

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКА АТМОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

METHOD FOR LOCALIZING THE SOURCE OF ATMOSPHERIC POLLUTION

**A. Bogomolov
I. Shnaider**

Summary. With the growth of urbanization and the increasing number of man-made accidents, the tasks of environmental monitoring and localization of pollution sources are becoming increasingly important. A method has been developed for identifying the location of atmospheric pollution sources, along with a software system based on it. The system integrates a production model for calculating pollutant dispersion — taking into account the influence of precipitation and based on a modified D. Ermak equation — with a particle swarm optimization (PSO) algorithm to determine the coordinates of atmospheric pollution sources. The system considers meteorological conditions, including humidity, precipitation, and wind speed, and utilizes data from environmental monitoring sensors within the studied area. A distinctive feature is an intuitive visual interface that enables calculation and visualization of pollution dispersion from registered sources on a geographic map and a concentration heatmap. Numerical experiments demonstrate the required localization accuracy. The advantages and limitations of the proposed approach are discussed. Prospects include applications in industrial zones, urban environmental monitoring, and civil protection systems.

Keywords: ecology, pollutant, particle swarm optimization method, pollution sources, localization problem, simulation modeling, pollution dispersion, ecological monitoring.

Введение

Необходимость своевременного обнаружения источника выброса атмосферного загрязнителя, а также прогнозирования пространственного расположения загрязняющего вещества критически важны для принятия оперативных мер по защите здоровья населения и минимизации экологического ущерба. Особенно актуальными эти задачи становятся в случае несанкционированных выбросов, техногенных аварий или террористических угроз, когда информация об источни-

Богомолов Алексей Сергеевич
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
bogomolov@iptmuran.ru
Шнейдер Илья Андреевич
Аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»
es1098@mail.ru

Аннотация. В условиях роста урбанизации и числа техногенных аварий задачи экологического мониторинга и локализации источников загрязнений приобретают особую значимость. Разработан метод поиска локации источников атмосферных загрязнений и программный комплекс на его основе, интегрирующий производственную модель расчета распространения загрязнителя с учетом влияния осадков, основанную на модифицированном уравнении Д. Ермака, с алгоритмом метода роя частиц (PSO) для определения координат источников атмосферного загрязнения. Комплекс учитывает метеоусловия, включая влажность, осадки и скорость ветра, и использует данные с датчиков экологического мониторинга на исследуемой территории. Особенностью является интуитивно понятный визуальный интерфейс программного комплекса с возможностью расчета и отображения распространения загрязнения от зарегистрированных источников на географической картосхеме и тепловой карте концентраций. Численные эксперименты демонстрируют необходимую точность локализации. Рассмотрены преимущества и ограничения предлагаемого подхода. Перспективы включают применение в промышленных зонах, городском экомониторинге и системах гражданской защиты.

Ключевые слова: экология, поллютант, метод роя частиц, источники загрязнения, задача локализации, имитационное моделирование, распространение загрязнителя, экологический мониторинг.

ке загрязнения заранее отсутствует, а данные поступают только с датчиков концентрации в воздухе.

Для решения подобных задач в последние десятилетия были предложены различные методики, такие как методы прямого перебора по сетке, градиентные методы, генетические алгоритмы, а также методы, основанные на машинном обучении. Многие из них сталкиваются с проблемами высокой вычислительной сложности, нестабильности при наличии шумов в данных или ограниченной применимости в реальном времени.

В работе [1] предложен метод, основанный на лагранжевой модели и обратной динамике частиц, позволяющий с высокой точностью реконструировать возможные зоны источников загрязнений на региональном уровне. Авторы демонстрируют эффективность модели в условиях ограниченной наблюдательной информации и акцентируют внимание на её применимости в реальном времени. Исследование [2] акцентирует внимание на идентификации и смягчении загрязнений воздуха внутри помещений на основе мониторинговых данных. Рассматриваются современные тренды в этой области, включая использование портативных сенсоров и методов статистического анализа для интерпретации источников выбросов и повышения качества воздуха в замкнутых пространствах.

