

ОЦЕНКА ТЕНДЕНЦИЙ ДАЛЬНЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ В 1980—2050 ГГ. С УЧЕТОМ СЦЕНАРИЕВ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

А. А. Макоско

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

А. В. Матешева

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

Статья поступила в редакцию 8 сентября 2019 г.

Выполнены расчеты введенного авторами ранее индекса загрязнения атмосферы, характеризующего особенности динамики дальнего загрязнения Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) в 1980—2050 гг. с учетом двух сценариев изменения климата. Расчеты показывают общие тенденции к усилению меридионального (южного) поступления загрязняющих примесей на территории АЗРФ в 2020—2050 гг. Полученные оценки важны для предложений по обеспечению экологической безопасности АЗРФ и планированию экономического развития территорий страны, влияющих на загрязнение атмосферы арктических районов.

Ключевые слова: АЗРФ, загрязнение атмосферы, дальний перенос примесей, индексы загрязнения, климатические изменения.

Введение

В Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) в последние годы сосредоточились стратегически важные интересы страны. При этом ряд арктических районов все чаще подвергается экологическим угрозам вследствие дальнего (трансграничного) атмосферного переноса загрязняющих веществ [1; 2] из урбанизированных и промышленных районов, районов природных пожаров и газо/нефтедобычи России и ближайших стран Европы. Это создает дополнительные риски для экосистем и здоровья человека [3—5].

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 дальнем 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 и обеспечении экологической безопасности.

Таким образом, цель настоящей работы состоит в исследовании тенденций дальнего загрязнения атмосферы АЗРФ в конце XX и первой половине XXI в. (с 1980 по 2050 гг.) с учетом двух характерных сценариев изменения климата, принятых Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), — «умеренного» (RCP4.5) и «жесткого» (RCP8.5) [6], которые соответствуют разному уровню выбросов и концентраций парниковых газов в атмосфере, оказывающих влияние на климат.

Метод и материалы исследования

Дальний перенос в средней атмосфере с достаточной точностью описывается двумерным уравнением переноса и диффузии примеси [7]. Поэтому перенос общего содержания невесомой (седиментация отсутствует) примеси q в атмосфере над Северным полушарием Ω рассматривается в двумерной по-

становке со скоростью, характеризующей средний перенос в тропосфере. Обобщение на трехмерный случай осуществляется тривиально. При этом фоновым загрязнением атмосферы пренебрегают как не представляющим интереса для решения данной задачи.

Комбинированные подходы прямого и обратного моделирования, как подчеркнуто в [9], в последние годы все чаще применяются для связи результатов возможных воздействий, выраженных в виде целевых функционалов, с параметрами моделей и источников. Ниже изучение динамики трансграничного загрязнения атмосферы осуществляется на основе решений прямой и сопряженной задач переноса и диффузии примеси [7; 8]. С помощью такой комбинации можно оценить степень потенциальной опасности загрязнения атмосферы в заданной зоне от всех источников, расположенных в области решения задачи при заданных сценариях метеорологического режима атмосферы. Решением сопряженной задачи является сопряженная функция q^* , которая является весовой функцией, определяющей вклад каждого источника загрязнения I в величину загрязнения атмосферы в экологически значимой зоне (заданном регионе) G . По значениям q^* можно районировать всю территорию страны, выделяя опасные зоны по отношению к загрязнению атмосферы в регионе G [10; 11]. Функционал, характеризующий интегральный по G эффект загрязнения атмосферы за время T только вследствие влияния погодно-климатических процессов (здесь $I = \text{const}$, для удобства записи ниже будем считать $I = 1$), что и требуется для достижения цели работы, имеет вид

$$Q = \int_0^T dt \int_{\Omega} q^* d\Omega = \int_0^T dt \int_{\Psi_{\text{ю}}}^{\Psi_{\text{с}}} d\Psi \int_{\lambda_{\text{з}}}^{\lambda_{\text{в}}} q^* d\lambda, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{з}}$, $\lambda_{\text{в}}$, $\Psi_{\text{ю}}$, $\Psi_{\text{с}}$ — соответственно западная и восточная по долготе, южная и северная по широте границы области Ω .

