .

Анализ изменений конфигурации полей  $Q$  на протяжении месяцев и лет свидетельствует об их весьма сложной динамике. В отдельные годы и сезоны наблюдаются существенные вариации в расположении полей  $Q$ , в которых сложно выявить закономерности. В целом визуальный анализ не позволяет оценить тенденции дальнего загрязнения атмосферы заданных зон.

На рис. 3 и 4 приведена соответственно межгодовая и внутригодовая динамика индексов  $M_3$  и  $M_m$  для региона Кольский полуостров. Обращает на себя внимание уменьшение экстремальных значений обоих индексов в 2020—2050 гг. по сравнению

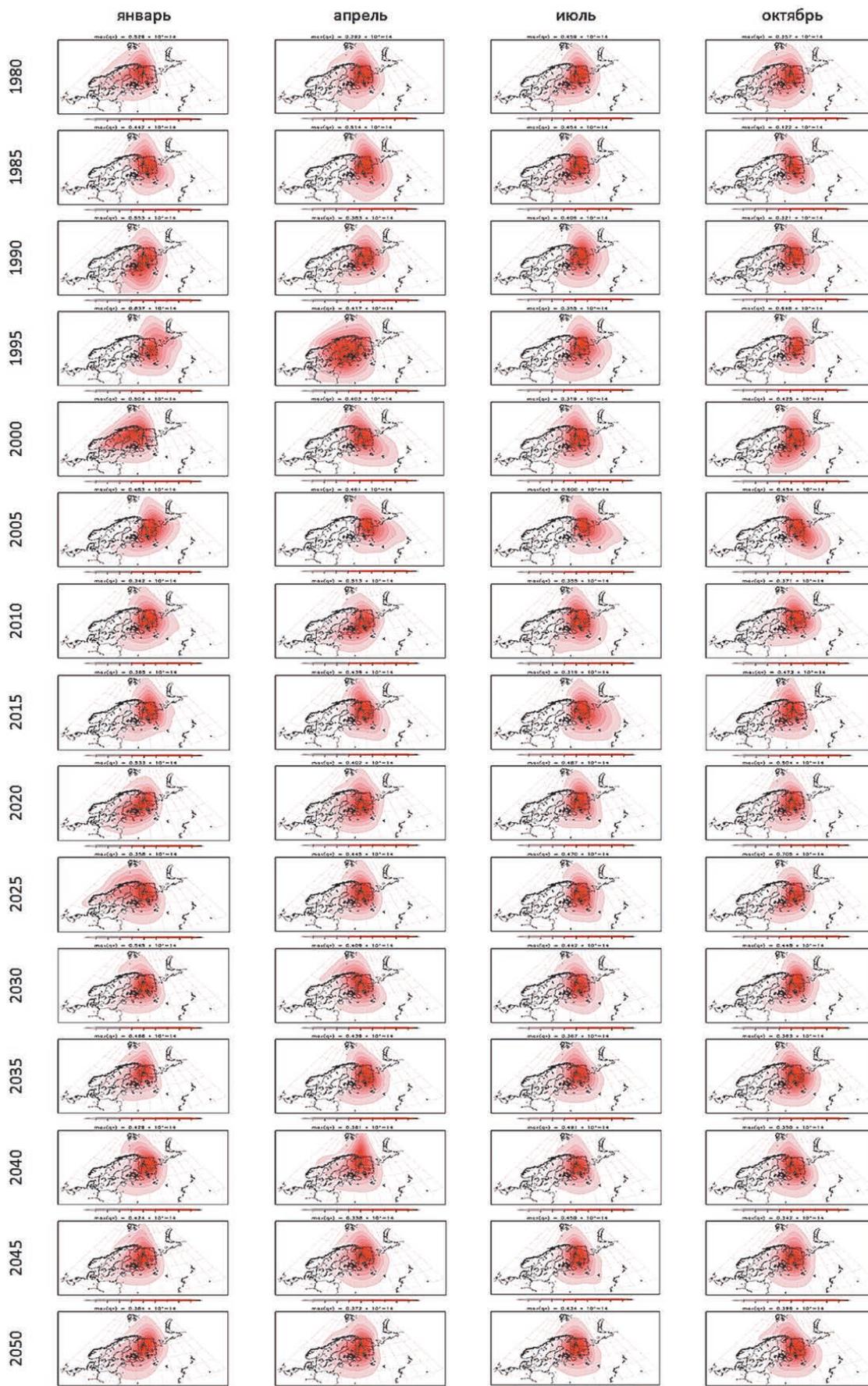


Рис. 1. Поля  $Q$  для экологически значимой зоны – Кольский полуостров

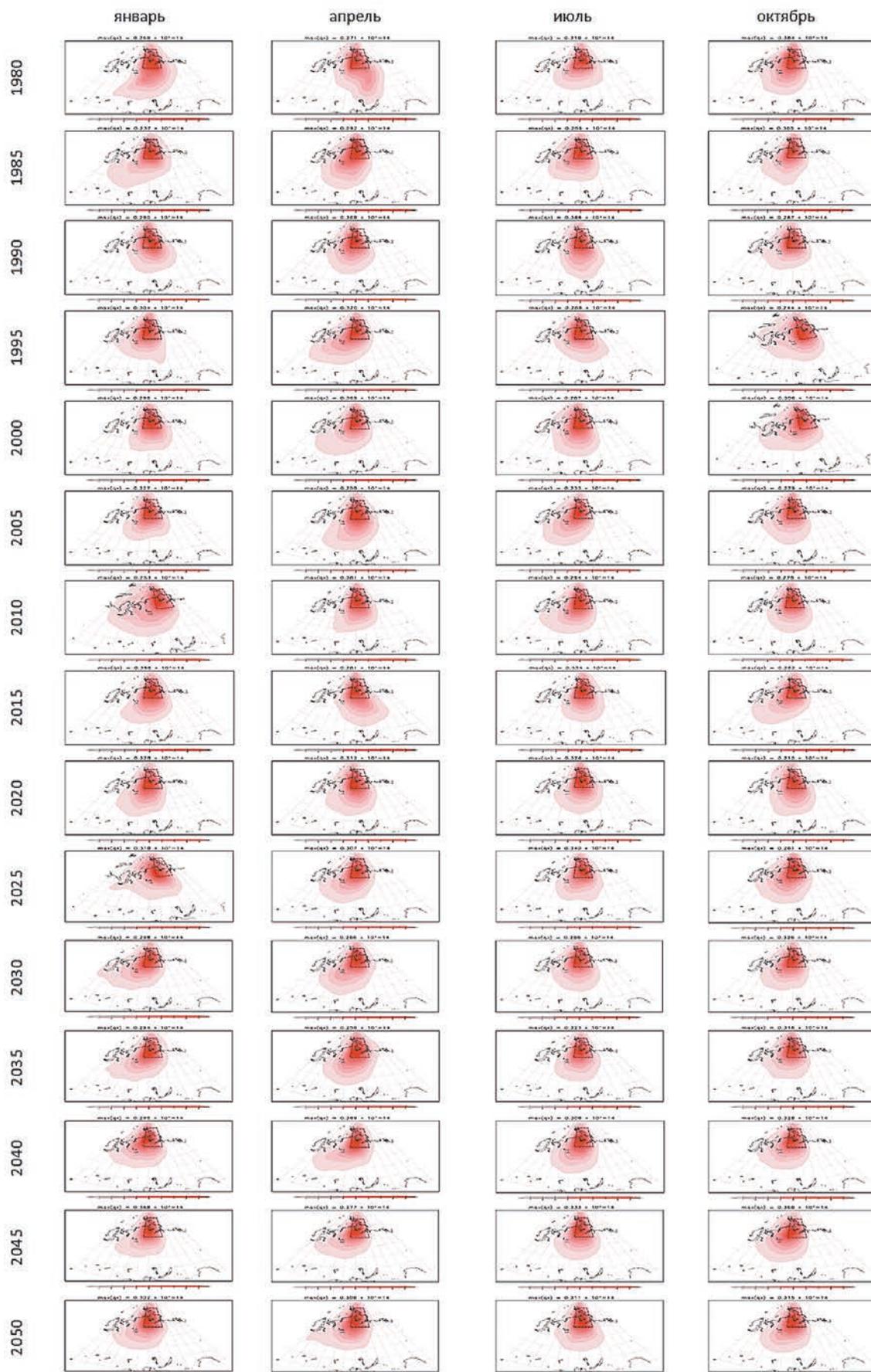


Рис. 2. Поля  $Q$  для экологически значимой зоны – полуостров Таймыр

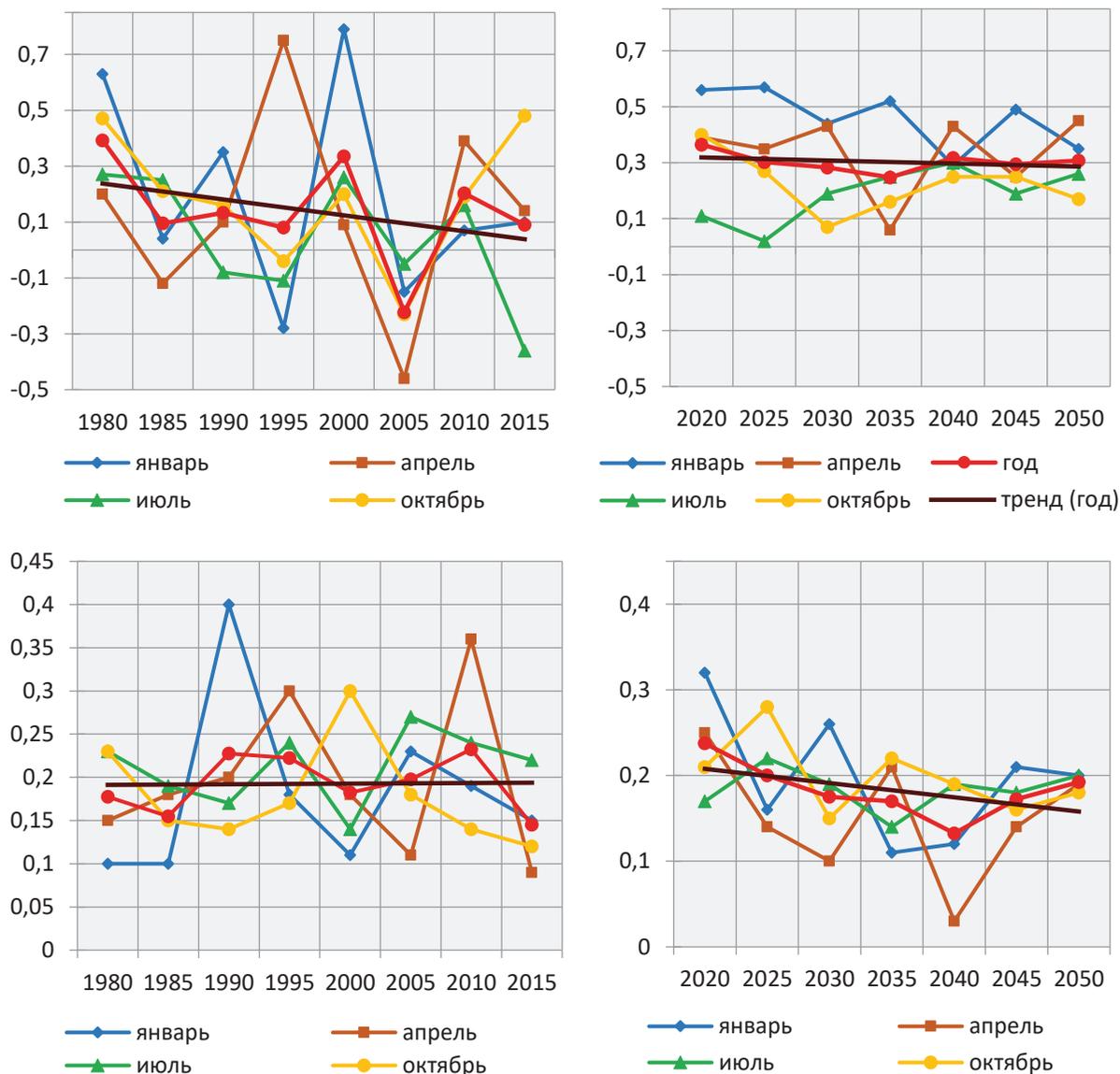


