

Методика оценки и диагноз пространственно-временной изменчивости загрязнения приземного слоя атмосферы на территориях с повышенной экологической нагрузкой

А. И. Маленёв[✉], Д. В. Гоцев, А. Н. Ларионов

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия»
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Российская Федерация
(394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а)

Аннотация. Цель – разработка методики оценки распространения вредных примесей в районе аэродрома государственной авиации и применение ее для оценки пространственно-временной изменчивости концентрации вредных примесей.

Материалы и методы. Разработана методика, позволяющая оценить и спрогнозировать точки с повышенной концентрацией вредных примесей на территории аэродрома в условиях повышенной интенсивности полетов авиации.

Результаты и обсуждение. На основе численного и натурного эксперимента данная методика апробирована на территории аэродрома государственной авиации «Балтимор». Эксперименты проводили в сухую погоду в период лето-осень 2021-2023 гг. Измеряли метеопараметры с помощью малогабаритной автоматической метеорологической станции (МАМС) и газоанализатора АМГ-510.

Выводы. По предложенной методике возможно прогнозирование загрязнения вредными примесями приземного слоя атмосферы при различных метеорологических условиях и интенсивности эксплуатации аэродрома государственной авиации с учетом географических и климатических особенностей его расположения, рельефа, мест расположения зданий и сооружений, их геометрических размеров. Зная точный характер распространения вредных примесей возможно эффективное планирование мероприятий по мониторингу и снижению загрязнения воздуха на аэродроме, сохранению здоровья работающего личного состава.

Ключевые слова: Аэродром государственной авиации, загрязнений воздушной среды, вредные примеси, приземный слой атмосферы, метеорологические параметры атмосферы.

Для цитирования: Маленёв А. И., Гоцев Д. В., Ларионов А. Н. Методика оценки и диагноз пространственно-временной изменчивости загрязнения приземного слоя атмосферы на территориях с повышенной экологической нагрузкой // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 4, с. 139-145. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/4/139-145>

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая обстановка является одним из важнейших показателей качества жизнедеятельности человека. Она оказывает существенное влияние на работоспособность и здоровье персонала, выполняющего обязанности на территориях с повышенной экологической нагрузкой. Подавляющее число аэродромов государственной авиации располагаются в непосредственной близости к жилым застройкам. Научно-методическое обеспечение экологического мониторинга таких территорий не удовлетворяет современным требованиям по точности информации об экологическом состоянии приземного слоя атмосферы в условиях интенсивных полетов авиации. Авиационная деятельность приводит к выбросу большого количества вредных примесей. Источниками выбросов являются воздушные суда, объекты инфраструктуры, а также автомобильная техника, обеспечивающая полеты. При горении авиационного топлива образуются оксиды углерода, азота, серы, взвешенные частицы и другие загрязняющие атмосферу вещества [1, 5]. Выбросы от воздушных судов

подлежат регулированию и контролю. Загрязняющие вещества перемещаются на большие расстояния с атмосферным воздухом посредством диффузии и направленного переноса. Причем изменение концентрации вредных примесей в пространстве и во времени в существенной степени будет зависеть от источника выброса, его мощности и характера подстилающей поверхности, наличия препятствий и застроек, метеорологической обстановки в районе выброса [6, 7]. Учет этих факторов при моделировании сложных процессов перемещения воздушных масс повышает точность прогнозирования расположения опасных зон с высокой концентрацией вредных примесей в атмосфере при различных направлениях и скоростях ветра, а также позволяет обеспечить рациональный мониторинг экологического состояния района аэродрома и прилегающей местности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На первом этапе анализируются характерные особенности, места расположения зданий и сооружений, рельеф местности объекта исследования.

© Маленёв А. И., Гоцев Д. В., Ларионов А. Н., 2025

✉ Маленёв Александр Игоревич, e-mail aleksandr-maleniov@yandex.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

На втором этапе проводится анализ параметров атмосферы: измерение температуры воздуха, скорость и направление ветра в приземном слое. С использованием спутниковых снимков и топографических карт составляется карта-схема аэродрома, определяются координаты источников выбросов и их мощность.

