

Применение методов математического моделирования при мезо- и мелкомасштабной оценке состояния атмосферного воздуха

А. В. Семакина ✉

Удмуртский государственный университет, Российская Федерация
(426034, г. Ижевск, ул. Университетская, 1)

Аннотация: Цель – мезо- и мелкомасштабная характеристика загрязнения атмосферы с применением инструментов математического моделирования.

Материалы и методы. Для характеристики уровня загрязнения атмосферного воздуха для больших по площади территорий был применен метод математического моделирования. Расчёт концентраций поллютантов в атмосфере осуществлялся для территорий Приволжского и Уральского ФО, республик Удмуртия и Башкирия. Для учета влияния орографического фактора было предложено введение поправочного коэффициента.

Результаты и обсуждение. В ходе проведенного исследования выделены ареалы повышенного загрязнения. Применение адаптированной методики (учитывающей орографический фактор) показало необходимость апробации ее для территории с более расчлененным рельефом (регионы Восточной Сибири).

Выводы. Результаты статистической верификации показали допустимость применения методов математического моделирования при оценке состояния атмосферного воздуха территорий, характеризующихся значительными размерами.

Ключевые слова: атмосферный воздух, математическое моделирование, рассеяние загрязняющих веществ.

Для цитирования: Семакина А. В. Применение методов математического моделирования при мезо- и мелкомасштабной оценке состояния атмосферного воздуха. // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2025, № 2, с. 162-169. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/162-169>

ВВЕДЕНИЕ

Среди всех компонентов окружающей среды, атмосферный воздух наиболее динамичная природная среда. Релевантность используемой информации о состоянии атмосферного воздуха и подхода к его пространственной интерпретации визуализации напрямую влияет на качество предоставляемой информации и на эффективность административно-управленческих решений, принимаемых на базе данного рода информации.

Математическое моделирование, как источник информации, позволяет с теоретической точки зрения объяснить количественные и качественные характеристики состояния атмосферного воздуха, решать диагностические и прогностические задачи, восполнять недостающую информацию о характере рассеяния примеси в атмосферном воздухе.

В настоящее время существует большое количество математических моделей, отвечающих различным задачам (например, [1, 4-6, 8, 9, 10-14]). Среди них можно выделить модели, используемые для оценки нормируемых величин выбросов (например, МРР-2017¹ или [4]). Для определения негативных последствий аварийных выбросов чаще всего используются [6, 12]. Для расчетов, направленных на оценку трансгранично-

го переноса, рекомендуется применение упрощенных моделей (например, [9, 11, 14]). Интересным является опыт использования гибридных моделей, объединяющие в себе результаты математического моделирования и данных, полученных из других источников (в т.ч. данных дистанционного зондирования) [2].

Целью данного исследования является мезо- и мелкомасштабная оценка состояния атмосферного воздуха с применением инструментов математического моделирования.

В рамках данного исследования были сформулированы следующие задачи: сбор информации для проведения расчета рассеяния примеси в атмосферном воздухе для отдельных регионов РФ; расчет рассеяния эмиссий основных поллютантов от стационарных источников для отдельных регионов РФ; картографическая интерпретация и анализ полученных расчетным путем показателей загрязнения атмосферного воздуха; верификация полученных результатов по данным государственной сети мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информация об объемах выбросов и уровнях загрязнения была получена по данным официальных источников («Ежегодники состояния загрязнения атмосферы в

© Семакина А. В., 2025

✉ Семакина Алсу Валерьевна, e-mail: alsen13@list.ru

¹ Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 N 273.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

городах на территории России», Государственные доклады о состоянии окружающей природной среды регионов и РФ). Общее количество населённых пунктов, по которым за 2022 год в официальных источниках представлена информация о состоянии атмосферного воздуха посредством интегрального показателя комплексного индекса загрязнения атмосферы КИЗА (или качественной интерпретации данного показателя) на территории РФ составило около 100 городов, на территории Приволжского федерального округа составило 38 (из 196) городов, на территории республики Башкирия – 5 (из 21) городов, на территории Удмуртии – 1 (из 5) городов. Таким образом, опираясь на результаты, публикуемые официальными источниками, невозможен качественный пространственно-временной анализ уровней загрязнения. В то же время, данная информация может быть использована для верификации результатов математического моделирования процессов рассеяния примеси. Многолетние данные о характере атмосферных процессов были получены посредством интерполяции значений, представленных в [7].