Информация о поле скорости ветра и других метеовеличин задается на основе фактических измерений либо на основе результатов численного моделирования, в том числе с учетом сценариев климатических изменений. Тогда анализ изменений во времени поля Q позволяет оценивать тенденции дальнего загрязнения атмосферы заданного региона в условиях изменяющегося климата.

Однако непосредственный анализ поля Q сложен и неудобен. Поэтому для объективизации и количественной характеристики динамики загрязнения атмосферы введены индексы [10; 11], характеризующие количество переносимой примеси в широтном или меридиональном направлении по аналогии с подходом А. Л. Каца к введению индексов циркуляции атмосферы [12]:

$$M_3 = \frac{1}{Q} \int_0^T dt \int_{\Psi_{\text{ю}}}^{\Psi_{\text{с}}} d\Psi \left(\int_{\lambda_{\text{з}}}^{\lambda_0} q^* d\lambda - \int_{\lambda_0}^{\lambda_{\text{в}}} q^* d\lambda \right), \quad (2)$$

$$M_{\text{м}} = \frac{1}{Q} \int_0^T dt \int_{\lambda_{\text{з}}}^{\lambda_{\text{в}}} d\lambda \left(\int_{\Psi_{\text{ю}}}^{\Psi_0} q^* d\Psi - \int_{\Psi_0}^{\Psi_{\text{с}}} q^* d\Psi \right).$$

Здесь обозначены координаты центра области G через (λ_0, Ψ_0) , при этом $\lambda_{\text{з}} \leq \lambda_0 \leq \lambda_{\text{в}}$, $\Psi_{\text{ю}} \leq \Psi_0 \leq \Psi_{\text{с}}$.

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 $M_{\text{м}}$ ($-1 \leq M_{\text{м}} \leq 1$) показывает, в какой мере южный (при $M_{\text{м}} > 0$) или северный (при $M_{\text{м}} < 0$) перенос примеси влияет на загрязнение зоны G . Этот индекс соответственно следует называть меридиональным индексом загрязнения. Высокому значению индекса M_3 не обязательно соответствует малый индекс $M_{\text{м}}$. В определенные периоды и сезоны имеет место усиление или ослабление одновременно обоих индексов.

Удобно использовать еще один (обобщенный) индекс, количественно характеризующий направление, откуда осуществляется загрязнение региона G :

$$M = \arccos \frac{M_3}{\sqrt{M_{\text{м}}^2 + M_3^2}}. \quad (3)$$

Динамика индексов будет полностью характеризовать тенденции дальнего загрязнения атмосферы над областью Ω при выборе G в качестве экологически заданной зоны.

Используемый методический подход в деталях приведен в [10; 11].

Для численного решения сопряженной задачи эволюции примеси используется модель, описание которой в трехмерной постановке дано в [3]. Отметим ниже 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 [7]. Учет фотохимических процессов, коагуляции, поглощения каплями тумана и осадков, радиоактивного распада осуществляется неявно. Поля ветра и других метеовеличин берутся либо из реанализов, либо из результатов сценарных расчетов изменения климата. Это обеспечивает возможность оценки тенденций дальнего загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата.

Расчеты выполнялись для АЗРФ, которая была разделена на несколько районов, совпадающих