На третьем этапе с использованием построенных моделей проводится расчет концентраций вредных веществ в узлах координатной сетки с дискретизацией 100 метров, а при наличии препятствий – не более 20 метров. Начальные концентрации веществ каждого компонента выброса от каждого источника рассчитываются по формуле, приведенной в приказе № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [10]:

$$\sum_{j=1}^N C_{0,ij} = \sum_{j=1}^N \frac{4M_{iBPI}t}{\pi D^2 V_{e,n}}, \quad (1)$$

где M_{iBPI} – масса выброса; t – время работы двигателя в заданном режиме; D – диаметр сопла; $V_{e,n}$ – скорость ветрового потока; j – номер источника; N – количество возможных источников выбросов на аэродроме.

Для определения мощности выброса от каждого источника рассчитывается коэффициент выброса i -го вещества K_{iH} , который зависит от типа двигателя самолета и определяет количество выброса каждого загрязняющего вещества на кг израсходованного топлива (табл. 1). Для этого использовали «Методику расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации» Министерства транспорта Российской Федерации ФГУП [2].

На четвертом этапе рассчитывается индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) как сумма коэффициентов опасности вредных примесей ($C_i / ПДК_i$)^a с учетом классов их опасности (а), строится карта загрязнения воздуха на исследуемой территории. По изолиниям

определяются зоны, где ИЗА ≥ 7 (уровень загрязнения воздуха высокий и очень высокий (СанПин 1.2.3685-21)) [4]. В этих зонах рекомендуется устанавливать пункты мониторинга воздуха на аэродроме.

Методика апробирована на территории аэродрома государственной авиации «Балтимор». Эксперименты проводили в сухую погоду в период «лето-осень» 2021-2023 гг. Измеряли метеопараметры с помощью малогабаритной автоматической метеорологической станции (МАМС); концентрации оксида азота – газоанализатором АМГ-510.

Наибольший выброс загрязняющих веществ в атмосферу происходит при взлете и посадке воздушных судов. Эти выбросы включают в себя твердые частицы (сажа), оксиды азота (NO_x), угловой газ (CO), несгоревшие углеводороды (HC), а также диоксид серы (SO_x) [3]. Количество выбросов зависит от типа самолетного двигателя и режима его работы. Концентрации вредных примесей в выбросах известного источника количественно взаимосвязаны. Расположение точек пробоотбора воздуха, выбранных с учетом построенных моделей, и результаты эксперимента представлены на рисунке 1.

Диоксид азота – головной компонент выбросов с превалирующей концентрацией, его содержание в отработанных газах двигателей на 1-2 порядка превышает концентрации других компонентов. Диоксид азота считается аналит-маркером загрязнения атмосферного воздуха в результате эксплуатации воздушных судов на территории аэродромов. Поэтому для ускорения обработки информации рекомендуется проводить оценку загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха на территории аэродрома по содержанию в нем NO_2 .

Примеры сравнения измеренных и вычисленных концентраций оксида азота в атмосферном воздухе при различных метеоусловиях на аэродроме «Балтимор» приведены в таблице 2.

Таблица 1

Значение коэффициента K_{iH} выбросов в атмосферу отдельных вредных веществ при наземных операциях

[Table 1. The value of the coefficient of emissions of certain harmful substances into the atmosphere during ground operations]

Тип авиационного двигателя / Aircraft Engine Type	Коэффициент K_{iH} , кг ингредиента/кг топлива / Coefficient K_{iH} , kg of ingredient/kg of fuel				
	Оксид углерода CO / Carbon monoxide CO	Углеводо- роды CH / Hydrocarbons CH	Оксиды азота NO_x / Nitrogen Oxides NO_x	Оксиды серы SO_x / Sulfur Oxides SO_x	Не сгоревшие углеводороды / Unburned hydrocarbons
ПС-90А	0,0296	0,0053	0,0009	0,00024	0,00096
ТРДД СР	0,0261	0,0046	0,0007	0,00021	0,00093
Д-30	0,0276	0,0048	0,0008	0,00025	0,00098
Д-36	0,0193	0,0034	0,0084	0,00019	0,00089
Д-ЗОКУ	0,0546	0,0094	0,0055	0,00021	0,00094