В рамках данного исследования была применена методика, предложенная В. А. Петрухиным и В. А. Вишенским [14]. Расчет концентраций основных поллютантов был выполнен для территорий Приволжского и Уральского федерального округов, республик Башкортостан и Удмуртия. Шаг расчетной сетки составил 10 км. Размер шага определялся как техническими возможностями ПК, так и необходимостью при повышении детальности учета условий эмиссии и особенностей подстилающей поверхности.

Используемая в данной работе модель расчёта рассеяния примеси в атмосферном воздухе предложенная В. А. Петрухиным и В. А. Вишенским [14] не учитывает орографические особенности местности. Для учета орографического фактора, в существующую модель [14] был внесен поправочный коэффициент, учитывающий особенности рельефа местности. В качестве основы для определения значений коэффициента рельефа была использованы принципы предложенные в «Методах расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»². Согласно данной методике, коэффициент влияния рельефа учитывает следующие формы рельефа: ровная местность/перепад высот не более 50 м на 1 км (значение коэффициента 1), перепад высот превышает значение 50 м на 1 км.

Апробация адаптированной модели расчета рассеяния осуществлялась для территории Башкирии, занимающей в физико-географическом отношении территорию Предуралья и западных отрогов Южного Урала. Шаг расчетной сетки при расчете концентраций загрязняющих веществ (ЗВ) для республики Башкирия был взят 10 км (соответственно, значения коэффициен-

та рельефа более 1 были получены для тех территорий, где перепад высот на 10 км составлял более 500 м.). По данным цифровой модели рельефа SRTM³ были получены абсолютные высоты рельефа местности, создана карта значений перепада высот для заданных ячеек. Таким образом, для 30 (из 3901) расчетных точек на территории республики Башкирия значения коэффициента, учитывающего влияние рельефа на процессы рассеяния, будут более единицы.

Для реализации математической модели В. А. Петрухина и В. А. Вишенского под руководством автора на языке Python был создан программный продукт, рассчитывающий концентрации ЗВ для расчетных точек. Картографическая визуализация полученных расчетным путем результатов осуществлялась при помощи программы Qgis.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка состояния атмосферного воздуха на территории Приволжского и Уральского федеральных округов. Картографическая интерпретация полученных результатов математического моделирования для территории Приволжского и Уральского федеральных округов (ПФО и УрФО) представлена на рисунках 1, 2.

Необходимо отметить специфическую особенность используемой выборки данных: поскольку в ежегодниках публикуются данные о состоянии атмосферы в городах с наиболее напряженной в этом отношении ситуацией («30 самых грязных городов России»), а в государственная сеть мониторинга традиционно располагается в крупнейших городах и вблизи крупных предприятий - загрязнителей, постольку сформированный реестр данных будет характеризовать уровень загрязнения атмосферного воздуха в городах с наивысшими значениями уровня загрязнения, и не отразит состояние фоновое состояние атмосферы на окружающей территории. В связи с этим сходимость результатов натурных и расчетных значений комплексного индекса загрязнения атмосферы (КИЗА) возможно определить только по зафиксированным предельным (максимальным) значениям уровня загрязнения атмосферы.

Статистическое определение достоверности данных, полученных при помощи моделирования, осуществлялось с применением коэффициента ранговой корреляции Спирмена и критерия χ^2 . При степени свободы 39 χ^2 , полученный расчетным путем, превышает χ^2 критический (0,999), что свидетельствует о достоверности полученных результатов. В свою очередь, коэффициент ранговой корреляции Спирмена (R_s) получился равным 0,442, что свидетельствует о средней тесноте связи. Данное значение превышает критическое значение коэффициента ранговой корреляции при степени надежности 0,99. Таким образом, данная связь характеризовалась как корреляция высокой степени значимости.

² Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 N 273.

³ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Earthdata. – URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm> (дата обращения: 27.04.2019). – Текст: электронный.

