

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА АТМОСФЕРНОГО ВЫБРОСА НА ОСНОВЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

Шнайдер И.А.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
es1098@mail.ru*

Лапковский Р.Ю., Кушникова Е.В.

*ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр Российской Академии Наук»,
Саратов, Россия
robitprv@gmail.com, lkushnikova@gmail.com*

Урумбаева Р.Н.

*ООО НПО "Эксперт24", Саратов, Россия
Urumbaeva@gmail.com*

Степановская И.А.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
irstepan@ipu.ru*

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и тестирования программного комплекса для локализации источника атмосферного выброса на основе алгоритма метода роя частиц, и разработанной модели распространения загрязнителя. Приведены результаты работы программного комплекса на основе данных наблюдений экомониторинга и оценка точности предложенного метода.

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

Введение

В современных условиях развития урбанизации, индустриализации и роста числа аварийных ситуаций, связанных с выбросами вредных веществ в атмосферу, задачи экологического мониторинга и локализации источников загрязнений приобретают особую значимость. Возможность своевременного обнаружения источника выброса, а также прогнозирования пространственного распределения 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 источнике загрязнения заранее отсутствует, а данные поступают только с датчиков концентрации в воздухе.

Для решения подобных задач в последние десятилетия были предложены различные подходы. К числу наиболее распространённых относятся 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. Наряду с алгоритмами оптимизации активно развиваются и физико-математические модели распространения загрязняющих веществ. Наиболее широко используются модели типа Гаусса, лагранжевые и эйлеровы модели переноса, модели с учётом химических реакций и осаждения. Несмотря на широкий спектр методологических подходов, ключевым остаётся вопрос выбора сбалансированной модели, обеспечивающей разумное соотношение между физической реалистичностью и вычислительной эффективностью.

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] предложили 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 [8] исследуют 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. Авторы [9] рассматривают элементный состав ультрадисперсных аэрозолей и выделяют основные антропогенные и природные источники в одном из наиболее загрязнённых регионов Европы, демонстрируя преимущества применения спектрометрических методов в задачах источниковой аппроксимации.

В [10] представили модель прогноза концентрации чёрного углерода, построенную на основе наблюдательных данных в дельте Янцзы. Используемый подход отличается высокой точностью и устойчивостью, демонстрируя потенциал применения в густонаселённых промышленных регионах. Модель позволяет надёжно отслеживать пространственно-временные паттерны загрязнения и может быть интегрирована в системы поддержки принятия решений.

В систематическом обзоре [11] 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 (Particle Swarm Optimization, PSO), 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, турбулентности и седиментации.

Целью настоящего исследования является разработка программного комплекса, позволяющего интегрировать разработанную ранее автором продукционную модель расчета распространения загрязнителя с алгоритмом PSO 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.

В настоящей статье описаны методологические и технические аспекты реализации программного комплекса, продемонстрированы результаты его применения в различных сценариях, а также определены потенциальные направления для дальнейшего развития предлагаемого подхода.

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. Требуется по наблюдениям метеоданных $X(t)$ и концентрации поллютанта $Y(t)$ на датчиках $\Sigma(t)$ в течение интервала времени $[t_n, t_k]$ определить:

- координаты источников из Ω' , которые на достаточно длительных интервалах из $[t_n, t_k]$ превышали задекларированную интенсивность выбросов поллютанта P , а также интенсивность и длительность выбросов;
- координаты источников из $\Omega \setminus \Omega'$ (то есть новых, незарегистрированных источников), которые на достаточно длительных интервалах из $[t_n, t_k]$ осуществляли выбросы поллютанта P , а также интенсивность этих выбросов.

В общем случае можно утверждать, что данная задача поставлена некорректно. Поэтому варианты её решения могут быть частью итерационного процесса, сопровождающегося решением вспомогательных задач. Среди таких вспомогательных задач рассмотрим следующий частный случай. Предположим, 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. При этом на некоторых датчиках системы $\Sigma(t)$ наблюдается достаточно большое превышение данного значения. Требуется найти источник из $\Omega \setminus \Omega'$, выбросы которого повлекли это превышение. При этом при достаточно частом повторении циклов мониторинга и сравнительно небольших территориях можем предполагать, что источник единичный. Содержательно такая задача состоит в определении участков исследуемой территории, на которых может находиться новый незарегистрированный источник загрязнения.

В определённом смысле, 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. Для решения предлагается применение комбинированного подхода, сочетающего в себе оптимизацию методом роя частиц функции распространения загрязнителя, представленной в виде разработанной авторами ранее продукционной модели шлейфа с учетом влияния седиментации и жидких атмосферных осадков. Результатом исследования будет программный комплекс, реализующий описанный в статье подход и позволяющий локализовать источник загрязнения на основе данных экологического мониторинга и метеорологических наблюдений за длительный период времени.

