

Методика индексирования динамики загрязнения атмосферы для оценки экологической безопасности при стратегическом планировании развития регионов



А. А. Макоско,
д. т. н., профессор, зав. лабораторией,
член-корреспондент РАН
aamacosco@mail.ru



А. В. Матешева,
к. т. н., старший научный сотрудник
matesheva@rambler.ru

Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН

Предложены индексы загрязнения атмосферы, позволяющие характеризовать особенности динамики дальнего загрязнения регионов в современных условиях, в ближайшей и отдаленной перспективах с учетом изменения климата.

Разработана методика индексирования динамики загрязнения атмосферы, позволяющая на основе применения введенных индексов проводить оценки тенденций загрязнения атмосферного воздуха — важнейшей составляющей экологической безопасности при стратегическом планировании инновационного развития регионов.

Для примера выполнены расчеты введенных индексов загрязнения атмосферы Кольского полуострова. Полученные результаты расчетов указывают в целом на некоторое усиление в 2020-2050 гг. по сравнению с периодом 1980-2015 гг. вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом. Эти результаты важны для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности региона и планированию экономического развития территорий страны, влияющих на загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом. В частности, повышается актуальность контроля трансграничного загрязнения атмосферы со стороны ближайших стран Европы. Кроме этого, требуется определенная осторожность при планировании размещения на территории страны новых промышленных объектов, выбрасывающих в атмосферу загрязняющие вещества.

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

Введение

Разорванность и фрагментарность российского экономического пространства — один из главных рисков безопасности, целостности и конкурентоспособности государства. Поэтому в соответствии с Основами государственной политики регионального развития Российской Федерации на период до 2025 г. [10] направленность на приоритетное развитие регионов, стремление к однородности экономического пространства во многом становится фактором развития страны, катализатором перевода ее экономики на инновационную модель развития.

Для обеспечения системного подхода в управлении пространственным развитием, позволяющего

преодолеть социально-экономические диспропорции, снять инфраструктурные ограничения, максимально полно использовать потенциалы регионов, необходим современный механизм стратегического планирования как инструмент воплощения региональных проектов инновационного характера на основе реальных инвестиций. При этом исключительную актуальность приобретает проблема соблюдения баланса между наращиванием экономического потенциала регионов и сохранением комфортной среды жизнедеятельности населения. Решение этой проблемы заключается в реализации мероприятий по улучшению экологической ситуации и в долгосрочной оценке (прогнозе) экологической безопасности регионов при планировании их инновационного развития.

Среди экологических проблем регионов одной из самых острых, по-прежнему, остается проблема загрязнения атмосферного воздуха. Ее опасность не только в том, что в чистый воздух попадают вредные вещества, но и в изменении климата Земли, вызываемом загрязнениями.

Несмотря на тенденцию снижения негативной антропогенной нагрузки на атмосферный воздух по данным государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 г.» [11], опубликованном 28 декабря 2016 г., «в 44 городах (20% городов) степень загрязнения воздуха оценивалась как очень высокая и высокая. В них проживает 17,1 млн человек, что составляет 17% городского населения России. В 147 городах России (59%), где проводились наблюдения, средние за год концентрации ряда веществ превышали 1 ПДК. В этих городах проживает 50,7 млн человек».

Особую опасность вызывает загрязнение атмосферного воздуха 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 [1, 2].

Такой дальний (в том числе трансграничный) перенос атмосферных примесей происходит из урбанизированных и промышленных районов, районов природных пожаров и газо-, нефтедобычи России и ближайших стран Европы и Азии. 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, оказывающих влияние на регионы при дальнем загрязнении. В этой связи высокую научную и практическую значимость при планировании развития экономических территорий страны и обеспечении экологической безопасности регионов имеют оценки вкладов и тенденций дальнего загрязнения атмосферы.

Решение этой задачи может быть получено, по крайней мере, двумя способами [3, 4]. Первый состоит в многократном решении уравнения переноса примеси с источниками различной интенсивности и различным местоположением. Другой способ более наукоемкий, но требует только однократного решения сопряженной задачи, 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. Ниже использован именно этот способ.