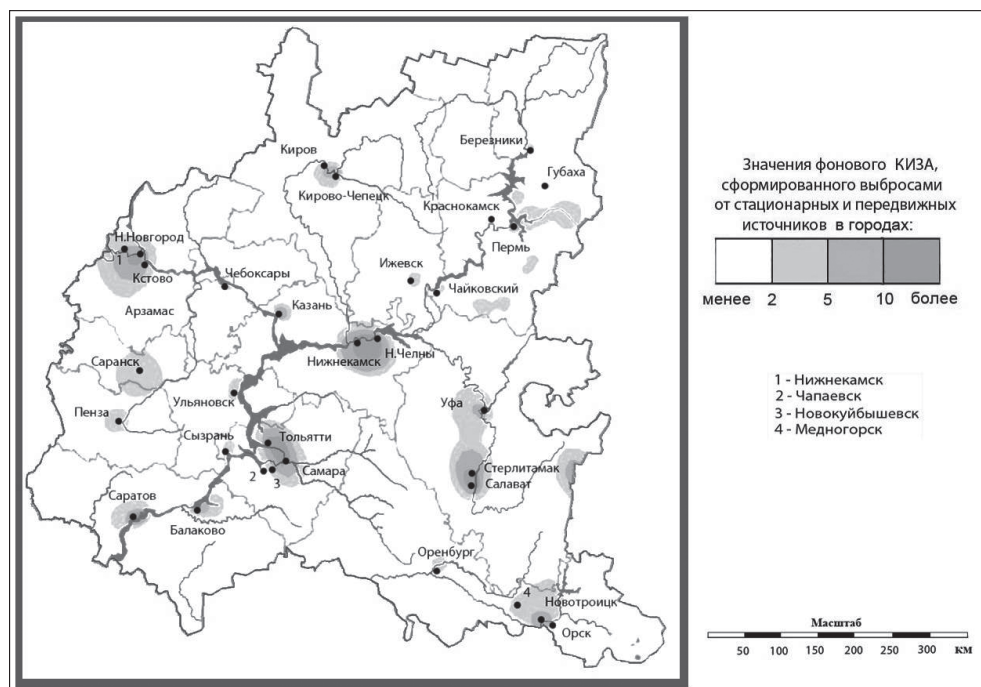


Рис. 1. Среднегодовые значения комплексного индекса загрязнения атмосферы на территории Приволжского ФО, сформированные выбросами от стационарных источников

[Fig. 1. Average annual values of the complex index of atmospheric pollution in the territory of the Volga Federal District, formed by emissions from stationary sources]

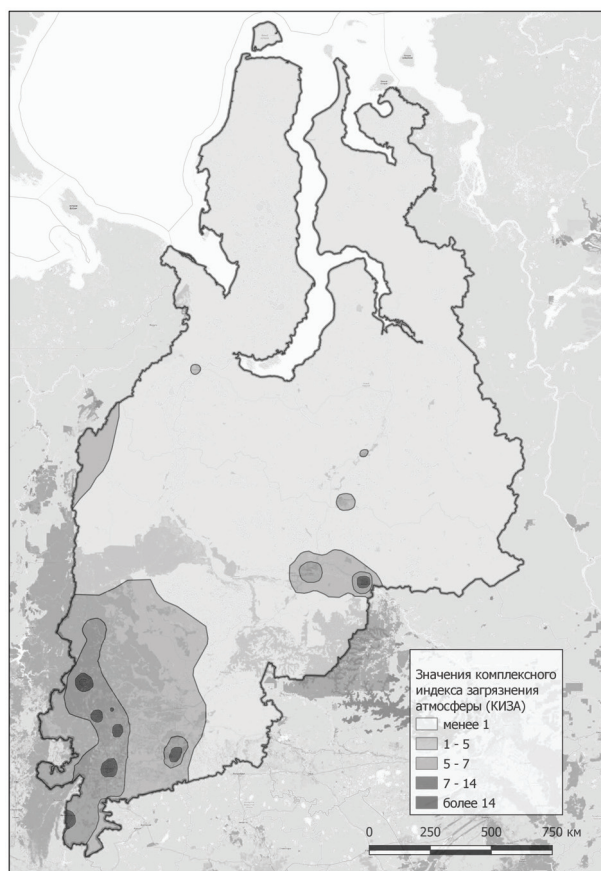


Рис. 2. Среднегодовые значения комплексного индекса загрязнения атмосферы на территории Уральского ФО, сформированные выбросами от стационарных источников

[Fig. 2. Average annual values of the complex index of atmospheric pollution in the territory of the Ural Federal District, formed by emissions from stationary sources]

Сравнительный анализ показал, что для 64 % (25 из 39) населенных пунктов расчетные значения КИЗА почти не отличались от значений, полученных в ходе натурных исследований (отклонение меньше 1). Это крупные города и столицы регионов, характеризующиеся разнообразной промышленной специализацией и многокомпонентной структурой выбросов.

Для 31 % (12 из 39) населенного пункта расхождение значений КИЗА составляли менее 5. Примерами таких городов являются Инза, Соликамск, Березники, Ижевск. Расхождение значений КИЗА более 5 были зафиксированы для города Салават и Мулловка. Необходимо отметить, что для большей части (8 из 14) городов данной группы расчетные значения КИЗА ниже данных, полученных в ходе мониторинга состояния атмосферы. Вероятнее всего, это связано с особенностью математической модели, учитывающей вклад в загрязнение только наиболее распространенных ЗВ, в то время, как на фактическое загрязнение атмосферы, помимо основных поллютантов оказывают влияние специфические примеси (например, формальдегид в Ижевске; фенол, сероводород, аммиак в Соликамске и Березниках).