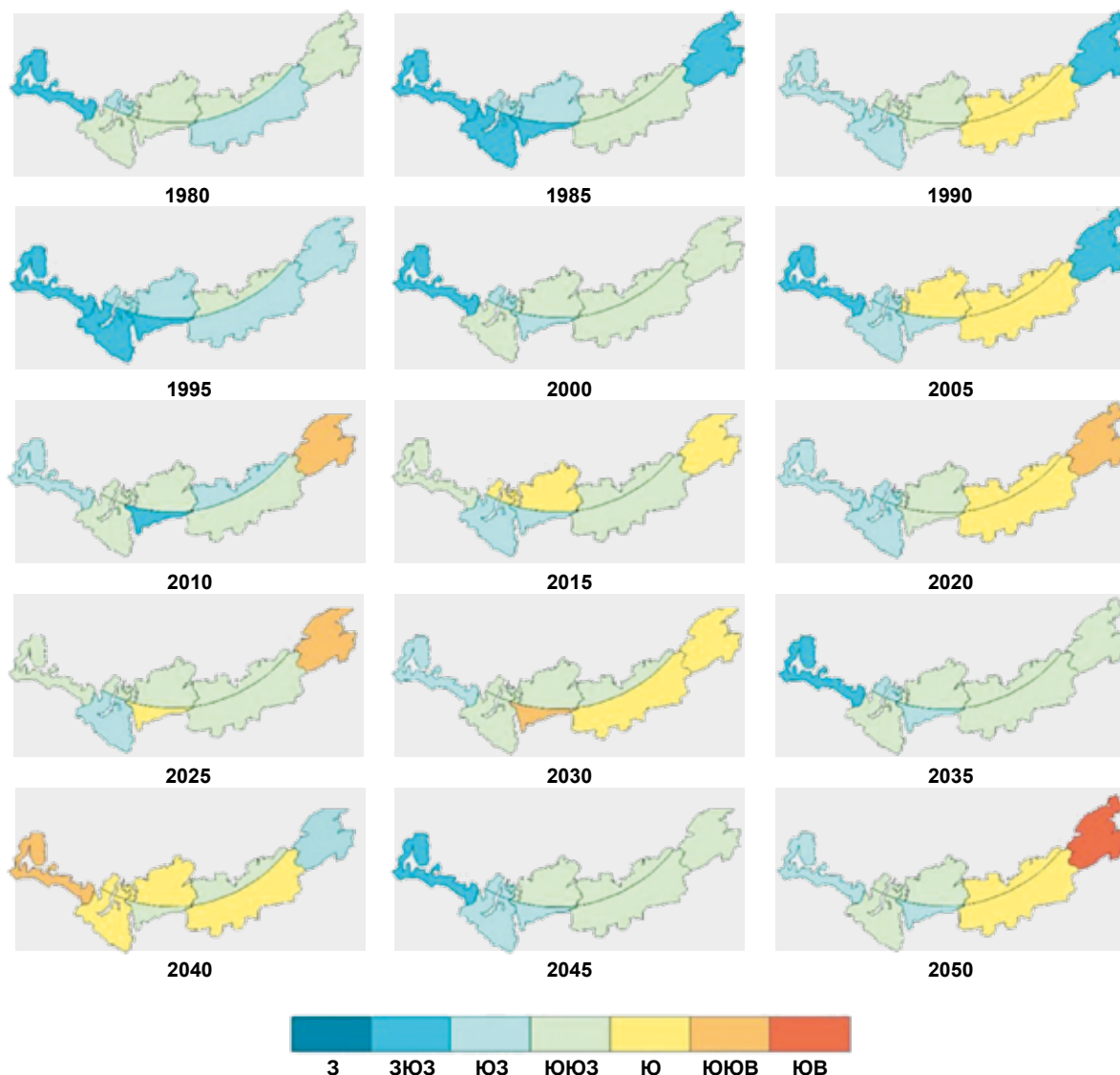


Рис. 1. Динамика распределения индекса M по территории АЗРФ в 1980–2015 гг. по данным реанализа и в 2020–2050 гг. при сценарии изменения климата RCP4.5

Fig. 1. Dynamics of the distribution of the M index on the territory of the Russian Arctic in 1980–2015 according to reanalysis and in 2020–2050 under the climate change scenario RCP4.5

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

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

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

В итоге указанного разделения выделено восемь экологически значимых зон, для которых проводилась оценка динамики дальнего загрязнения атмосферы. Для каждой из них рассчитаны сезонные (январь, апрель, июль, октябрь) и годовые обобщенные индексы M с 1980 по 2050 гг. с шагом в пять лет. При этом проводилось две серии расчетов