Работа [3] рассматривает химическую эволюцию дождевых осадков в условиях экстремальных осадков в мегаполисах, что позволяет выявить вклад атмосферных загрязнителей в состав атмосферной влаги. Такой подход расширяет представления о путях осаждения загрязняющих веществ и дополняет традиционные методы идентификации источников. В [4] предложен способ интеграции данных о концентрациях загрязнителей на сетке с траекториями обратного переноса, что позволило существенно повысить пространственную точность локализации источников. Метод сочетает физически обоснованные модели с наблюдаемыми данными, демонстрируя практическую ценность для управления качеством воздуха.

Исследование [5] посвящено оценке эффективности систем мониторинга качества воздуха в промышленных зонах. Авторы предлагают метод оценки способности сети детектировать эпизоды загрязнений и отслеживать их источники, что особенно важно для своевременного принятия управленческих решений. В работе [6] рассматриваются превентивные меры и методы выявления источников загрязнения в химико-промышленных парках, с акцентом на структурные особенности таких территорий и особенности распространения выбросов. В продолжение данной темы [7] анализируют подход к определению области источников при ограниченном числе стационарных постов наблюдения. Предложенный подход демонстрирует потенциал к применению в условиях слабой пространственной дискретизации мониторинга.

В работе [8] исследуются разнообразные источники загрязнения воздуха в сложной городской среде Хорватии, используя интеграцию эмпирических данных и модельных расчётов. Работа подчёркивает значимость локальных факторов и их взаимодействия с метеоусловиями.

В систематическом обзоре [9] проанализировано применение алгоритмов искусственного интеллекта

в задачах мониторинга и прогноза загрязнения воздуха. Отмечается рост интереса к гибридным моделям, сочетающим физику процесса с машинным обучением, особенно в задачах краткосрочного прогноза и классификации источников.

Исходя из анализа существующих методологий идентификации источников атмосферных выбросов, одной из эффективных стратегий в подобных условиях является использование численных методов оптимизации, позволяющих по данным о концентрациях в определённых точках пространства оценить вероятное местоположение источника. В настоящей работе в качестве основы для решения данной обратной задачи применяется алгоритм метода роя частиц (МРЧ), известный своей простотой реализации, устойчивостью к локальным минимумам и хорошей сходимостью даже в условиях ограниченного объёма исходных данных. В качестве физической модели распространения загрязняющего вещества используется разработанная авторами продукционная модель распространения загрязнителя — модифицированное уравнение Д. Ермака, описывающее перенос и рассеяние примесей в атмосфере с учётом воздействия ветра, жидких осадков и сухого осаждения.

Целью настоящего исследования является разработка программного комплекса, позволяющего интегрировать разработанную ранее авторами продукционную модель расчета распространения загрязнителя с алгоритмом МРЧ для поиска источника загрязнения на основе собранных системой датчиков экологического мониторинга данных о концентрации поллютантов в атмосферном воздухе. Особенностью разработанного комплекса является наличие визуального интерфейса и системы отображения и сохранения результатов моделирования на географической картосхеме и тепловой карте концентраций, что делает инструмент не только аналитическим, но и прикладным средством для специалистов в области экологического мониторинга, гражданской защиты и городского управления.

1. Постановка задачи локализации источников повышенного атмосферного выброса

Общая задача локализации источников повышенного атмосферного выброса может быть формально представлена следующим образом. Пусть территория S подвергается загрязнению поллютантом P вследствие функционирования на территории S' множества источников загрязнения Ω . Множество Ω включает подмножество Ω' источников загрязнения с известными координатами и задекларированными интенсивностями выброса. Также на территории S расположена система датчиков $\Sigma(t)$ в известных контрольных точках. Известно, что выбросы источников из множества Ω' не превышают задекларированных значений, при которых суммарное

загрязнение от источников из этого множества не превышает некоторого известного значения, наблюдаемого ранее (или предельно допустимой концентрации поллютанта P). При этом на некоторых датчиках системы $\Sigma(t)$ наблюдается достаточно большое превышение данного значения. Требуется по наблюдениям метеоданных $X(t)$ и концентрации поллютанта $Y(t)$ на датчиках $\Sigma(t)$ в течение интервала времени $[t_0, t_1]$ определить источник из $\Omega \setminus \Omega'$, выбросы которого повлекли это превышение.

Данную задачу можно рассматривать как обратную к задаче расчёта рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Поиск источника может быть сведен к поиску глобального максимума функции распространения загрязнителя.