Четыре города из списка населенных пунктов, характеризующиеся расхождением значений КИЗА

более 1 (Салават, Стерлитамак, Набережные Челны, Нижнекамск), имели расчетные значения КИЗА выше, чем значения, полученные в ходе проведения государственного мониторинга загрязнения. Указанные города располагаются в центре нижнекамского и центрально-башкирского ареалов загрязнения. Вероятнее всего, завышенные расчетные значения КИЗА связаны с особенностью используемой математической модели. Опытным путем было определено, что наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха территории вносят источники, расположенные на расстоянии до 100 км. При этом, в связи с аппроксимацией учитываемых параметров, математическая модель не учитывает характер подстилающей поверхности и топографию. Таким образом, при близком (до 100 км) расположении крупного источника выбросов, расчетные значения КИЗА могут быть получены выше, чем по данным натурных измерений.

Оценка состояния атмосферного воздуха на территории республик Удмуртия и Башкортостан. Картографическая визуализация результатов математического моделирования процессов рассеяния эмиссий от стационарных источников для территории Удмуртской республики представлена на рисунке 3.

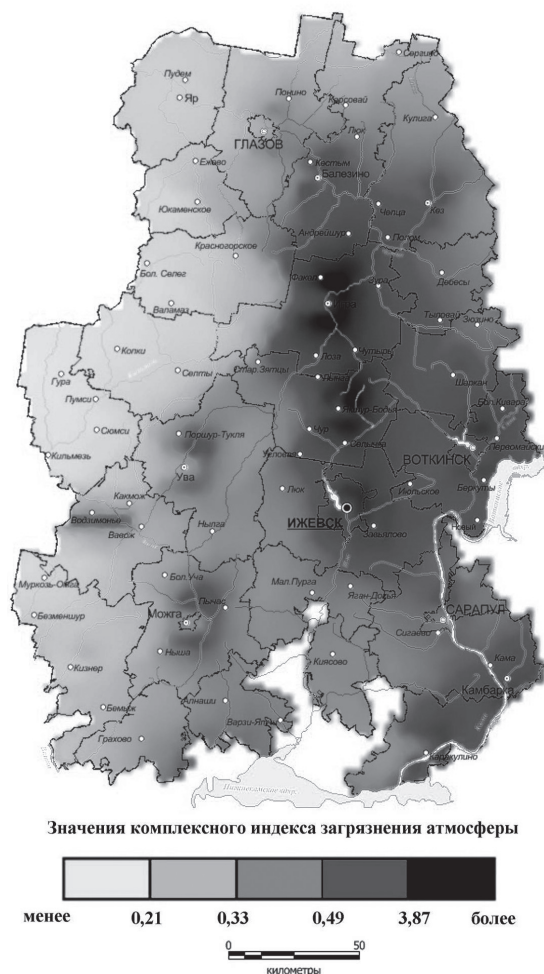


Рис. 3. Среднегодовые значения комплексного индекса загрязнения атмосферы на территории Удмуртской республики
[Fig. 3. Average annual values of the complex index of atmospheric pollution in the territory of the Udmurt Republic]

Согласно данным официальных источников [3] мониторинг за состоянием атмосферы на территории УР проводился только в г. Ижевске (значения КИЗА в 2022 году составило 10). В то же время, ведущими загрязнителями в г. Ижевске стали не учитываемые в математической модели специфические загрязнители, такие как формальдегид (среднегодовая концентрации составила 4,5 ПДК), бенз(а)пирен (среднегодовая концентрации составила 1,3ПДК).

Высокой степенью сходимости отличалась полученная расчётным путем карта значений КИЗА республики Башкирия (рис. 4). Значения КИЗА в пунктах государственного мониторинга, полученные путем математического моделирования, имели расхождения с данными натурных измерений в пределах 1.

В то же время, используемая математическая модель В.И. Петрухина и В.И. Вишенского не предполагает учет влияния характера подстилающей поверхности (в т.ч. рельефа). Автором был проведен расчет уровня загрязнения на основании адаптированной (учитывающей рельеф) математической модели рассеяния для территории республики Башкортостан.

Картографическая визуализация полученного результата отражена на рисунке 5.