2. Подход к решению задачи

Подход к решению данной задачи включает в себя следующие шаги:

- первоначальный анализ данных экологического мониторинга и метеорологических наблюдений с целью выявления временных отрезков, на которых фиксируется превышение предельно допустимой концентрации поллютанта;
- проведение симуляций с использованием продукционной 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.

3. Используемые математические модели

3.1. Продукционная модель расчета распространения загрязнителя с учетом влияния влажности и атмосферных осадков

Для расчета распространения атмосферного загрязнителя использовалась разработанная ранее [12, 13] продукционная модель расчета распространения загрязнителя с учетом сухого осаждения и влияния влажности и атмосферных осадков:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{W_{set}(z-H)}{2K_z} - \frac{W_{set}^2 \sigma_z^2}{8K_z^2}\right) \left[\exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) - \sqrt{2\pi} \frac{W_0 \sigma_z}{K_z} \exp\left(\frac{W_0(z+H)}{K_z} + \frac{W_0^2 \sigma_z^2}{2K_z^2}\right) \right]$$

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{W_0}{\sqrt{2}K_z} + \frac{z+H}{\sqrt{2}\sigma_z}\right) \cdot \frac{6}{\pi\rho d^3} \left(\frac{RH \cdot \vartheta \cdot v_w \cdot M_w}{1-RH} + v_p M_p\right),$$

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 (в долях); ϑ – коэффициент связывания воды с поллютантом; v_w, v_p – количество вещества воды и загрязнителя.

3.2. Метод оптимизации роем частиц

Для оптимизации (поиска максимума) функции распространения атмосферного загрязнителя был использован алгоритм роя частиц (PSO, МРЧ). Метод роя частиц (PSO – Particle Swarm Optimization) 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 аппроксимирует 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, обнаруженного группой. Такая схема взаимодействия отражает присущие природным системам механизмы индивидуального опыта и социального обмена информацией.

Алгоритм PSO для поиска источника загрязнения:

- Инициализируем рой частиц (координаты источника и мощность выброса Q).
- Рассчитываем функцию приспособленности для каждой частицы (среднеквадратичное отклонение модельной концентрации от полученной системой датчиков экомониторинга).
- Обновляем личные и глобальные лучшие решения.
- Обновляем скорости и позиции частиц.
- Повторяем, пока не достигнут критерий остановки.

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);
- инерции движения, чтобы частицы не двигались хаотично.

Каждая частица представляется своими координатами, а её скорость подчиняется уравнению:

$$v_i^{(t+1)} = \omega v_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_i^{best} - x_i^{(t)}) + c_2 r_2 (g^{best} - x_i^{(t)}),$$

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; c_1, c_2 – коэффициенты обучения (влияния личного и группового опыта); r_1, r_2 – случайные числа в диапазоне $[0,1]$. После обновления скорости обновляется позиция частицы:

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

4. Архитектура программного комплекса 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 была разработана

программа на высокоуровневом языке Python, позволяющая определять координаты потенциального источника повышенного атмосферного выброса на промышленной территории.

- Модуль получения данных экологического мониторинга и погоды. Измеренные концентрации и некоторые данные о погоде выгружаются из реляционной базы данных путем отправки SQL-запроса к базе данных SQL-Server и обращения к API онлайн-сервиса open-meteo.
- Конфигурационный файл settings.py для настройки параметров симуляции: шаг координатной сетки, интенсивность выбросов зарегистрированных источников, их местоположение, дата и время симуляции, временной интервал одной итерации, количество итераций.
- Модуль расчета параметров Гауссова распределения σ_x и σ_y .
- Модуль расчета концентрации загрязнителя в точке пространства на основе разработанной продукционной модели с учетом седиментации и влияния жидких осадков.
- Модуль оптимизации методом роя частиц. Реализует алгоритм метода роя частиц, в качестве функции приспособленности используется среднеквадратичное отклонение модельной концентрации в точках интереса и полученной в этих точках датчиками экологического мониторинга
- Модуль отрисовки для отображения результатов работы алгоритма МРЧ на картосхеме исследуемого участка промышленной территории.

Результатом работы программы являются координаты секторов, содержащих потенциальный источник атмосферного загрязнения, а также графическое отображение секторов на картосхеме исследуемого участка промышленной территории. Программа реализована как в виде приложения для персонального компьютера или сервера, так и в виде веб-приложения с доступом через браузер. Результаты ее работы предназначены для передачи и анализа экспертами, исследующими места появления новых источников загрязнения.