Рис. 3. Межгодовая динамика индексов  $M_3$  (вверху) и  $M_m$  (внизу) в 1980–2015 гг. (слева) и в 2020–2050 гг. (справа) для региона Кольский полуостров

с периодом 1980–2015 гг. для всех месяцев (особенно для января и октября) и годового хода.

В отдельные годы периода 1980–2015 гг. наблюдались отрицательные значения индекса  $M_3$ . Это особенно ярко видно в 2005 г., что свидетельствует о доминировании вклада восточно-западного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом. Значения индекса  $M_m$  положительны на протяжении всего исследуемого периода 1980–2050 гг.

В 1980–2015 гг. годовой тренд индекса  $M_3$  уменьшился с примерно 0,26 до 0,04, что свидетельствует об ослаблении вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом. При этом годовой тренд индекса  $M_m$  не менялся, что указывает на постоянство в целом южного переноса примеси.

В 2020–2050 гг. годовой тренд индекса  $M_3$  практически не меняется и находится на уровне 0,3, что свидетельствует о неизменности вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом. Годовой тренд индекса  $M_m$  уменьшается с примерно 0,21 до 0,16, что указывает на ослабление южного переноса примеси.

В целом следует вывод, что в 1980–2015 гг. господствующий вклад в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом вносили существенно ослабевающий западно-восточный и практически неизменный южный переносы примеси. Иначе говоря, происходило постепенное смещение влияющего направления загрязнения к югу. Особенно заметно это наблюдалось в июле (см. рис. 4). Данное обстоятельство может быть объяснено активизацией

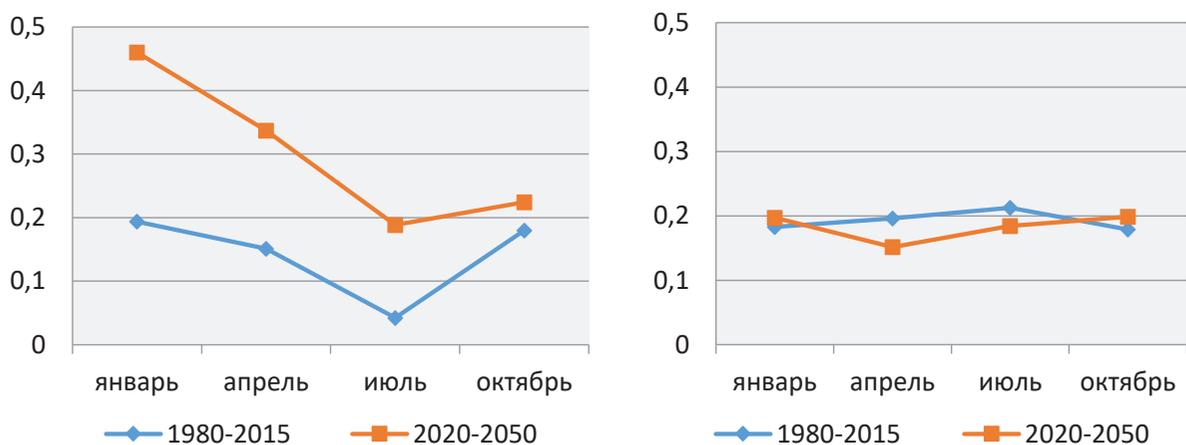


Рис. 4. Внутригодовая динамика индексов  $M_3$  (слева) и  $M_m$  (справа) в 1980–2015 гг. и в 2020–2050 гг. для региона Кольский полуостров

меридионального переноса воздушных масс из-за изменения общей циркуляции атмосферы вследствие наблюдаемых климатических изменений.