Анализ полученного картографического материала (см. рис. 5) показал увеличение расчетных значений КИЗА (в сравнении с исходной математической моделью В.А. Петрухина и В.А. Вишенского) при применении адаптированной модели на юго-восточной границе республики в районе г. Магнитогорска (Челябинской обла-

сти) и центрально-башкирского ареала загрязнения. Рост концентраций загрязнителей (оксида углерода, оксидов азота, диоксида серы) в непосредственной близости от г. Магнитогорска связан с ограничением переноса ЗВ в рамках используемой модели от такого значимого источников загрязнения атмосферы Челябинской области и республики Башкортостан (в рамках трансграничного переноса) как ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Наиболее расчлененный рельеф наблюдается в пределах западных отрогов Южного Урала в малоосвоенной в промышленном отношении восточной части республики Башкортостан, что делает незначительными расхождения полученных расчетных значений с учетом и без учета коэффициента рельефа. Затрудняет количественную оценку достоверности результатов эффективности используемой адаптированной модели и тот факт, что в пределах указанных территорий нет стационарных постов мониторинга за состоянием атмосферного воздуха. В то же время, указанный подход заслуживает внимания и нуждается в дальнейшей апробации на территориях с более расчлененным, горным рельефом (например, для регионов Восточной Сибири).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, была проведена оценка состояния атмосферного воздуха территории Приволжского и Уральского федеральных округов, республик Удмуртия и Башкортостан с применением методов математического моделирования. Полученные результаты характеризовались статистической достоверностью и высокой сходимостью.

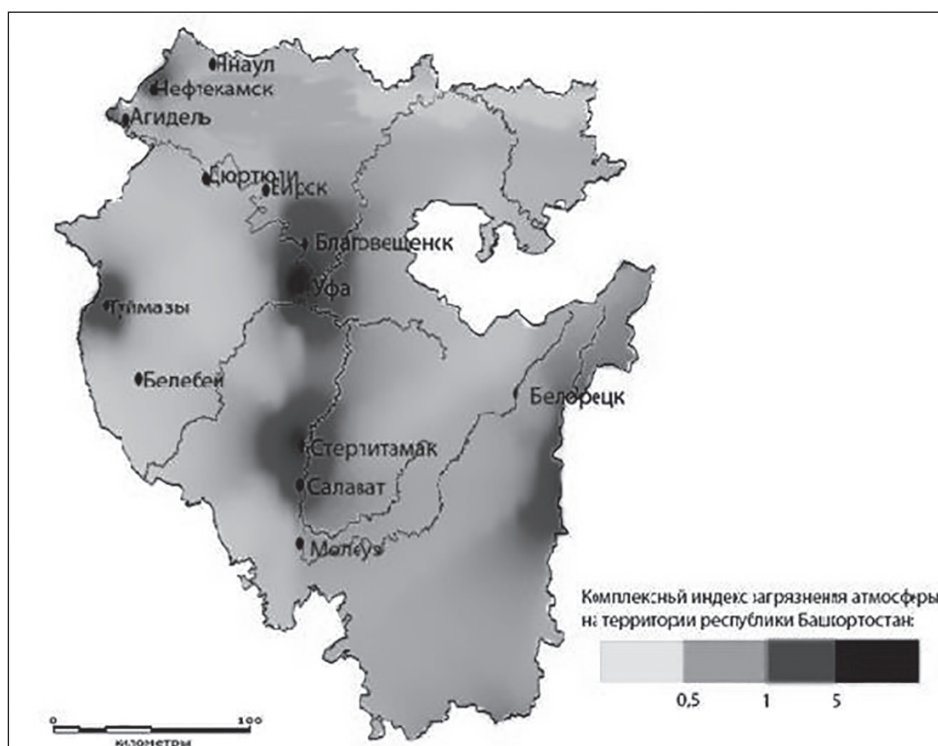


Рис. 4. Среднегодовые значения комплексного индекса загрязнения атмосферы на территории республики Башкортостан
[Fig. 4. Average annual values of the complex index of atmospheric pollution in the territory of the Republic of Bashkortostan]