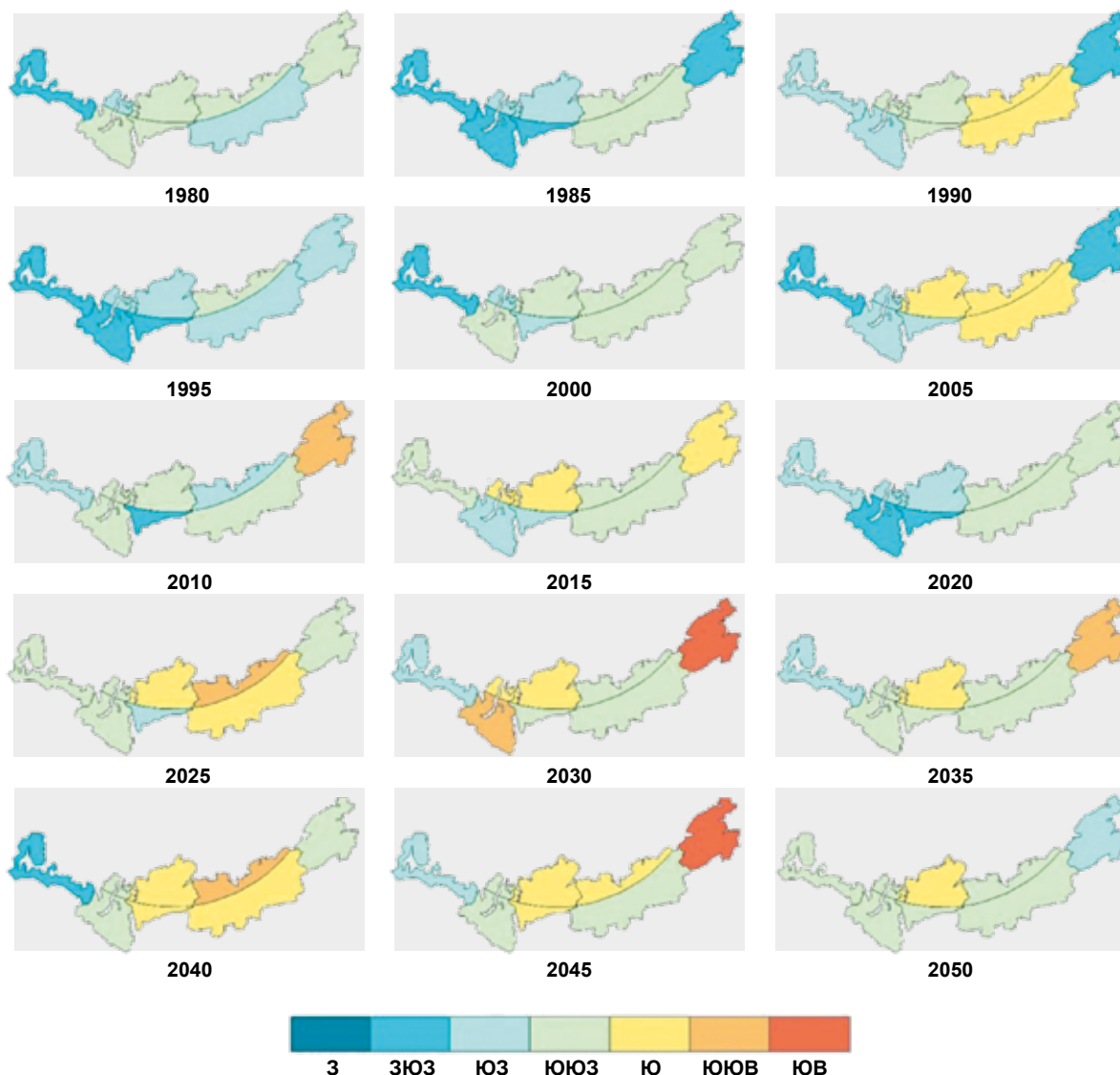


Рис. 2. Динамика распределения индекса M по территории АЗРФ в 1980–2015 гг. по данным реанализа и в 2020–2050 гг. при сценарии изменения климата RCP8.5

Fig. 2. Dynamics of the distribution of the M index on the territory of the Russian Arctic in 1980–2015 according to reanalysis and in 2020–2050 under the climate change scenario RCP8.5

с учетом сценариев изменения климата МГЭИК — «умеренного» (RCP4.5) и «жесткого» (RCP8.5). В качестве исходных использовались данные реанализов [13; 14] для периода 1980–2015 гг. и данные расчетов по климатической модели Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН для периода 2020–2050 гг. (по сценариям RCP4.5 и RCP8.5) [15; 16].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены карты распределения среднегодового индекса M по территории АЗРФ в 1980–2050 гг. с интервалом в пять лет по данным реанализа и с учетом различных сценариев изменения климата.