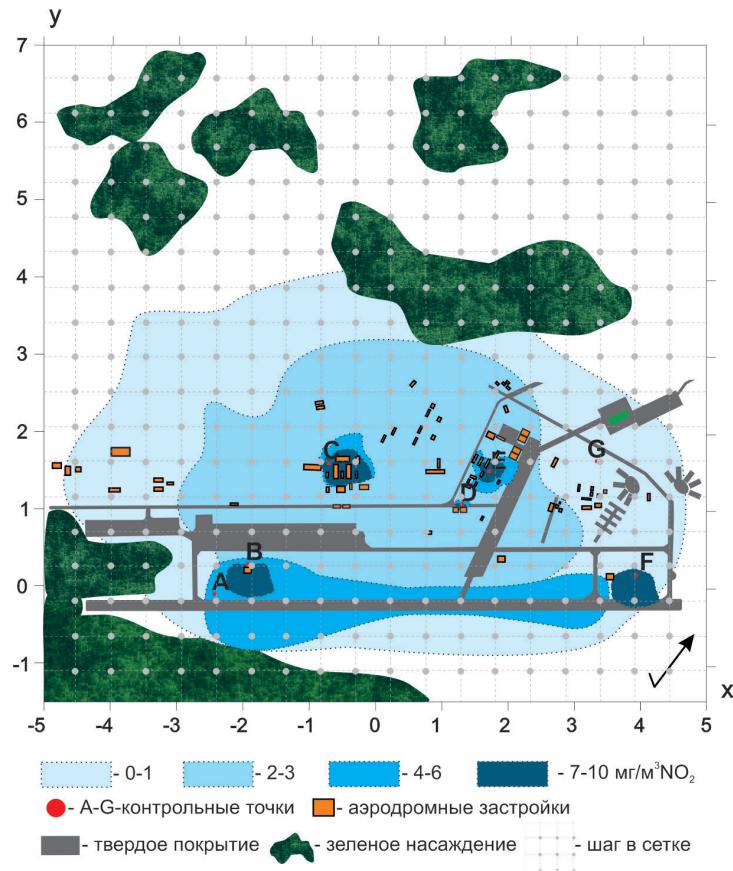


Рис. 1. Зоны с повышенными концентрациями NO_2 (mg/m^3) в районе аэродрома Балтимор

[Fig. 1. Zones with elevated concentrations of NO_2 (mg/m^3) in the Baltimore airfield area]

Таблица 2

Экспериментальное и модельное значение концентраций примесей в контрольных точках; скорость ветра – $V_{\text{вх}} = 5,0 \text{ м/с}$, направление ветра 275° (дата проведения эксперимента 22.07.2022 г.)

[Table 2. Experimental and model significance of impurity concentrations at the control points; wind speed – $V_{\text{vc}} = 5,0 \text{ m/s}$, wind direction 275° (date of the experiment 07.22.2022)]

Время / Time	Скорость ветра, м/с / концентрация NO_2 , $\text{мг}/\text{м}^3$ / Wind speed, m/s / NO_2 concentration, mg/m ³													
	Контрольные точки / Control points							Эксперимент / Experiment						
	Модель / Model							Эксперимент / Experiment						
	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G
10.00	5,0/ 8,1							4,9/ 10						
10.20		4,5/ 7,3							4,5/ 7,6					
10.40			2,9/ 10,0							3,1/ 10,0				
11.00				3,1/ 7,7							3,0/ 8,1			
11.20					4,5/ 9,0							4,4/ 9,2		
11.40						4,9/ 8,8							5,0/ 9,2	
12.00							5,0/ 1,0							4,8/ 1,1

$$\Delta_{\text{аэс. ош.}}^V = 0,48 \text{ м}^2/\text{м}^3; \delta_{\text{ому. ош.} j}^V = 11\%; \Delta_{\text{аэс. ош.}}^C = 0,53 \text{ м}^2/\text{м}^3; \delta_{\text{ому. ош.} j}^C = 7\%.$$