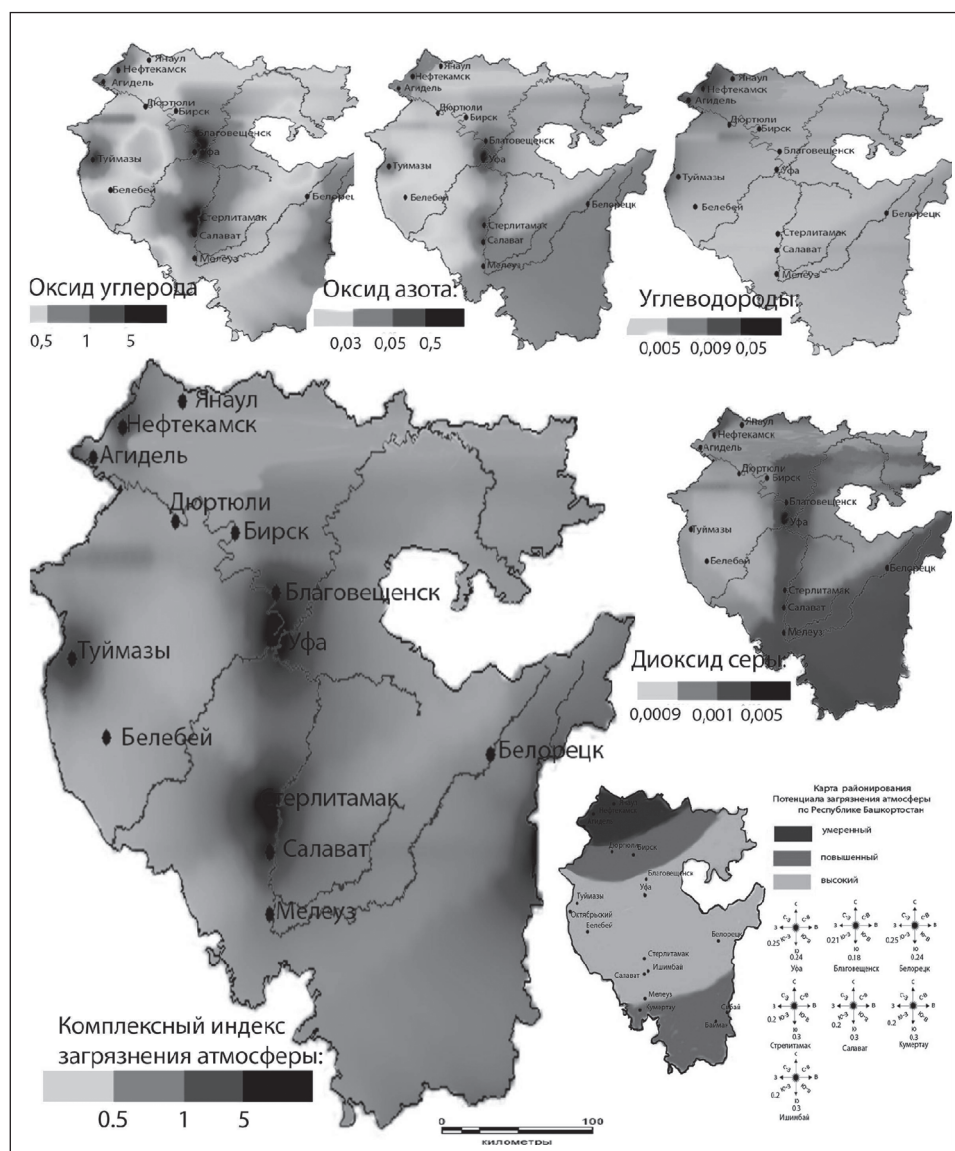


Рис. 5. Среднегодовые значения комплексного индекса загрязнения атмосферы на территории РБ, полученные на основании адаптированной модели (с учетом рельефа)

[Fig. 5. The average annual values of the complex index of atmospheric pollution in the territory of the Republic of Belarus, obtained on the basis of an adapted model (taking into account the relief)]

Для повышения релевантности получаемых результатов при мезомасштабной оценке состояния атмосферного воздуха территорий, характеризующихся расчлененным рельефом, был предложен поправочный коэффициент, учитывающий особенности орографии местности. Полученные расчетные значения уровня загрязнения атмосферы с применением адаптированной модели для территории республики Башкортостан показали незначительные расхождения с результатами, полученными с применением базовой модели. В то же время, предложенный подход нуждается в дальнейшей апробации для территорий с более расчлененным, горным рельефом (например, для регионов Восточной Сибири). Необходимо отметить методологическую зна-

чимость данного подхода для мезомасштабной оценки процессов рассеяния с учетом влияния рельефа для более расчлененной в орографическом отношении территории. Актуальность такого рода исследований возрастает в связи с формирующимся дефицитом детальной в пространственно-временном отношении информации о состоянии атмосферного воздуха регионов с одной стороны, и – с финансовыми ограничениями и высокой затратностью процедуры расширения государственной сети мониторинга, с другой стороны. Картографические результаты были размещены на геопортале «Комфортная среда»¹, создаваемого под руководством автора, как картографического инструмента обеспечения населения данными о состоянии атмосферного воздуха.