Однако в 2020–2050 гг. в силу ослабления южного переноса примеси и неизменности годового тренда индекса  $M_3$  следует ожидать усиления вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом (по крайней мере для используемого сценария климатических изменений RCP8.5). Особенно заметна эта тенденция будет в январе и апреле (см. рис. 4).

На рис. 5 и 6 приведена соответственно межгодовая и внутригодовая динамика индексов  $M_3$  и  $M_m$  для региона полуостров Таймыр.

Здесь уменьшение экстремальных значений обоих индексов в 2020–2050 гг. по сравнению с периодом 1980–2015 гг. выражено слабее по сравнению с Кольским полуостровом.

В отдельные годы периода 1980–2015 гг. наблюдались значения индекса  $M_3$ , близкие к нулю. Что касается значений индекса  $M_m$ , то они положительны на протяжении всего исследуемого периода 1980–2050 гг., как и для Кольского полуострова.

В 1980–2015 гг. годовой тренд индекса  $M_3$  незначительно увеличился, что свидетельствует о слабом увеличении вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над полуостровом Таймыр. При этом годовой тренд индекса  $M_m$  незначительно уменьшился, что указывает на ослабление южного переноса примеси.

В 2020–2050 гг. годовой тренд индекса  $M_3$  несколько увеличивается, что свидетельствует о слабом усилении вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над полуостровом Таймыр. Годовой тренд индекса  $M_m$  не изменяется.

В целом следует вывод, что в 1980–2015 гг. господствующий вклад в загрязнение атмосферы над полуостровом Таймыр вносил несколько усиливающийся западно-восточный и несколько

ослабевающий южный перенос примеси. Иначе говоря, произошло некоторое смещение влияющего направления загрязнения к западу. Особенно заметно это наблюдалось в октябре (см. рис. 6).

В 2020–2050 гг. в силу неизменности южного переноса примеси и слабого усиления годового тренда индекса  $M_3$  следует ожидать небольшого усиления вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над полуостровом Таймыр. Особенно заметна эта тенденция будет в январе, апреле и октябре (см. рис. 6).

Интегрально тенденции дальнего загрязнения атмосферы представлены на рис. 7, на котором показано изменение индекса  $M$  с 1980 по 2050 гг. для двух исследуемых зон Арктики. Видно, что с 1980 по 2015 гг. их загрязнение происходило с ЮЗ-ЮЮЗ направлений<sup>2</sup>, а с 2020 по 2050 гг. — с ЮЗ3-ЮЗ направлений, что свидетельствует о некотором усилении вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом и полуостровом Таймыр.

Таким образом, полученные результаты указывают на вполне определенные тенденции дальнего загрязнения атмосферы двух исключительно важных зон Арктической зоны Российской Федерации в 2020–2050 гг. в условиях изменяющегося климата.

К сожалению, авторам неизвестны результаты аналогичных расчетов других исследователей. Это обстоятельство не позволяет провести верификацию результатов выполненных расчетов.

<sup>2</sup> 2005 г. стал экстремально теплым в России. Циркуляция воздуха в средней тропосфере характеризовалась ослабленной зональной составляющей при усиленной меридиональной составляющей (<http://www.meteoinfo.ru/climate/climat-tab13/climate-analysis-2005-all>). Ввиду этого обстоятельства загрязнение Кольского полуострова в 2005 г. происходило преимущественно с ЮВ направления.