5. Полученные 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, а система наблюдения находилась с подветренной стороны относительно предприятия. Результаты моделирования представлены на рисунке 1. На рисунке 1 синей линией указаны границы предприятия, синей меткой – расположение сенсора сбора данных, красными метками – участки, предположительно содержащие источник загрязнения.

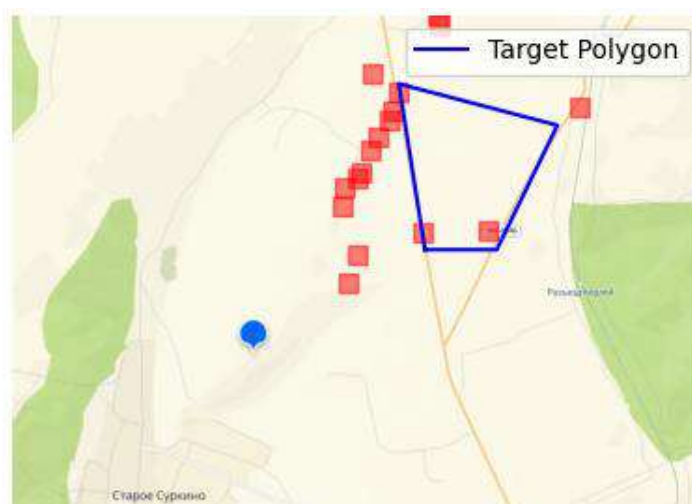


Рис. 1. Результаты поиска источника на картосхеме

Для симуляций использовались следующие параметры: число частиц – 100; число итераций – 300; $w=0.45$, $c_1=1.8$, $c_2=1.6$. Были проведены симуляции для 20 временных интервалов, среднее время моделирования одного временного интервала составило 45 минут. Средняя абсолютная ошибка модели по результатам тестирования составила $MAE=237,78$ метра.

6. Обсуждение

К преимуществам программного комплекса можно отнести:

- эффективность и скорость вычислений;
 - учет влияния различных погодных факторов на рассеивание загрязняющих веществ;
 - графическая визуализация получаемых результатов моделирования;
 - возможность адаптации для моделирования различных типов загрязнителей и источников.
- Ограничения представленного подхода:
- не учитывается возможный сложный ландшафт местности или сооружения, которые могут влиять на рассеивание загрязняющих веществ;
 - не учитываются возможные химические реакции в облаке шлейфа с другими загрязнителями.

7. Заключение

Разработанный программный комплекс на основе алгоритма роя частиц и продукционной 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.

Литература

1. *Filippova M., Bakhteev O., Meshchaninov F., et al.* Regional-scale air pollution source identification using backward particle dynamics // *Atmospheric Environment*. – 2025. – Vol. 346. – 121099.
2. *Chojer H., Branco P.T.B.S., Martins F.G., et al.* Source identification and mitigation of indoor air pollution using monitoring data – Current trends // *Environmental Technology & Innovation*. – 2024. – Vol. 33. – 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. – 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. – 105820.
5. *Huang Z., Yu Q., Ma W., et al.* 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. – 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. – P. 992–995.
7. *Huang Z., Wang Y., Yu Q., et al.* Source area identification with observation from limited monitor sites for air pollution episodes in industrial parks // *Atmospheric Environment*. – 2015. – Vol. 122. – P. 735–744.
8. *Jeričević A., Gašparac G., Maslač Mikulec M., et al.* Identification of diverse air pollution sources in a complex urban area of Croatia // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – Vol. 243. – P. 66–77. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.113.
9. *Pokorná P., Hovorka J., Hopke P.K.* Elemental composition and source identification of very fine aerosol particles in a European air pollution hot-spot // *Atmospheric Pollution Research*. – 2016. – Vol. 7, № 4. – P. 671–679.
10. *Chadalavada S., Faust O., Salvi M., et al.* Application of artificial intelligence in air pollution monitoring and forecasting: A systematic review // *Environmental Modelling & Software*. – 2025. – Vol. 185. – 106312.
11. *Duan L., Fung P.L., Fu Q., et al.* A robust black carbon prediction model derived from observational datasets in the Yangtze River Delta region, China // *Environmental Pollution*. – 2025. – Vol. 334. – 123498.
12. *Shnaider I., Bogomolov A., Lapkovsky R., et al.* An Approach to Locating Unknown Sources of Increased Air Emissions // 2023 16th International Conference Management of large-scale system development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2023. – P. 1–5.
13. *Shnaider I., Lapkovsky R., Urumbaeva R., et al.* A Production Model for Calculating Pollutant Concentration Considering the Influence of Precipitation Washout and Dry Deposition // 2024 17th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD), Moscow, Russian Federation, 2024. – P. 1–4.