Наибольшая концентрация NO_x наблюдалась при юго-западном направлении ветра в районе командно-диспетчерского пункта, склада горюче-смазочных материалов, ангара авиационной ТЭЧ [8, 9]. Дополнительные исследования показали, что при юго-восточном направлении ветра повышенные концентрации NO_2 образуются в районе площадки стоянки авиационной техники, технического здания эскадрильи, а также командно-диспетчерского пункта. При усилении ветра более 5 м/с вне зависимости от его направления концентрация вредных примесей уменьшается в несколько раз и не превышает максимально допустимую суточную дозу. Расхождения результатов анализа оксида азота в полевых условиях и в лаборатории не превышали $\pm 15\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Представлена сравнительная оценка загрязнения приземного слоя атмосферного воздуха, полученная по стандартной и разработанной методикам. Предлагаемая методика отличается от стандартной тем, что комплексно учитываются неоднородности подстилающей поверхности, особенности типовых застроек аэродрома и источников выбросов, интенсивность эксплуатации воздушных судов.

Отчет

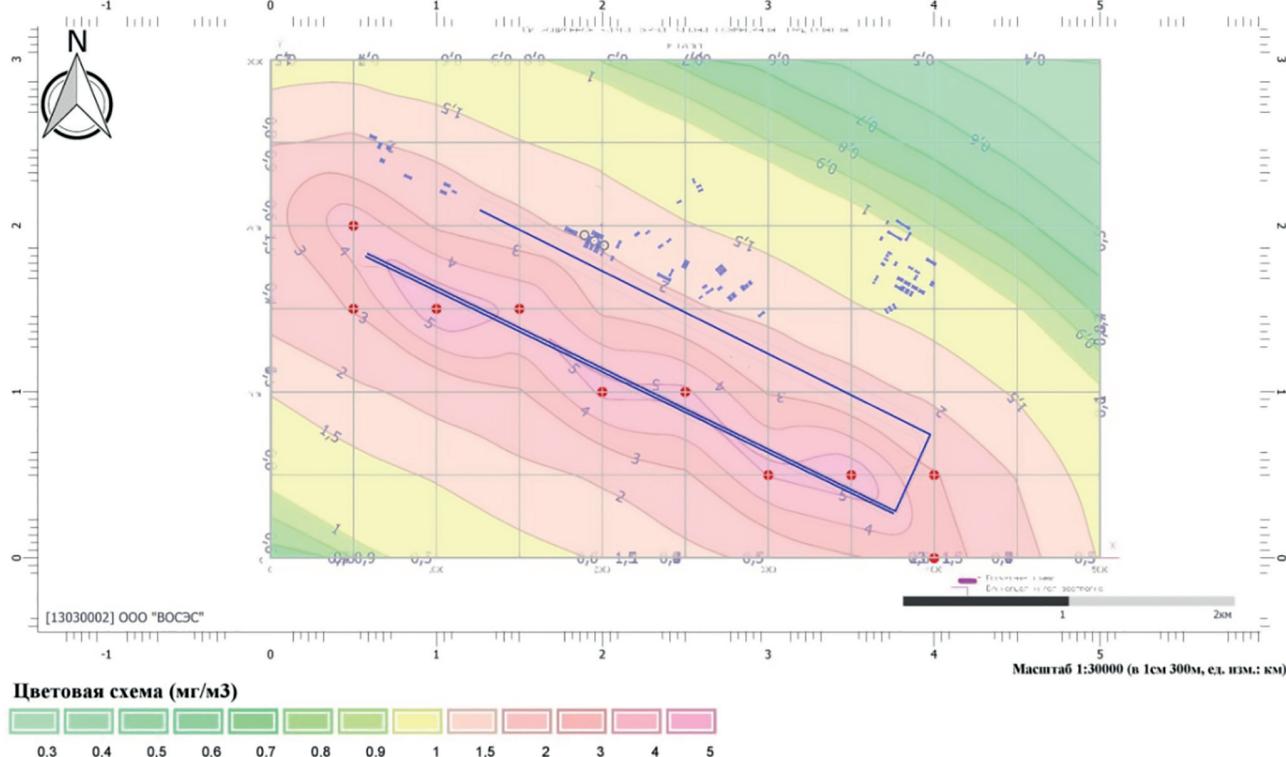
Вариант расчета: Аэродром (7116) - Расчет рассеивания с учетом застройки по МРР-2017 [19.02.2025 16:01 - 19.02.2025 16:01], ЛЕТО