¹ Комфортная среда. – URL: <https://komfortsreda.udsu.ru/> (дата обращения: 19.02.2024). – Текст: электронный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха* / под ред. М. Е. Берлянта. Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. 129 с.
2. Василевский Д. Н., Лисина И. А., Василевская Л. Н. Суточная изменчивость концентраций загрязнителей воздуха в основные сезоны года во Владивостоке // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*, 2023, № 2, с. 112-121.
3. *Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Удмуртской Республики в 2022 году»* // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Удмуртской Республики АУ «Управление охраны окружающей среды и природопользования Минприроды Удмуртской Республики». – URL: <https://minpriroda-udm.ru/img/2/2/g22.PDF> (дата обращения: 27.11.2023). – Текст: электронный.
4. *Защита атмосферы от промышленного загрязнения: Справочник, ч. 2* / перевод с англ. Москва: Металлургия, 1988. 711 с.
5. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва: Наука, 1982. 319 с.
6. Методика расчета рассеяния аварийных выбросов, основанная на модели «тяжелого газа» / А. А. Шаталов, М. В. Лисанов, А. С. Печеркин, А. В. Пчельников, С. И. Сумской // *Безопасность труда в промышленности*, 2004, № 9, с. 46-52.
7. *Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1-6. Выпуск 12*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1988. 648 с.
8. Пикус И. М., Бутусов О. Б. Моделирование загрязнения лесов в районе автомагистралей // *Материалы научно-практической конференции «Пути повышения качества обучения в ВУЗах и конкурентоспособности молодых специалистов на рынке труда»*, 2008, с. 42-48.
9. Талерко Н. Н., Гарагер Е. К., Кузьменко Г. Г. Программный комплекс для оценки и прогнозирования радиационной ситуации в Чернобыльской зоне отчуждения // *Ядерная и радиационная безопасность*, 2010, вып. 3, с. 45-49.
10. Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города / И. В. Белов, М. С. Беспалов, Л. В. Клочкова, А. А. Кулешов, Д. В. Сузан, В. Ф. Тишкин // *Математическое моделирование*, 2000, т. 12, № 11, с. 56-82.
11. Шварц К. Г., Шкляев В. А. Моделирование процессов переноса примеси в свободной атмосфере с помощью квазитрехмерной модели // *Метеорология и гидрология*, 2000, № 8, с. 44-54.
12. *Экологический программный комплекс для персональной ЭВМ* / под ред. А. С. Гаврилова. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. 83 с.
13. Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area / P. V. Amosov, A. A. Baklanov, D. V. Makarov, V. A. Masloboev // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*, 2020, № 5, с. 80-89.
14. Petrukhin V. A., Vishensky V. A. Modelling and evolution of Eurasian Tropospheric background pollution based on the data bank of multi-year measurements // *Changing composition of the troposphere. Spatial Environment*, 1989, rep. N 17, WMO, pp. 83-86.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 18.04.2024
Принята к публикации: 02.06.2025

UDC 504.3.054

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/162-169>

Application of Mathematical Modelling Methods in Meso- and Small-Scale Assessment of Atmospheric Air State

A. V. Semakina ✉

Udmurt State University, Russian Federation
(1, Universitetskaya Str., Izhevsk, 426034)

Abstract. The purpose is a meso- and small-scale characterisation of atmospheric pollution using mathematical modelling tools.

Materials and methods. The method of mathematical modelling was applied to characterise the level of atmospheric air pollution for large areas. Concentrations of pollutants in the atmosphere were calculated for the territories of the Volga and Urals Federal Districts, the Republics of Udmurtia and Bashkortostan. To take into account the influence of orographic factor it was proposed to introduce a correction coefficient.

Results and discussion. The areas of increased pollution were identified. Application of the adapted technique (taking into account orographic factor) showed the necessity of its approbation for the territory with more fragmented relief (regions of Eastern Siberia).

Conclusions. The results of statistical verification showed the admissibility of using mathematical modelling methods in assessing the atmospheric air state of territories characterised by large size.

Key words: atmospheric air, mathematical modeling, dispersion of pollutants.