Расчеты показывают, что вся Арктическая зона России в конце XX и первой половине XXI столетия характеризуется весьма заметной динамикой направлений переноса загрязняющих примесей, которая, однако, выражена неоднородно по территории.

Так, при сценарии изменения климата RCP4.5 относительно умеренные вариации индекса M (от 45° до 60°) с 1980 по 2050 гг. отмечаются на севере Восточной Сибири и Дальнего Востока, выше 70° с. ш., между юго-западным и южным направлениями и в западной части Дальневосточного района (ниже 70° с. ш.).

Выраженные изменения направления поступления примесей (от 60° до 100°) проявляются на арктических территориях Западной Сибири меж-

ду ЮЗ и Ю направлениями выше 70° с. ш. и между ЗЮЗ и Ю направлениями ниже 70° с. ш., в Северном и Восточно-Сибирском районах — в пределах ЗЮЗ и ЮЮВ, а в восточной части Дальнего Востока — между ЗЮЗ и ЮВ направлениями.

При климатическом сценарии RCP8.5 умеренная динамика индекса M (от 45° до 60°) характерна для Северного района в пределах ЗЮЗ и ЮЮЗ, северной части Западно-Сибирского и Восточно-Сибирского районов (выше 70° с. ш.) и западной части Дальневосточного района — между ЮЗ и Ю направлениями, а также северной (выше 70° с. ш.) части Дальневосточного района — между ЮЗ и ЮЮВ направлениями.

Выраженные изменения индекса M (от 60° до 100°) прослеживаются в Западно-Сибирском и Восточно-Сибирском районах (ниже 70° с. ш.) соответственно между ЗЮЗ-ЮЮВ и ЗЮЗ-Ю направлениями.

В восточной части Дальневосточного района отмечаются сильные изменения направления переноса примеси — с западо-юго-западного до юго-восточного (вариации составляют до 110°). Очевидно, это следствие усиления дальневосточного муссона.

Таким образом, при сравнении результатов расчетов индекса M по двум сценариям выявлены более заметные вариации направлений поступления примесей, их дифференциация по степени выраженности и территории при сценарии RCP8.5 (самом «жестком»), нежели при сценарии RCP4.5.

Анализ изменений индекса M на протяжении 70 лет свидетельствует о его весьма сложной динамике. В отдельные годы для некоторых территорий наблюдаются существенные вариации направлений (румбов), откуда идет загрязнение рассматриваемых экологически значимых зон, в которых сложно выявить закономерности. Однако, несмотря на имеющиеся отличия в результатах сценарных расчетов, для всех рассмотренных районов можно отметить общие тенденции изменения направления поступления загрязняющих примесей с ЗЮЗ-ЮЗ на ЮЮЗ-ЮВ, что свидетельствует об усилении меридионального (южного) переноса примеси в загрязнение атмосферы на арктических территориях (рис. 3). При этом при сценарии RCP8.5 эти тенденции в большинстве случаев выражены несколько сильнее. Таким образом, в целом наибольшую опасность в плане дальнего загрязнения атмосферы в ближайшие десятилетия будут представлять источники, расположенные южнее районов АЗРФ.

Заключение

В результате выполненных исследований на основе сформулированного авторами ранее методического подхода к оценке тенденций дальнего загрязнения атмосферы рассчитаны обобщенные индексы, количественно характеризующие направления, откуда осуществляется загрязнение территорий АЗРФ в 1980—2050 гг. с учетом различных климатических сценариев.

Год	ЗЮЗ	ЮЗ	ЮЮЗ	Ю	ЮЮВ	ЮВ
Реанализ [13; 14]						
1980	1	2	5			
1985	4	2	2			
1990	1	2	3	2		
1995	3	4	1			
2000	1	2	5			
2005	2	3		3		
2010	1	2	4		1	
2015		2	3	3		
Сценарий RCP 4.5 [15]						
2020		3	2	2	1	
2025		1	5	1	1	
2030		1	4	2	1	
2035	1	2	5			
2040		1	2	4	1	
2045	1	3	4			
2050		2	3	2		1
Сценарий RCP 8.5 [16]						
2020	2	3	3			
2025		1	4	2	1	
2030		1	3	2	1	1
2035		1	5	1	1	
2040	1		3	3	1	
2045		1	3	3		1
2050		1	6	1		