2. Метод решения задачи локализации источника атмосферного загрязнения

Предлагаемый метод решения данной задачи включает в себя следующие шаги:

- первоначальный анализ данных экологического мониторинга и метеорологических наблюдений

с целью выявления временных отрезков, на которых фиксируется превышение ПДК поллютанта;

- проведение симуляций с использованием производственной модели для расчёта распространения загрязнителей, выброшенных зарегистрированными источниками на данных временных отрезках и их отрисовки на картосхеме исследуемого участка;
- проведение симуляций поиска источников загрязнений с использованием метода роя частиц и их отображение на картосхеме исследуемого участка;
- наложение и сравнение результатов имитационного моделирования и формирование предположений о местонахождении возможных незарегистрированных источников выбросов.

В качестве функции распространения атмосферного загрязнителя использовалась разработанная авторами ранее [10] производственная модель расчета распространения загрязнителя с учетом сухого осаждения и влияния влажности и атмосферных осадков:

$$C(x, y, z) = \begin{cases} \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{W_{set}(z - H)}{2K_z} - \frac{W_{set}^2 \sigma_z^2}{8K_z^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z - H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z + H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right. \\ \left. - \sqrt{2\pi} \frac{W_0 \sigma_z}{K_z} \exp\left(\frac{W_0(z + H)}{K_z} + \frac{W_0^2 \sigma_z^2}{2K_z^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{W_0}{\sqrt{2}K_z} + \frac{z + H}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \right], \text{без осадков} \\ \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{W_{set}(z - H)}{2K_z} - \frac{W_{set}^2 \sigma_z^2}{8K_z^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z - H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z + H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right. \\ \left. - \sqrt{2\pi} \frac{W_0 \sigma_z}{K_z} \exp\left(\frac{W_0(z + H)}{K_z} + \frac{W_0^2 \sigma_z^2}{2K_z^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{W_0}{\sqrt{2}K_z} + \frac{z + H}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \right]. \\ \cdot \frac{6}{\pi \rho d^3} \left(\frac{RH \cdot \vartheta \cdot v_w \cdot M_w}{1 - RH} + v_p M_p \right), \text{при осадках.} \end{cases} \quad (1)$$

Где $C(x, y, z)$ — концентрация атмосферного загрязнителя в данной точке пространства; x, y, z — координаты расчетной точки в метрах; H — высота источника загрязнения в метрах; Q — скорость выброса загрязнителя источником; u — скорость ветра в метрах в секунду; σ_y, σ_z — параметры гауссовского рассеивания в направлениях y и z ; $W_{set} = \rho g d^2 / 18\mu$ — скорость витания сферических частиц по закону Стокса; ρ — плотность частицы загрязнителя;

d — диаметр частицы загрязнителя; g — ускорение свободного падения; μ — вязкость воздуха; $W_0 = W_{dep} - \frac{1}{2}W_{set}$,

где $W_{dep} > 0$ — скорость сухого осаждения частиц загрязнителя, получаемая экспериментальным путем; K_z — коэффициенты турбулентной диффузии; M_w, M_p — молярные массы воды и загрязнителя; RH — относительная влажность воздуха (в долях); ϑ — коэффициент связывания воды с поллютантом; v_w, v_p — количество вещества воды и загрязнителя.

Для оптимизации (поиска максимума) функции распространения атмосферного загрязнителя был использован алгоритм роя частиц (МРЧ, Particle Swarm Optimization, PSO). Метод роя частиц является эвристическим оптимизационным алгоритмом, основанным

на моделировании поведения коллективов (роев) частиц в поиске оптимального решения, разработанным по принципам, наблюдаемым в природных коллективных системах. Его формальная модель основывается на динамике агентов (частиц), поведение которых ап-

проксирует координацию индивидов в стаях птиц и косяках рыб. Каждая частица в алгоритме характеризуется положением и скоростью в пространстве решений, обновляемыми с учётом собственного лучшего найденного решения и глобального или локального лучшего решения, обнаруженному группой. Такая схема взаимодействия отражает присущие природным системам механизмы индивидуального опыта и социального обмена информацией.

В основе МРЧ лежит набор частиц (потенциальных решений), которые перемещаются в пространстве поиска, обновляя свои позиции и скорости на основе личного опыта (лучшее решение, найденное данной частицей), группового опыта (лучшее решение, найденное всеми частицами) и инерции движения (исключает хаотичное движение частиц).