Следует отметить, что, объективизация и количественная характеристика получаемых результатов являются весьма непростыми процедурами. В целом, для анализа динамики загрязнения атмосферы регионов требуется разработка неких интегральных показателей (индексов). Это позволит количественно характеризо-

вать особенности исследуемой динамики и объективно оценивать тенденции загрязнения регионов.

Поэтому цель работы состоит в разработке методики, позволяющей на основе индексирования специально разработанными показателями динамики дальнего загрязнения атмосферы по результатам решения сопряженной задачи переноса и диффузии примеси осуществлять оценки экологической безопасности в ближайшей и отдаленной перспективах с учетом изменяющегося климата при стратегическом планировании инновационного развития регионов.

Методика индексирования динамики дальнего загрязнения атмосферы

Рассматривается перенос общего содержания невесомой (седиментация отсутствует) примеси q в атмосфере над Северным полушарием Ω со скоростью, характеризующей средний перенос в тропосфере. Обобщение на трехмерный случай осуществляется тривиально.

С достаточной точностью дальний перенос в средней атмосфере описывается двумерным уравнением переноса и диффузии примеси [3, 4]. При этом фоновым загрязнением атмосферы пренебрегается, как не представляющим интереса для решения данной задачи.

На основе тождества Лагранжа [3] исходной задаче ставится в соответствие сопряженная задача. Ее решение есть сопряженная функция q^* , являющаяся весовой функцией, определяющей вклад каждого источника загрязнения I в величину загрязнения атмосферы в экологически значимой зоне (заданном регионе) G [3, 4]. По значениям q^* можно районировать всю территорию страны, выделяя опасные зоны по отношению к загрязнению атмосферы в регионе G .

Интегральный по G эффект загрязнения атмосферы за время T будет характеризовать функционал [3, 4]

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

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

$$Q = \int_0^T dt \int_{\Omega} I q^* d\Omega = \int_0^T dt \int_{\psi_{ю}}^{\psi_{с}} \int_{\lambda_{з}}^{\lambda_{в}} q^* d\lambda, \quad (2)$$

где $\lambda_{з}$, $\lambda_{в}$, $\psi_{ю}$, $\psi_{с}$ — 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 климатических изменений. Тогда анализ изменений во времени поля Q позволяет оценивать тенденции дальнего загрязнения атмосферы заданного региона в условиях изменяющегося климата.

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 [5].

Обозначим координаты центра области G через (λ_0, ψ_0) , при этом $\lambda_3 \leq \lambda_0 \leq \lambda_b, \psi_{ю} \leq \psi_0 \leq \psi_c$ и рассмотрим интегралы (индексы)

$$M_3 = \frac{1}{Q} \int_0^T dt \int_{\psi_0}^{\psi_c} d\psi \left(\int_{\lambda_3}^{\lambda_0} q^* d\lambda - \int_{\lambda_0}^{\lambda_b} q^* d\lambda \right), \quad (3)$$

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

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 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 (обобщенный) индекс, количественно характеризующий направление, откуда осуществляется загрязнение региона G

$$M = \arccos \frac{M_3}{(M_3^2 + M_M^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

Таким образом, методика индексирования динамики загрязнения атмосферы позволяет проводить оценку тенденций дальнего загрязнения атмосферы (как важнейшей составляющей экологической безопасности региона). Алгоритм использования методики заключается в следующем. Необходимо:

- 1) получить поля сопряженной функции q^* для заданных моментов времени и заданной зоны G путем решения сопряженной задачи с фактическими или прогностическими (с учетом климатических изменений) полями метеовеличин;
- 2) выполнить расчеты с помощью выражения (2) 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 (3) и проанализировать полученные значения индексов M_3 и M_M . Их динамика полностью будет характеризовать тенденции дальнего загрязнения