Рис. 3. Оценка повторяемости направлений поступления загрязняющих примесей в 1980–2050 гг. в районы АЗРФ
Fig. 3. Estimation of the frequency of contaminant inflow directions in 1980–2050 into the regions of the Russian Arctic

Результаты расчетов указывают в целом на вполне определенные тенденции дальнего загрязнения атмосферы: на усиление в первой половине XXI столетия вклада южного переноса примеси в загрязнение атмосферы над арктическими районами России. При этом более выраженные изменения в направлении поступления загрязняющих веществ ожидаются в основном в районах ниже 70° с. ш., особенно в Западной и Восточной Сибири и в восточной части Дальнего Востока. Указанные тенденции выражены сильнее при более «жестком» сценарии изменения климата (RCP8.5).

Полученные результаты важны для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности АЗРФ и планированию экономического развития территорий страны, влияющих на загряз-

нение атмосферы арктических районов. В частности требуется определенная осторожность при планировании размещения новых промышленных и транспортных объектов, выбрасывающих в атмосферу загрязняющие вещества. Кроме того, повышается актуальность контроля трансграничного загрязнения атмосферы со стороны Европы, Средней и Юго-Восточной Азии.

В ближайшей перспективе авторы планируют проверку применимости введенных показателей на широком эмпирическом материале, выяснение вопросов чувствительности предложенного подхода к методам решения и разрешению численных моделей, реализующих сценарии изменения климата, а также изучения тенденции дальнего загрязнения атмосферы всей Арктики.

Авторы благодарны рецензенту за внимательное прочтение рукописи и ценные замечания. Работа подготовлена частично в рамках госзадания и 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. Акимов В. А., Козлов К. А., Косоруков О. А. Современные проблемы Арктической зоны Российской Федерации. — М.: ВНИИ ГОЧС, 2014. — 308 с.
3. Макоско 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.
4. Чащин В. П., Гудков А. Б., Попова О. Н. и др. Характеристика основных факторов риска нарушений здоровья населения, проживающего на территориях активного природопользования в Арктике // Экология человека. — 2014. — № 1. — С. 3—12.
5. 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.

6. 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.
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. — М.: ИВМ РАН, 2002. — 201 с.
9. 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.
10. 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.
11. Makosko A. A., Matesheva A. V. et al. On the trends of long-range air pollution in the territories of the Russian Federation in the 21st century // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 231, iss. 012032. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/231/1/012032>.
12. Кац А. Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. — Л.: ГИМИЗ, 1960. — 270 с.
13. 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>.
14. 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>.
15. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP4.5, served by ESGF / World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. — [S. l.], 2013. — URL: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r4>.
16. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5, served by ESGF / World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. — [S. l.], 2013. — URL: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.

Информация об авторах

Макоско Александр Аркадьевич, 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, стр. 6), заместитель глав-

ного ученого секретаря Президиума РАН, Российская академия наук (119991, Москва, Ленинский просп., д. 14), e-mail: aam@presidium.ras.ru.

Матешева Анна Владимировна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (119017, Москва, Пыжевский пер., д. 3), старший научный сотрудник, Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН (117997, Москва, Профсоюзная ул., д. 65, стр. 6), доцент, Российский университет транспорта (127994, ГСП-4, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), e-mail: matesheva@ifaran.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Макоско 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.

ASSESSMENT OF THE LONG-RANGE POLLUTION TRENDS OF THE ATMOSPHERE IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA IN 1980–2050 CONSIDERING CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Makosko A. A.

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

Matesheva A. V.

Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS, Interdepartment Center of Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the RAS, Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

The article was received on September 8, 2019

Abstract

The features of the dynamics of long-range atmospheric pollution of the Arctic zone of the Russian Federation in 1980–2050 are investigated considering climate change (based on the IPCC scenarios). The calculations of the atmospheric pollution index introduced earlier by the authors are carried out that quantitatively characterize the directions from which the territories of the Russian Arctic are polluted.