Каждая частица представляется координатами в многомерном пространстве, а её скорость управляет уравнением (2):

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 (p_i^{\text{best}} - x_i^{(t)}) + c_2 (g^{\text{best}} - x_i^{(t)}), \quad (2)$$

где: $v_i^{(t)}$ — скорость частицы i на шаге t ; $x_i^{(t)}$ — текущая позиция частицы; p_i^{best} — наилучшая найденная данной частицей позиция; g^{best} — наилучшая позиция среди всех частиц; ω — коэффициент инерции частицы; c_1, c_2 — коэффициенты обучения (влияния личного и группового опыта).

После обновления скорости обновляется позиция (3):

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)}. \quad (3)$$

Алгоритм продолжается до достижения заданного количества итераций или критерия остановки.

3. Программный комплекс поиска локации источника атмосферного загрязнения

Для автоматизированного поиска возможных решений задачи локализации источников атмосферного выброса на основе метода роя частиц и разработанной продукционной модели расчета распространения атмосферного загрязнителя с учетом влияния жидких осадков был разработан программный комплекс на высоконивневом языке программирования Python, позволяющий определять координаты потенциального источника повышенного атмосферного выброса на промышленной территории.

На вход подаются данные экологического мониторинга в заданный период времени (скорость и направление ветра, время суток, данные об инсоляции, концентрация загрязнителя) из базы SQL Server. Результатом

работы программы являются координаты сектора, содержащего потенциальный источник атмосферного загрязнения, его предполагаемая интенсивность, а также графическое отображение сектора на картосхеме исследуемого участка промышленной территории. Программный комплекс реализован как в виде десктопного приложения, так и веб-приложения с доступом через браузер. Исходный код проекта доступен по ссылке <https://github.com/schneider31/web-pso>.

4. Результаты моделирования

Для тестирования и оценки точности работы программного комплекса были проведены симуляции поиска источника атмосферного загрязнения по данным экологического мониторинга (концентрация сероводорода в атмосферном воздухе, метеоусловия) на участке местности 5 на 5 километров с единственным зарегистрированным источником загрязнения в виде предприятия по переработке газа. Были выбраны временные интервалы, при которых на датчике наблюдался устойчивый фон концентрации сероводорода система наблюдения находилась с подветренной стороны относительно предприятия. На рисунке 1 представлена отрисовка результатов моделирования. Черной линией указаны границы предприятия, черной меткой — расположение сенсора сбора данных, серыми метками — участки, предположительно содержащие источник загрязнения.

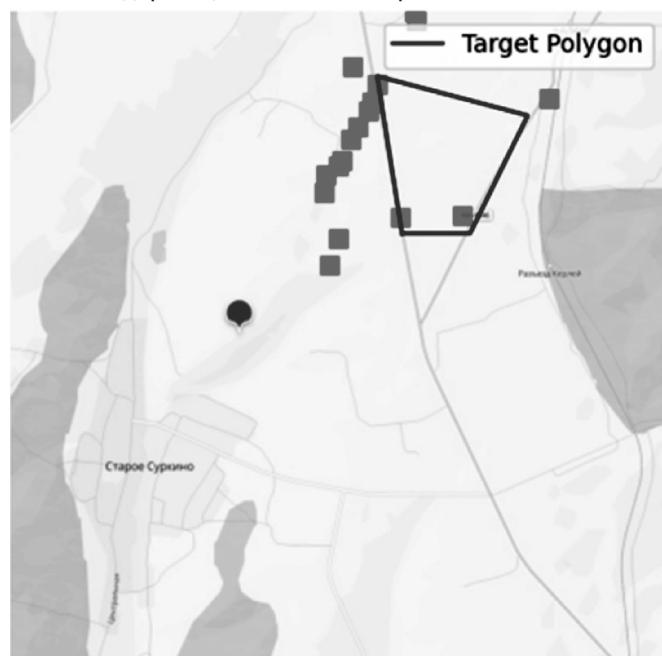


Рис. 1. Результаты поиска источника на картосхеме

Для симуляций использовались следующие параметры: число частиц — 100; число итераций — 300; $\omega=0.45$, $c_1=1.8$, $c_2=1.6$. Были проведены симуляции для 20 временных интервалов, среднее время моделирования одного временного интервала с данными параметра-