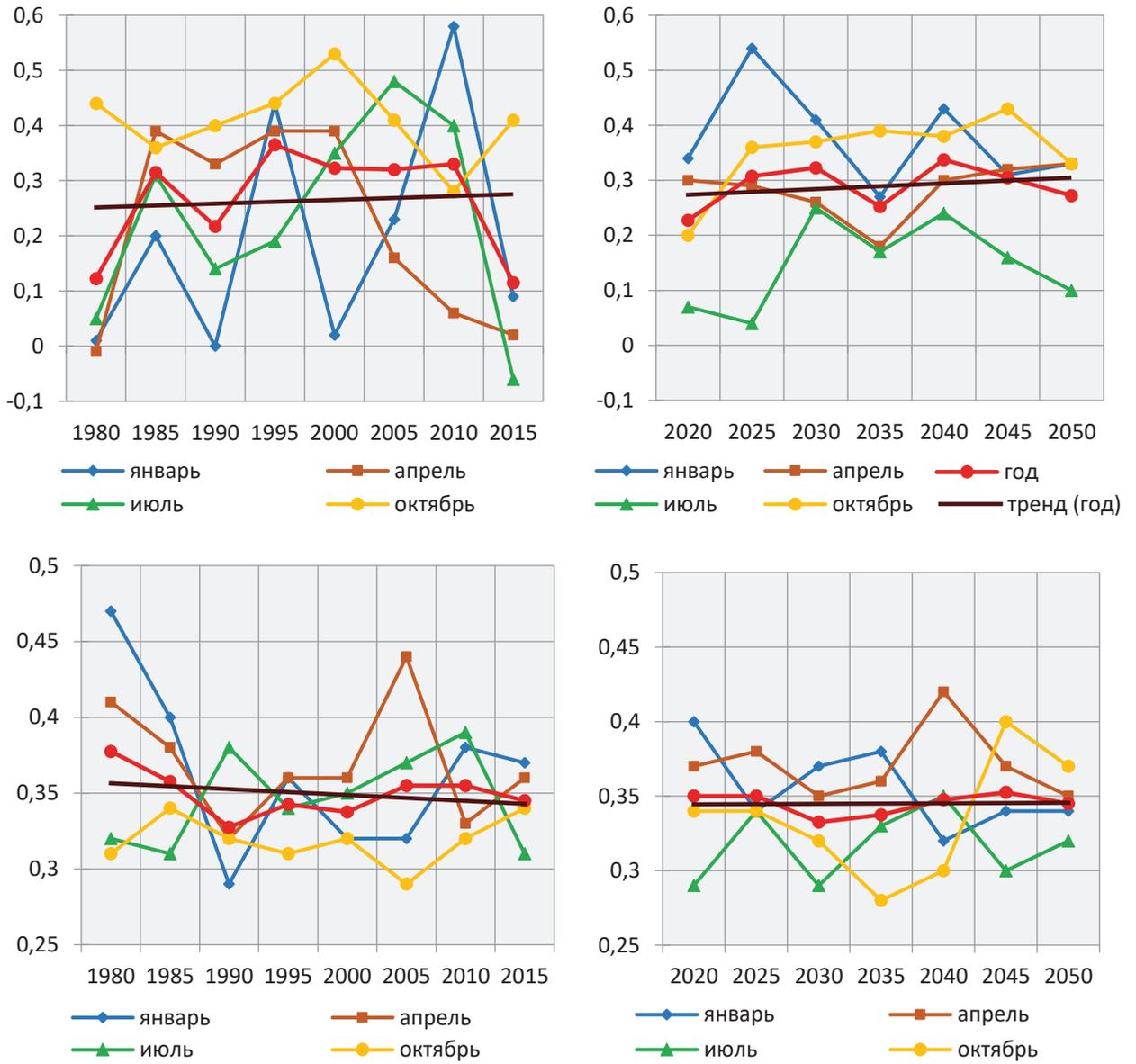


Рис. 5. Межгодовая динамика индексов  $M_3$  (вверху) и  $M_4$  (внизу) в 1980–2015 гг. (слева) и в 2020–2050 гг. (справа) для региона полуостров Таймыр

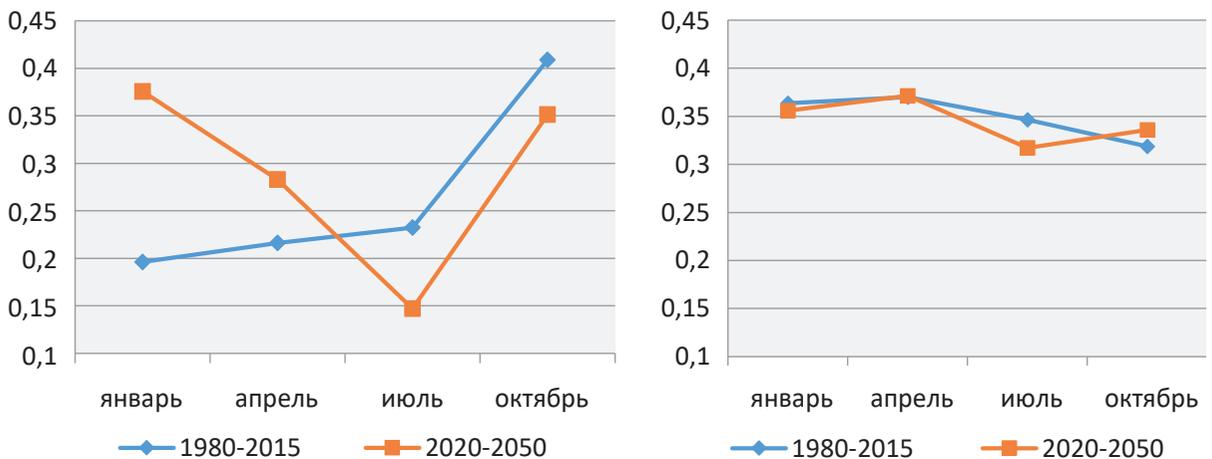


Рис. 6. Внутригодовая динамика индексов  $M_3$  (слева) и  $M_4$  (справа) в 1980–2015 гг. и в 2020–2050 гг. для региона полуостров Таймыр