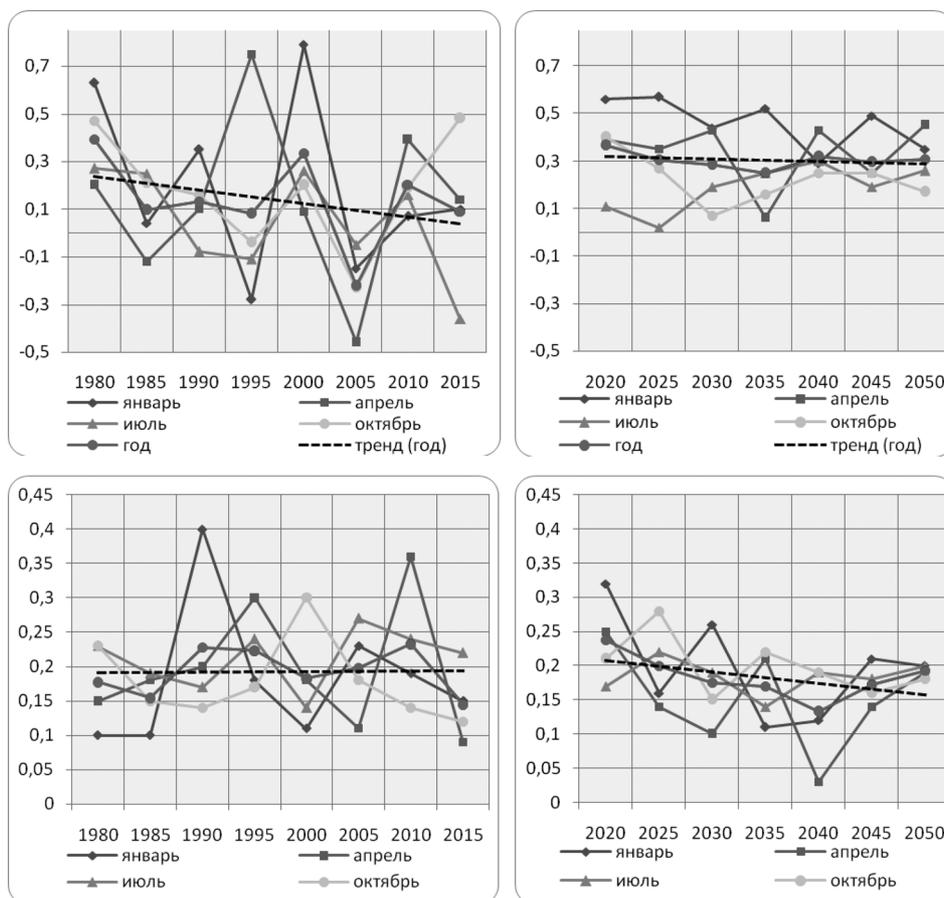


Рис. 1. Межгодовая динамика индексов M_3 (вверху) и M_M (внизу) в период 1980-2015 гг. (слева) и в период 2020-2050 гг. (справа) для региона Кольский полуостров

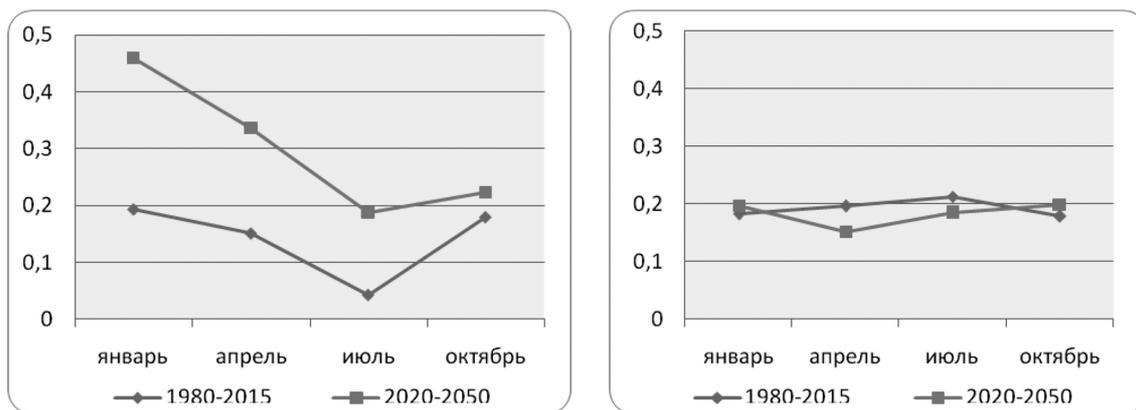


Рис. 2. Внутригодовая динамика индексов M_3 (слева) и M_m (справа) в период 1980-2015 гг. и в период 2020-2050 гг. для региона Кольский полуостров