The calculation results show general trends towards an increase in the meridional (southern) influx of pollutants into the Russian Arctic in the period under review. More pronounced changes in the supply of pollutants are expected mainly in areas below 70° northern latitude, especially in Western and Eastern Siberia and in the eastern part of the Far East. These trends are more pronounced in the more “severe” climate change scenario (RCP8.5). The estimates obtained are important for proposals to ensure the environmental safety of the Arctic zone of Russia, to plan the economic development of the country’s territories that affect atmospheric pollution in the Arctic regions, and to control transboundary air pollution from Europe, Central and Southeast Asia.

Keywords: Arctic zone of the Russian Federation (AZRF), atmospheric pollution, long-range impurity transport, pollution indices, climate changes.

The authors are grateful to the reviewer for a careful reading of the manuscript and valuable comments.

The work was prepared partly within the framework of State Assignment and with the support of the Basic Research Program of the Presidium of the RAS “Basic scientific research for the development of the Arctic zone of the Russian Federation”.

References

1. Vinogradova A. A., Veremeychik A. O. Modelnyye otsenki sodержaniya antropogennoy sazhii (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. Akimov V. A., Kozlov K. A., Kosorukov O. A. Sovremennyye problemy Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii. [Actual problems of the Arctic zone of the Russian Federation]. Moscow, VNII GOCHS, 2014, 308 p. (In Russian).
3. Makosko A. A., Matesheva A. V. Dolgosrochnyy prognoz riska dlya zdorovia vsledstviye tekhnogennogo i biogennogo zagryazneniya atmosfery v usloviyakh iz-

menyayushchegosya klimata. [Long-term prognosis of health risks due to technogenic and biogenic pollution of the atmosphere in a changing climate]. *Zdorovye naseleniya Rossii: vliyaniye okruzhayushchey sredy v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata*. Pod obshch. red. A. I. Grigoryeva. Moscow, Nauka, 2014, pp. 251—267. (In Russian).

4. Chashchin V. P., Gudkov A. B., Popova O. N., Odland Yu. O., Kovshov A. A. Kharakteristika osnovnykh faktorov riska narusheniy zdorovya naseleniya, prozhivayushchego na territoriyakh aktivnogo prirodopolzovaniya v Arktike. [Description of main health deterioration risk factors for populations living on territories of active natural management the Arctic]. *Ekologiya cheloveka*, 2014, no. 1, pp. 3—12. (In Russian).

5. Matesheva A. V. O vozmeshchenii ushcherba zdorov'yu 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).

6. 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.

7. Marchuk G. I. Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushhej sredy. [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka, 1982, 320 p. (In Russian).

8. Aloyan A. E. Dinamika i kinetika gazovykh primesey i aerorozley v atmosfere. [Dynamics and kinetics of gas impurities and aerosols in the atmosphere]. Moscow, IVM RAN, 2002, 201 p. (In Russian).

9. Penenko V. V., Tsvetova Ye. 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.

10. Makosko A. A., Matesheva A. V. Otsenki tendentsiy dalnego zagryazneniya atmosfery regionov rossiyskoy Arktiki v XXI 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*, 2017, no. 4 (27), pp. 59—71. DOI 10.25283/2223-4594-2017-4-59-71. (In Russian).

11. Makosko A. A., Matesheva A. V. et al. On the trends of long-range air pollution in the territories of the Russian Federation in the 21st century. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, vol. 231, iss. 012032. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/231/1/012032>.

12. 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).

13. 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>.

14. 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>.

15. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP4.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. I.], 2013. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r4>.

16. Volodin E., Diansky N. INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [S. I.], 2013. Available at: <https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>.

Information about the authors

Makosko Alexander Arkadievich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Laboratory, 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, building 6, Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russia), Deputy Chief Scientific Secretary of the Presidium of the RAS, Russian Academy of Sciences (14, Leninsky Prospekt, Moscow, Russia, 119991), e-mail: aam@presidium.ras.ru.

Matesheva Anna Vladimirovna, Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Obukhov Institute of Atmospheric Physics of the RAS (3, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017), Senior Researcher, Interdepartment Center of Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the RAS (65, building 6, Profsoyuznaya str., Moscow 117997, Russia), Associate Professor, Russian University of Transport (9-9, Moscow, Obraztsova str., 127994, GSP-4), e-mail: matesheva@ifaran.ru.

Bibliographic description of the article

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. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no.1 (37), pp. 45—52. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-45-52. (In Russian).