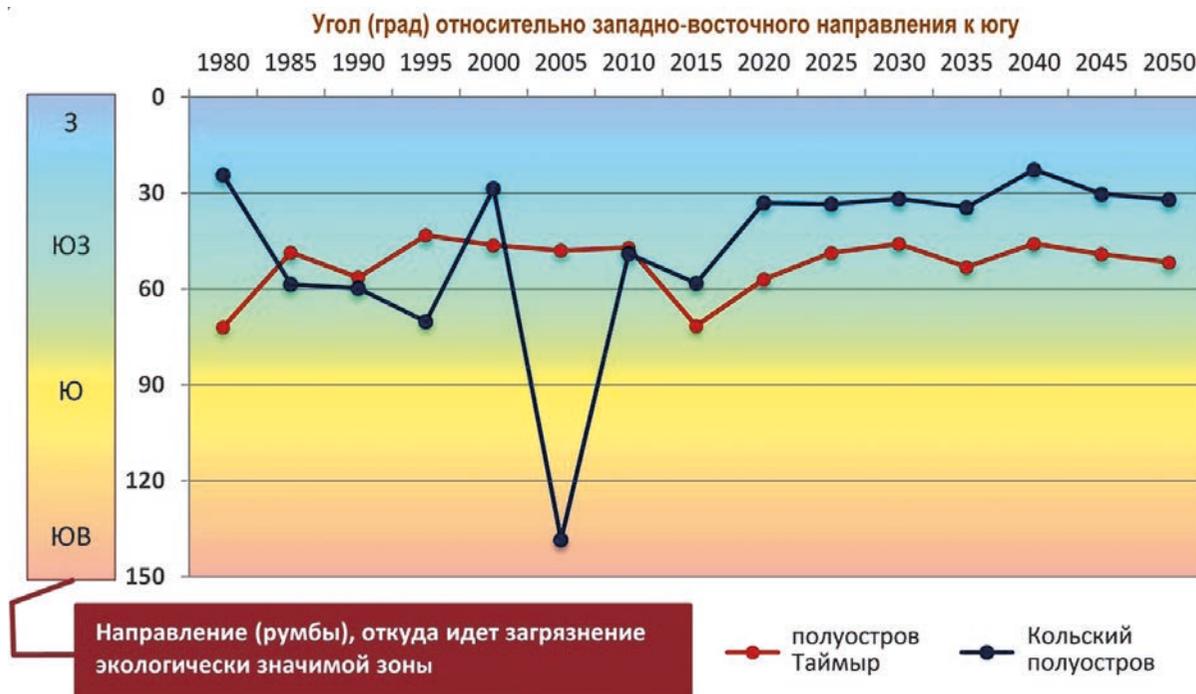


Рис. 7. Изменение индекса *M*

### Заключение

В результате выполненных исследований сформулирован методический подход к оценке тенденций дальнего загрязнения атмосферы для заданных экологически значимых зон с учетом прогнозируемых климатических изменений.

Разработана математическая модель, реализующая данный подход, и выполнены расчеты введенных зонального и меридионального индексов загрязнения, характеризующих количество переносимой примеси в зональном и меридиональном направлениях, для января, апреля, июля, октября и года за 1980—2050 гг.

Полученные результаты расчетов указывают в целом на вполне определенные тенденции дальнего загрязнения атмосферы: на некоторое усиление в 2020—2050 гг. по сравнению с 1980—2015 гг. вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом и полуостровом Таймыр. Эти результаты важны для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности АЗРФ и планированию экономического развития территорий страны, влияющих на загрязнение атмосферы арктических регионов. В частности, повышается актуальность контроля трансграничного загрязнения атмосферы со стороны ближайших стран Европы. Кроме того, требуется определенная осторожность при планировании на территории страны размещения новых промышленных объектов, выбрасывающих в атмосферу загрязняющие вещества.

Методическая значимость результатов работы заключается в возможности широкого использования предложенного подхода и введенных индексов загрязнения для оценки экологической опасности загрязнения атмосферы заданных регионов.

Работа выполнена с учетом перспективных планов фундаментальных научных исследований в Арктике [20] при поддержке программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации».

### 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. Виноградова А. А. Тенденции изменения источников и стоков антропогенных тяжелых металлов в атмосфере Арктики на рубеже XX и XXI веков // Метеорологические и геофизические исследования. — М.: Paulsen, 2011. — С. 215—234.
3. Еланский Н. Ф., Беликов И. Б., Березина Е. В. и др. Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA. — М.: Агроспас, 2009. — 81 с.
4. Маноско А. А., Матешева А. В. Долгосрочный прогноз риска для здоровья вследствие техногенного и биогенного загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата // Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях

- изменяющегося климата / Под общ. ред. А. И. Григорьева. — М.: Наука, 2014. — С. 251—267.
5. *Макоско А. А., Матешева А. В.* О долгосрочном прогнозе рисков заболеваний населения от химического загрязнения атмосферы // Рос. хим. журн. — 2006. — Т. 50, № 5. — С. 48—54.
6. *Матешева А. В.* О возмещении ущерба здоровью населения в городах Арктической зоны Российской Федерации от загрязнения атмосферного воздуха // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 3 (27). — С. 111—117. — DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-111-117.
7. *Марчук Г. И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
8. *Алоян А. Е.* Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере: Курс лекций. — М.: ИВМ РАН, 2002. — 201 с.
9. *Crutzen P. J., Birks J. W.* The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon // *Ambio*. — 1982. — 11. — P. 114—125.
10. *Aleksandrov V. V., Stenchikov G. L.* On the modeling of the climatic consequences of the nuclear war // *Proc. Applied Math / Computing Centre, USSR Academy of Sciences*. — Moscow, 1983. — 21 p.
11. *Стенчиков Г. Л.* Климатические последствия ядерной войны: выбросы и распространение оптически активных примесей в атмосфере // *Сообщения по приклад. математике*. — М.: Вычислит. центр АН СССР, 1985. — 32 с.
12. *Садоков В. П., Штейнбок Д. Б., Мелконян Р. А.* Применение сопряженных уравнений к задаче моделирования глобального переноса атмосферной примеси // *Тр. ГМЦ СССР*. — 1978. — Вып. 204. — С. 65—70.
13. *Кац А. Л.* Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. — Л.: ГИМИЗ, 1960. — 270 с.
14. *Макоско А. А., Матешева А. В.* Опыт идентификации источников химического загрязнения атмосферы в Московском регионе // *Рос. хим. журн.* — 2016. — Т. 60, № 3. — С. 113—120.
15. *Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б.* Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 296 с.
16. *Самарский А. А., Николаев Е. С.* Методы решения сеточных уравнений. — М.: Наука, 1978. — 592 с.
17. *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*. — URL: <https://doi.org/10.5065/D6513W89>.
18. 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>.
19. *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>.
20. *Некипелов А. Д., Макоско А. А.* Перспективы фундаментальных научных исследований в Арктике // *Арктический регион: проблемы международного сотрудничества: Хрестоматия в 3 т.* — Т. 2 / *Рос. совет по междунар. делам*. — М.: Аспект пресс, 2013. — С. 370—380.

### Информация об авторах

*Макоско Александр Арнадьевич*, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3), главный научный сотрудник, Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН (117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 65), заместитель главного ученого секретаря Президиума РАН (119991, Москва, Ленинский просп., д. 14), e-mail: aam@presidium.ras.ru.

*Матешева Анна Владимировна*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3), e-mail: matesheva@ifaran.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

*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.

## EVALUATIONS OF THE FREQUENCY POLLUTION TRENDS OF THE ATMOSPHERE OF THE REGIONS OF THE RUSSIAN ARCTIC IN THE 21st CENTURY

Makosko A. A.

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences, Interdepartment Center of Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Matesheva A. V.

A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

### Abstract

A study was made of the features of the dynamics of long-range pollution in the regions of the Russian Arctic in the current situation, in the short and long term, taking into account the changing climate.

A methodical approach to the assessment of trends in long-range atmospheric pollution for specified ecologically significant zones is formulated, taking into account the predicted climatic changes. A mathematical model that realizes this approach has been developed, and calculations of the introduced zonal and meridional pollution indices describing the amount of transported impurities in the latitudinal and meridian directions for January, April, July, October and year for the period 1980—2050 have been performed.

The obtained results of calculations indicate, in general, quite definite tendencies of long-term atmospheric pollution: for some strengthening in 2020—2050. in comparison with the period 1980—2015. the contribution of the west-eastern impurity transport to atmospheric pollution over the Kola Peninsula and Taimyr Peninsula. These results are important for the development of proposals for ensuring the environmental safety of the Russian Arctic and planning for the economic development of the country's territories that affect the pollution of the Arctic regions. In particular, the relevance of controlling transboundary air pollution from the nearest European countries is increasing.

**Keywords:** *Russian Arctic, atmospheric pollution, long-range impurity transport, impurity transport equation, coupled equation, pollution indices, climatic changes.*

The work was carried out taking into account the long-term plans of fundamental scientific research in the Arctic [20] with the support of the Program of Fundamental Research of the Presidium of the RAS "Search for fundamental scientific research in the interests of development of the Arctic zone of the Russian Federation".

### References

1. Vinogradova A. A., Veremeychik A. O. Modelnyye otsenki sodержaniya antropogennoy sazhi (black carbon) v atmosfere Rossiyskoy Arktiki. [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. Vinogradova A. A. Tendentsii izmeneniya istochnikov i stokov antropogennykh tyazhelykh metallov v atmosfere Arktiki na rubezhe KhKh i XXI vekov. [Trends in the sources and sinks of anthropogenic heavy metals in the Arctic atmosphere at the turn of the 20th and 21st centuries]. *Meteorologicheskiye i geofizicheskiye issledovaniya*. Moscow, Paulsen, 2011, pp. 215—234. (In Russian).
3. Elanskiy N. F., Belikov I. B., Berezina E. V. Brenninkmayer K. A. M., Buklikova N. N., Vaysflog L., Vartiaynen E., Golitsyn G. S., Gorchakov G. I., Granberg I. G., Grisenko A. M., Yelanskiy S. N., Elokhov A. S., Zhernikov K. V., Igayev A. I., Kozlova A. A., Kopeykin V. M., Kruttsen P., Kuokka S., Lavrova O. V., Lisitsina L. V., Moiseyenko K. B., Oberlander E., Obvintsev Yu. I., Pankratova N. V., Postlyakov O. V., Putts E., Romashkin P. A., Safronov A. N., Skorokhod A. I., Tarasova O. A., Turnbull Dzh. S., Khorst D. F., Khol'zinger R., Shenfel'd K. P., Shumskiy R. A., Elkins Dzh. V. Sostav atmosfery nad Severnoy Evraziyey: eksperimenty TROICA. [Composition of the atmosphere over Northern Eurasia: experiments TROICA]. Moscow, Agrosplas, 2009, 81 p. (In Russian).
4. Makosko A. A., Matesheva A. V. Dolgosrochnnyy prognoz riska dlya zdorovia vsledstviye tekhnogennogo i biogennogo zagryazneniya atmosfery v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata. [Long-term prognosis of health risks due to technogenic and biogenic pollution of the atmosphere in a changing climate]. *Zdorovy naseleniya Rossii: vliyaniye okruzhayushchey sredy v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata. Pod obshch. red. A. I. Grigoryeva*. Moscow, Nauka, 2014, pp. 251—267. (In Russian).
5. Makosko A. A., Matesheva A. V. O dolgosrochnom prognoze riskov zabolevaniy naseleniya ot khimicheskogo zagryazneniya atmosfery. [On the long-term prognosis of the risks of diseases of the population against chemical pollution of the atmosphere]. *Ros. khim. zhurn*, 2006, vol. 50, no. 5, pp. 48—54. (In Russian).