атмосферы над областью Ω при выборе G в качестве экологически заданной зоны. Эти результаты позволят обоснованно судить об уровне экологической безопасности региона G и при необходимости проводить мероприятия по охране атмосферы. Для наглядности удобно пользоваться обобщенным индексом (4).

Пример расчетов и их анализа

Для практического применения предложенной методики необходима численная модель расчета полей сопряженных функций. Описание некоторых вариантов численной модели, реализующей решение сопряженной задачи в трехмерной постановке, дано в работах [1, 6]. Поэтому на особенностях построения модели останавливаться не будем, отметив только, что областью решения задачи является Северное полушарие. Сеточная область численной модели составляет 90×360 узлов. Шаг сетки модели — 1° .

С помощью этой модели рассчитаны поля Q с 1980 по 2050 гг. с шагом 5 лет для экологически значимой зоны G , в качестве которой взят регион Кольского полуострова. В качестве полей метеовеличин использовались данные реанализов для периодов 1980-1995 гг. [7] и 2000-2015 гг. [8] и данные расчетов по климатической модели Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН [9] для периода 2020-2050 гг. (самый «жесткий» сценарий RCP8.5).

Анализ построенных карт Q (не приводятся в силу значительного объема) показывает заметное влияние

трансграничного переноса из стран Северной Европы. В целом, анализ изменений конфигурации полей Q на протяжении месяцев и лет свидетельствует об их весьма сложной динамике.

На рис. 1, 2 соответственно приведена 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 с периодом 1980-2015 гг.

В целом видно, что в 1980-2015 гг. господствующий вклад в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом вносил существенно ослабевающий западно-восточный и практически неизменный южный перенос примеси. Иначе говоря, происходило постепенное смещение влияющего направления загрязнения к югу. Особенно заметно это наблюдалось в июле (см. рис. 2), что может быть объяснено активизацией 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 заметно эта тенденция будет заметна в январе и апреле (см. рис. 1).

Интегрально тенденции дальнейшего загрязнения атмосферы представлены на рис. 3, на котором показано изменение индекса M с 1980 по 2050 гг. Видно, что загрязнение Кольского полуострова с 1980 по 2015 гг. происходило с ЮЗ-ЮЮЗ направлений¹, а с 2020 по 2050 гг. — будет с ЮЗЗ-ЮЗ направлений, что свидетельствует о некотором усилении вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом.



Рис. 3. Изменение индекса M

¹ 2005 г. стал экстремально теплым годом в России. Циркуляция воздуха в средней тропосфере характеризовалась ослабленной зональной составляющей при усиленной меридиональной составляющей (<http://www.meteoinfo.ru/climate/climat-tabl3/climate-analysis-2005-all>). В виду этого обстоятельства загрязнение Кольского п-ова в 2005 г. происходило преимущественно с ЮВ направления.

Таким образом, полученные результаты указывают на вполне определенные тенденции дальнейшего загрязнения атмосферы над Кольским полуостровом в 2020-2050 гг. в условиях изменяющегося климата.

Заключение

В результате выполненных исследований:

- предложены зональный и меридиональный индексы загрязнения, характеризующие количество переносимой примеси в широтном и меридиональном направлениях, а также обобщенный индекс;
- разработана методика индексирования динамики загрязнения атмосферы, позволяющая на основе применения введенных индексов к результатам решения сопряженной задачи переноса и диффузии примеси прогнозировать тенденции загрязнения атмосферного воздуха над исследуемым районом в ближайшей и отдаленной перспективах с учетом изменяющегося климата для оценки экологической безопасности при стратегическом планировании инновационного развития регионов;
- выполнены для примера расчеты введенных индексов загрязнения атмосферы над Кольским полуостровом для января, апреля, июля, октября и года за период времени 1980-2050 гг. Полученные результаты расчетов указывают на некоторое усиление в 2020-2050 гг. по сравнению с периодом 1980-2015 гг. вклада западно-восточного переноса примеси в загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом. Эти результаты важны для разработки предложений по обеспечению экологической безопасности региона и планированию экономического развития территорий страны, влияющих на загрязнение атмосферы над Кольским полуостровом. В частности, повышается актуальность контроля трансграничного загрязнения атмосферы со стороны ближайших стран Европы. Кроме этого, требуется определенная осторожность при планировании на территории страны размещения новых промышленных объектов, выбрасывающих в атмосферу загрязняющие вещества.

* * *

Работа выполнена при поддержке Программ фундаментальных исследований Президиума РАН «Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации», «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования», «Научные основы развития российского научно-инновационного комплекса в контексте глобальных трансформаций».

Список использованных источников

1. А. А. Макошко, А. В. Матешева. Долгосрочный прогноз риска для здоровья вследствие техногенного и биогенного загрязнения атмосферы в условиях изменяющегося климата/Под общ. ред. А. И. Григорьева//Здоровье населения России: влияние окружающей среды в условиях изменяющегося климата. М.: Наука, 2014. С. 251-267.
2. А. А. Макошко, А. В. Матешева. О долгосрочном прогнозе рисков заболеваний населения от химического загрязнения атмосферы//Российский химический журнал. 2006. Т. L. № 5. С. 48-54.

3. Г. И. Марчук. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. – 320 с.
4. А. Е. Алоян. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозоль в атмосфере: курс лекций. М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.
5. А. Л. Кац. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. Л.: ГИМИЗ, 1960. – 270 с.
6. А. А. Макошко, А. В. Матешева. Опыт идентификации источников химического загрязнения атмосферы в Московском регионе// Российский химический журнал. 2016. Т. LX. № 3. С. 113-120.
7. S. Saha 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 Laboratory. (<https://doi.org/10.5065/D6513W89>).
8. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2000, updated daily. 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 Laboratory. (<https://doi.org/10.5065/D6M043C6>).
9. E. Volodin, N. Diansky (2013). INMCM4 model output prepared for CMIP5 RCP8.5, served by ESGF. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. (<https://doi.org/10.1594/WDCC/CMIP5.INC4r8>).
10. Основы государственной политики регионального развития Российской Федерации на период до 2025 г. Утв. указом Президента Российской Федерации от 16 января 2017 г. № 13.
11. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 г.». <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=286341>.

Methodology of indexing the dynamics of atmospheric pollution for estimation of environmental safety in strategic planning of regional development

A. A. Makosko, doctor of technical sciences, professor, head of laboratory, corresponding member of the Russian academy of sciences.

A. V. Matesheva, PhD (technics), senior researcher. (Institute of atmospheric physics n. a. A. M. Obukhov, Russian academy of sciences)

Indices of atmospheric pollution are suggested that allow one to characterize the dynamics of long-range pollution in modern conditions, in the short and long term, taking into account climate change.

A methodology for indexing the dynamics of atmospheric pollution has been developed, which makes it possible to damage the environment — an important component of safety in the strategic planning of innovative development of regions.

For example, calculations of the introduced atmospheric pollution indices for the Kola Peninsula for January, April, July, October and year for the period 1980-2050 have been performed. The obtained results of calculations indicate, in general, a slight increase in 2020-2050. In comparison with the period 1980-2015. contribution of the west-eastern transfer of impurities to the pollution of the atmosphere over the Kola Peninsula. These results are important for the development of proposals for ensuring the environmental safety of the region and planning economic development of the country's territories that affect the pollution of the atmosphere over the Kola Peninsula. In particular, the relevance of controlling transboundary air pollution from the nearest European countries is increasing. In addition, some caution is required when planning the placement of new industrial facilities emitting pollutants into the atmosphere on the territory of the country.

Keywords: pollution of the atmosphere, long-range transport of impurities, pollution indices, climate change.