Тип расчета: Расчеты по веществам

Код расчета: 0301 (Азота диоксид (Двуокись азота; пероксид азота))

Параметр: Концентрация вредного вещества (в мг/м³)

Высота 2м



Ruc. 2. Результаты распространения оксида азота NO_2 ($\text{мг}/\text{м}^3$) в районе аэродрома «Балтимор»
(по стандартной методике моделирования)

[Fig. 2. The results of the spread of nitrogen oxide NO_2 (mg/m^3) in the area of the Baltimore airfield
(according to the standard modeling methodology)]

Апробация методики проведена с использованием построенной модели и унифицированной программы расчета параметров загрязнения атмосферы «Эколог» Copyright Фирмы «Интеграл». Программа зарегистрирована в ООО «Воронежский орган Системы экологической сертификации» и применяется в том числе на территории аэродрома «Балтимор». Измерения концентрации диоксида азота проводили в точках, определенных по стандартной методике и в точках, установленных в результате моделирования распространения вредных примесей.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования без учета модели идентификации и прогнозирования локальных неоднородностей в воздушном потоке. Эксперимент выявил, что стандартная методика расчета загрязнения воздуха на аэродроме имеет ряд недостатков. Она не учитывает интенсивность работы аэродрома, реальные метеорологические параметры в режиме реального времени, образование вихревых потоков между типовыми застройками аэродрома, а, следовательно, и образование вторичных загрязнителей при определенных метеорологических параметрах.

Из-за несовершенства существующего программного обеспечения возникают трудности при моделировании в условиях сложного рельефа местности. Поэтому