6. *Matesheva A. V.* O vozmeshchenii ushcherba zdorovyu naseleniya v gorodakh Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii ot zagryazneniya atmosfernogo vozdukha. [On compensation of damage to public health in the cities of the Arctic zone of the Russian Federation from air pollution]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2017, no. 3 (27), pp. 111—117. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-3-111-117. (In Russian).
7. *Marchuk G. I.* Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy. [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka, 1982, 320 p.
8. *Aloyan A. E.* Dinamika i kinetika gazovykh primesey i aerorozley v atmosfere. [Dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere]. Kurs lektsiy. Moscow, IVM RAN, 2002, 201 p. (In Russian).
9. *Crutzen P. J., Birks J. W.* The atmosphere after a nuclear war: Twilight at noon. *Ambio*, 1982, 11, pp. 114—125.
10. *Aleksandrov V. V., Stenchikov G. L.* On the modeling of the climatic consequences of the nuclear war. Proc. Applied Math. Computing Centre. USSR Academy of Sciences. Moscow, 1983, 21 p.
11. *Stenchikov G. L.* Klimaticheskiye posledstviya yadernoy voyny: vybrosy i rasprostraneniye opticheski aktivnykh primesey v atmosfere. [Climatic consequences of nuclear war: emissions and distribution of optically active impurities in the atmosphere]. Soobshcheniya po priklad. matematike. Moscow, Vychislit. tsentr AN SSSR, 1985, 32 p. (In Russian).
12. *Sadokov V. P., Shteynbok D. B., Melkonyan P. A.* Primeneniye sopryazhennykh uravneniy k zadache modelirovaniya globalnogo perenosa atmosfernoy primesi. [Application of the conjugate equations to the problem of modeling the global transport of atmospheric admixture]. *Tr. GMTs SSSR*, 1978, vyp. 204, pp. 65—70.
13. *Kats A. L.* Sezonnyye izmeneniya obshchey tsirkulyatsii atmosfery i dolgosrochnyye prognozy. [Seasonal changes in general atmospheric circulation and long-term forecasts]. Leningrad, GIMIZ, 1960, 270 p. (In Russian).
14. *Makosko A. A., Matesheva A. V.* Opyt identifikatsii istochnikov khimicheskogo zagryazneniya atmosfery v Moskovskom regione. [Experience in identifying sources of chemical atmospheric pollution in the Moscow region]. *Ros. khim. zhurn*, 2016, vol. 60, no. 3, pp. 113—120. (In Russian).
15. *Marchuk G. I., Dymnikov V. P., Zalesnyy V. B.* Matematicheskiye modeli v geofizicheskoy gidrodinamike i chislennyye metody ikh realizatsii. [Mathematical models in geophysical hydrodynamics and numerical methods for their implementation]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1987, 296 p. (In Russian).
16. *Samarskiy A. A., Nikolayev E. S.* Metody resheniya setochnykh uravneniy. [Methods for solving grid equations]. Moscow, Nauka, 1978, 592 p. (In Russian).
17. *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>.
18. 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>.
19. *Volodin E., Diansky N.* INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5. served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. 2013. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.
20. *Nekipelov A. D., Makosko A. A.* Perspektivy fundamentalnykh nauchnykh issledovaniy v Arktike. [Prospects for fundamental scientific research in the Arctic]. *Arkticheskii region: problemy mezhdunarodnogo sotrudnichestva: Khrestomatiya v 3 t*, vol. 2. Ros. sovet po mezhdunar. delam. Moscow, Aspekt press, 2013, pp. 370—380. (In Russian).

---

### Information about the authors

**Makosko Alexander Arkadievich**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Laboratory, A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (3, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017), Chief Researcher, Interdepartment Center of Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the RAS (65, Profsoyuznaya st., Moscow 117997, Russia), Deputy Chief Scientific Secretary of the Presidium of the RAS (14, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: aam@presidium.ras.ru.

**Matesheva Anna Vladimirovna**, Ph.D. (Technics), Senior Researcher, A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (3, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017), e-mail: matesheva@ifaran.ru.

### Bibliographic description

**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: ecology and economics*. 2017, no 4 (27), pp. 59—71. DOI 10.25283/2223-4594-2017-4-59-71. (In Russian).