ми составило 40 минут на персональном компьютере с характеристиками: Процессор Ryzen 7 5700X 8 ядер, 3500 МГц, ОЗУ DDR4 32Гб 3200Мгц. Средняя абсолютная ошибка модели по результатам тестирования составила $MAE=137,78$ метра, что является достаточной точностью для проверки гипотезы о местонахождении на участке промышленной территории незарегистрированного источника атмосферного загрязнения. К преимуществам разработанного программного комплекса можно отнести: эффективность и скорость вычислений; учет влияния различных погодных факторов на рассеивание загрязняющих веществ; графическая визуализация получаемых результатов; возможность адаптации для моделирования различных типов загрязнителей и источников.

К основным ограничениям можно отнести следующее: не учитывается возможный сложный ландшафт местности или сооружения, которые могут влиять на рассеивание загрязняющих веществ, что увеличивает

ошибку для случаев со значительным рельефом местности; не учитываются возможные химические реакции в облаке шлейфа с другими загрязнителями.

Заключение

Разработанный программный комплекс на основе алгоритма роя частиц и производственной модели атмосферного загрязнения позволяет эффективно решать задачу локализации источников выбросов. Предложенный подход обеспечивает возможность определения координат и интенсивности нелегальных источников загрязнения, расчета распространения зарегистрированных источников, а также их отображение на картосхеме. Результаты тестирования подтверждают работоспособность системы в реальных условиях. Разработанный инструментарий может быть применён в системах экологического мониторинга и управления качеством воздуха, способствуя повышению экологической безопасности территорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Filippova M., Bakhteev O., Meshchaninov F., Burnaev E., Vanovskiy V. Regional-scale air pollution source identification using backward particle dynamics // Atmospheric Environment. 2025. Vol. 346. Article 121099. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.121099.
2. Chojer H., Branco P.T.B.S., Martins F.G., Alvim-Ferraz M.C.M., Sousa S.I.V. Source identification and mitigation of indoor air pollution using monitoring data — Current trends // Environmental Technology & Innovation. 2024. Vol. 33. Article 103534. DOI: 10.1016/j.eti.2024.103534.
3. Zeng J., Han G., Zhang S., Xiao X., Li Y., Gao X., Wang D., Qu R. Rainwater chemical evolution driven by extreme rainfall in megacity: Implication for the urban air pollution source identification // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 372. Article 133732. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133732.
4. Nunes dos Santos O., Hoinaski L. Incorporating gridded concentration data in air pollution back trajectories analysis for source identification // Atmospheric Research. 2021. Vol. 263. Article 105820. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105820.
5. Huang Z., Yu Q., Ma W., Chen L. Surveillance efficiency evaluation of air quality monitoring networks for air pollution episodes in industrial parks: Pollution detection and source identification // Atmospheric Environment. 2020. Vol. 223. Article 117240. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117240.
6. Yang S.-H., Chen J.-M. Air pollution prevention and pollution source identification of chemical industrial parks // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 159. Pp. 992–995. DOI: 10.1016/j.psep.2022.01.040.
7. Huang Z., Wang Y., Yu Q., Ma W., Zhang Y., Chen L. Source area identification with observation from limited monitor sites for air pollution episodes in industrial parks // Atmospheric Environment. 2015. Vol. 122. Pp. 735–744. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.063.
8. Jeričević A., Gašparac G., Maslač Mikulec M., Kumar P., Telišman Prtenjak M. Identification of diverse air pollution sources in a complex urban area of Croatia // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 243. Pp. 66–77. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.113.
9. Duan L., Fung P.L., Fu Q., Chen J., Huo J., Huang K., Wang G., Zaidan M.A., Guo Z., Hussein T. A robust black carbon prediction model derived from observational datasets in the Yangtze River Delta region, China // Environmental Pollution. 2025. Vol. 334. Article 123498. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.123498.
10. Shnaider I., Lapkovsky R., Urumbaeva Rosa & Zhabinskaya, Valeria. (2024). A Production Model for Calculating Pollutant Concentration Considering the Influence of Precipitation Washout and Dry Deposition. 1–4. 10.1109/MLSD61779.2024.10739434.

© Богомолов Алексей Сергеевич (bogomolov @ iptmuran.ru); Шнейдер Илья Андреевич (es1098@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»