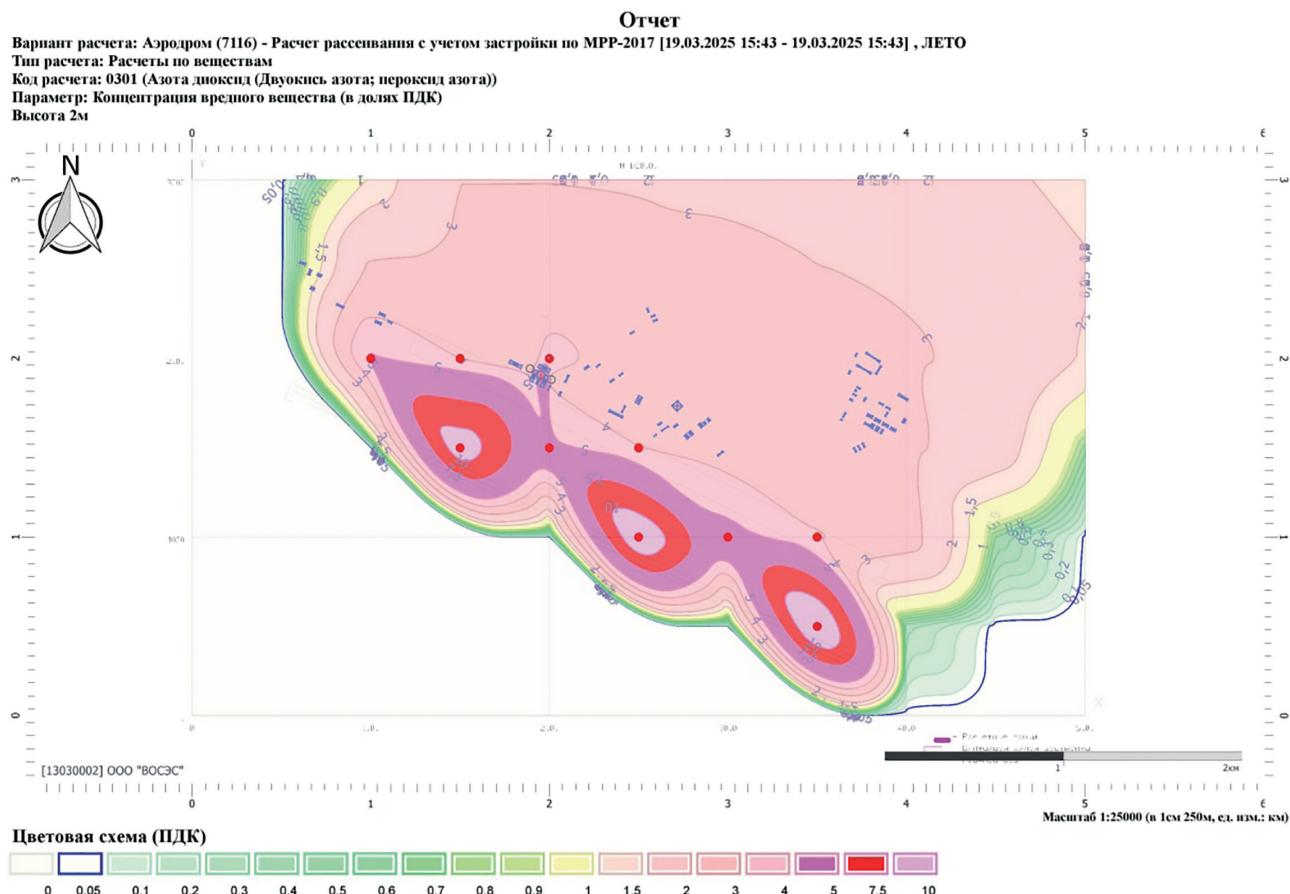


Рис. 3. Результаты распространения оксида азота NO₂ (мг/м³) в районе аэродрома «Балтимор» (по разработанной методике моделирования)

[Fig. 3. The results of the spread of nitrogen oxide NO₂ (mg/m³) in the area of the Baltimore airfield (according to the developed modeling methodology)]

для оценки пространственно-временной изменчивости концентраций вредных примесей используются усредненные данные о выбросах и метеорологических условиях, что приводит к недостоверным результатам экологического мониторинга, неверным прогнозам установления наиболее загрязненных участков на аэродроме.

Для повышения качества мониторинга необходимо использовать специальные модели, учитывающие эти характеристики. Результаты моделирования, представленные на рисунке 3, показали высокую степень совпадения рассчитанных данных с экспериментальными.

Превышение предельно допустимых концентраций NO₂ наблюдается непосредственно вблизи источников выброса, на взлетно-посадочной полосе, а также за зданиями, находящимися на территории аэродромного комплекса.

Таким образом, предлагается использовать комплексный подход, объединяющий данные со стационарных постов и математического моделирования распространения вредных примесей. Основой является сеть постов автоматизированных датчиков, расположенных в контрольных точках на территории аэродрома с наибольшей концентрацией вредных примесей. Данные посты осуществляют непрерывный монито-

ринг концентраций основных вредных примесей, таких как оксиды азота, углерода, серы и твердые частицы. Полученные данные поступают на рабочее место дежурного инженера-синоптика, дополняются результатами измерений, и проводится оперативный мониторинг в зонах потенциального загрязнения. Собранные данные анализируются и используются для оценки экологической обстановки на территории аэродрома и разработки рекомендаций по снижению негативного воздействия вредных примесей на личный состав.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика позволяет оценить и спрогнозировать загрязнения вредными примесями приземного слоя атмосферы, учитывая различные географические и климатические параметры местности, рельеф, расположение и геометрические размеры зданий и сооружений, а также интенсивность эксплуатации аэродрома государственной авиации. Зная точный характер распространения вредных примесей, возможно эффективное планирование мероприятий по мониторингу и снижению загрязнения воздуха на аэродроме, сохранению здоровья личного состава работающего на аэродроме. В рамках предложенного подхода достига-