For citation: Semakina A. V. Application of Mathematical Modelling Methods in Meso- and Small-Scale Assessment of Atmospheric Air State. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografiya. Geoekologia*, 2025, no. 2, pp. 162-169 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/2/162-169>



REFERENCES

1. *Atmosfernaya diffuziya i zagryaznenie vozduha* [Atmospheric diffusion and air pollution] / pod red. M. E. Berl'janta. Leningrad: Gidrometeoizdat Hydrometeoizdat, 1982. 129 p. (In Russ.)
2. Vasilevskij D. N., Lisina I. A., Vasilevskaya L. N. Sutochnaya izmenchivost' koncentracij zagryaznitelej vozduha v osnovnye sezony goda vo Vladivostoke [Daily variability of concentrations of air pollutants in the main seasons of the year in Vladivostok]. Voronezh: *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologia*, no. 2, pp. 112-121. (In Russ.)
3. *State report «On the state and environmental protection of the Udmurt Republic in 2022»* // Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Udmurt Republic AU «Department of Environmental Protection and Nature Management of the Ministry of Natural Resources of the Udmurt Republic». – URL: <https://minpriroda-udm.ru/img/2/2/g22.PDF> (accessed 11.27.2023). – Text: electronic (In Russ.)
4. *Zashchita atmosfery ot promyshlennogo zagryazneniya: Spravochnik, ch. 2* [Protection of the atmosphere from industrial pollution: Handbook, Part 2] / perevod s angl. Moscow: Metallurgija, 1988. 711 p. (In Russ.)
5. Marchuk G. I. *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushchej sredy* [Mathematical modeling in the problem of the environment]. Moscow: Nauka, 1982. 319 p. (In Russ.)
6. Metodika rascheta rasseyanija avarijnyh vybrosov, osnovannaya na modeli «tyazhelogo gaza» [Methodology for calculating the dispersion of emergency emissions based on the «heavy gas» model] / A. A. Shatalov, M. V. Lisanov, A. S. Pecherkin, A. V. Pchelnikov, S. I. Sumskoy. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, no. 9. 2004, pp. 46-52. (In Russ.)
7. *Nauchno-prikladnoj spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Ch. 1-6. Vypusk 12* [Scientific and applied handbook on the climate of the USSR. Series 3. Long-term data. Hours 1-6. Issue 12]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 648 p. (In Russ.)
8. Pikus I. M., Butusov O. B. Modelirovanie zagryaznenija lesov v rajone avtomagistralej [Modeling of forest pollution in the highway area]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii «Puti povyshenija kachestva obucheniya v VUZah i konkurentosposobnosti molodyh specialistov na rynke truda»*, 2008, pp. 42-48. (In Russ.)
9. Talerko N. N., Garger E. K., Kuzmenko G. G. Programmyj kompleks dlya ocenki i prognozirovaniya radiacionnoj situacii v Chernobyl'skoj zone otchuzhdeniya [A software package for assessing and predicting the radiation situation in the Chernobyl exclusion zone]. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*, 2010, v. 3, pp. 45-49. (In Russ.)
10. Transportnaya model' rasprostraneniya gazoobraznyh primesej v atmosfere goroda [Transport model of gaseous impurities propagation in the city atmosphere] / I. V. Belov, M. S. Bepalov, L. V. Klochkova, A. A. Kuleshov, D. V. Suzan, V. F. Tishkin. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2000, vol. 12, no. 11, pp. 56-82. (In Russ.)
11. Schwartz K. G., Shklyayev V. A. Modelirovanie processov perenosy primesi v svobodnoj atmosfere s pomoshch'yu kvazitrehmernoj modeli [Modeling of impurity transfer processes in a free atmosphere using a quasi-three-dimensional model]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2000, no. 8, pp. 44-54. (In Russ.)
12. *Ekologicheskij programmyj kompleks dlya personal'noj EVM* [Ecological software package for personal computers] / pod red. A. S. Gavrilova. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 83 p. (In Russ.)
13. Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area [Estimating air pollution levels by numerical simulation depending on wind flow speed and dust source area] / P. V. Amosov, A. A. Baklanov, D. V. Makarov, V. A. Masloboev. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal*, 2020, no. 5. p. 80-89. (In Russ.)
14. Petrukhin V. A., Vishensky V. A. Modelling and evolution of Eurasian Tropospheric background pollution based on the data bank of multi-year measurements. *Changing composition of the troposphere. Spatial Environment*, 1989, rep. N 17, WMO, pp. 83-86.

Conflict of interests: The author declares no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 18.04.2024

Accepted: 02.06.2025

Семакина Алсу Валерьевна

Доцент кафедры экологии и природопользования Удмуртского государственного университета, г. Ижевск, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-8986-0047, e-mail: alsen13@list.ru

Alsu V. Semakina

Assoc. Prof. at the Department of Ecology and Environmental Management, Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-8986-0047, e-mail: alsen13@list.ru