ется возможность пространственно-временного прогнозирования распространения вредных примесей не только на аэродромах государственной авиации, но и на различных объектах повышенного экологического риска со сложным рельефом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базарский О.В., Косинова И.И., Фонова С.И. Математическая модель для прогнозирования пространственного распределения вредных веществ на городских магистралях // *Инженерные изыскания*, 2015, № 10, с. 36-42.
2. *Методика расчета выбросов загрязняющих веществ движителями воздушных судов гражданской авиации*, 2008.
3. Маленёв А.И. Разработка параметров экологического мониторинга (на примере территории аэродромов государственной авиации) // *Успехи современного естествознания*, 2024, № 5, с. 44-57.
4. *Об утверждении санитарных правил и норм СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»*, 2021.
5. Базарский О.В., Косинова И.И., Фонова С.И. Математическое моделирование загрязнения приповерхностных отложений аэрозольными частицами // *Инженерные изыскания*, 2015, № 5-6, с. 76-80.
6. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Маслова Н.В. *Авиационно-ракетные кластеры и окружающая среда*. Москва: Инфа-М, 2022. 266 с.
7. Рымаков А.Г. *Рассеивание вредных примесей в воздухе приземного слоя*. Москва: Миси-МГСУ, 2022. 44 с.
8. Маленёв А.И., Драбо А.И., Пигарев А.Е. Математическое моделирование турбулентного ветрового потока // *Успехи современной науки*, 2017, т. 9, № 3, с. 113-118.
9. Маленёв А.И., Драбо А.И., Пигарев А.Е. Математическое моделирование векторного поля ветра при обтекании искусственных сооружений // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, 2015, № 4, с. 22-30.
10. Приказ Минприроды России от 06.06.2017 N 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», 2017.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 15.04.2025
Принята к публикации: 25.11.2025

UDC 551.1/4

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/4/139-145>

ISSN 1609-0683

The Methodology for Assessing and Diagnosing the Spatial-Temporal Variability of Ground-Level Atmospheric Pollution in Areas with Increased Environmental Stress

A. I. Malenev[✉], D. V. Gotsev, A. N. Larionov

Military Educational and Scientific Center «Air Force Academy»
named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Russian Federation
(54a, Starikh Bolshevikov Street, Voronezh, 394064)

Annotation. The aim is to develop a methodology for assessing the spread of harmful impurities in the area of the airfield of state aviation and its application to assess the spatial and temporal variability of the concentration of harmful impurities.

Materials and methods. A technique has been developed to assess and predict points with increased concentrations of harmful impurities on the territory of an airfield in conditions of increased aviation flight intensity.

Results and discussion. Based on numerical and field experiments, this method was tested at the Baltimor State Aviation Airfield. The experiments were conducted in dry weather during the summer and autumn of 2021-2023. Meteorological parameters were measured using a small-sized automatic meteorological station (MAMS) and an AMG-510 gas analyzer.

Conclusions. According to the proposed methodology, it is possible to predict the pollution of the surface layer of the atmosphere with harmful impurities under various meteorological conditions and the intensity of operation of the state aviation airfield, taking into account the geographical and climatic features of its location, topography, locations of buildings and structures, and their geometric dimensions. Knowing the exact nature of the distribution of harmful impurities, it is possible to effectively plan measures for monitoring and reducing air pollution at the airfield, as well as preserving the health of personnel working at the airfield.

Key words: State aviation airfield, air pollution, harmful impurities, surface layer of the atmosphere, meteorological parameters of the atmosphere.

For citation: Malenev A. I., Gotsev D. V., Larionov A. N. The Methodology for Assessing and Diagnosing the Spatial-Temporal Variability of Ground-Level Atmospheric Pollution in Areas with Increased Environmental Stress. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Серия: География. Геоэкология*, 2025, no. 4, pp. 139-145. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/4/139-145>

© Malenev A. I., Gotsev D. V., Larionov A. N., 2025

✉ Malenev A. Igorevich, e-mail: aleksandr-malenyov@yandex.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

REFERENCES

1. Bazarskij O. V., Kosinova I. I., Fonova S. I. Matematicheskaja model' dlja prognozirovaniya prostranstvennogo raspredele-nija vrednyh veshhestv na gorodskih magistraljah [Mathematical model for predicting the spatial distribution of harmful substances on urban highways]. *Inzhenernye izyskanija*, 2015, no. 10, pp. 36-42. (In Russ.)
2. Metodika rascheta vybrosov zagrjaznjajushhih veshhestv dvigateljami vozdushnyh sudov grazhdanskoj aviacii [Methodology for calculating pollutant emissions from civil aircraft engines], 2008. (In Russ.)
3. Malenjov A. I. Razrabotka parametrov jekologicheskogo monitoringa (na primere territorij ajerodromov gosudarstvennoj aviacii) [Development of environmental monitoring parameters (using the example of the territories of state aviation airfields)]. *Uspehi sovremennoj estestvoznanija*, 2024, no. 5, pp. 44-57. (In Russ.)
4. Ob utverzhdenii sanitarnyh pravil i norm SanPin 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovanija k obespecheniju bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlja cheloveka faktorov sredy obitanija» [On the approval of sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685-21 «Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans»], 2021. (In Russ.)
5. Bazarskij O. V., Kosinova I. I., Fonova S. I. Matematicheskoe modelirovaniye zagrjaznenija pripoverhnostnyh otlozhenij ajerozol'nymi chasticami [Mathematical modeling of pollution of near-surface sediments by aerosol particles]. *Inzhenernye izyskanija*, 2015, no. 5-6, pp. 76-80. (In Russ.)
6. Kochetova Zh. Ju., Bazarskij O. V., Maslova N. V. *Aviacionno-raketnye klastery i okruzhajushhaja sreda* [Aviation and missile clusters and the environment]. Moscow: Infa-M, 2022. 266 p. (In Russ.)
7. Rymakov A. G. *Rasseivanie vrednyh primej v vozduhe prizemnogo sloja* [Dispersion of harmful impurities in the air of the surface layer]. Moscow: Misi-MGSU, 2022. 44 p. (In Russ.)
8. Malenjov A. I., Drabo A. I., Pigarev A. E. Matematicheskoe modelirovaniye turbulentnogo vetrovogo potoka [Mathematical modeling of turbulent wind flow]. *Uspehi sovremennoj nauki*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 113-118. (In Russ.)
9. Malenjov A. I., Drabo A. I., Pigarev A. E. Matematicheskoe modelirovaniye vektorogo polja vetra pri obtekaniyu iskusstvennyh sooruzhenij [Mathematical modeling of the wind vector field when flowing around artificial structures]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii*, 2015, no. 4, pp. 22-30. (In Russ.)
10. Prikaz Minprirody Rossii ot 06.06.2017 N 273 «Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseivanija vybrosov vrednyh (zagrjaznjajushhih) veshhestv v atmosfernom vozduhe» [Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated 06.06.2017 N 273 «On approval of calculation methods for the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in atmospheric air»], 2017.

Conflict of interest: The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 15.04.2025

Accepted: 25.11.2025

Маленёв Александр Игоревич

Начальник лаборатории Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0105-0715, e-mail aleksandr-malenyov@yandex.ru

Гопцев Дмитрий Владимирович

Доктор физико-математических наук, доцент Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-0100-4762, e-mail rbgotsev@mail.ru

Ларионов Алексей Николаевич

Доктор физико-математических наук, профессор Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0105-0715, e-mail larionovan@yandex.ru

Alexander I. Malenev

Head of the Laboratory of the Military Educational and Scientific Center «Air Force Academy» named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0105-0715, e-mail: aleksandr-malenyov@yandex.ru

Dmitry V. Gotsev

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. at the Military Educational and Scientific Center «Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-0100-4762, e-mail: rbgotsev@mail.ru

Alexey N. Larionov

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof. at the Military Educational and Scientific Center «Air Force Academy» named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin, Voronezh, Russian Federation, ORCID: ORCID 0000-0003-0105-0715, e-mail: larionovan@yandex.ru