

Решение задачи локализации несанкционированных источников загрязнения атмосферы средствами математического моделирования

И. А. Шнайдер¹, А. С. Богомолов^{1,2}, В. А. Кушников^{1,2}

¹Институт проблем точной механики и управления ФГБУН «Саратовский научный центр Российской академии наук» (г. Саратов, Российская Федерация)

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов, Российская Федерация)

Аннотация. Рассматривается задача локализации несанкционированных источников атмосферного загрязнения на промышленной территории в условиях воздействия переменных метеорологических факторов. Предложена математическая модель распространения загрязняющих веществ, в основе которой лежит уравнение переноса, расширяющая классическую модель гауссова шлейфа за счёт учёта процессов сухого осаждения и вымывания примесей атмосферными осадками, а также влияния относительной влажности на изменение массы частиц поллютанта. Задача идентификации источника сформулирована в виде некорректной обратной задачи и сведена к задаче минимизации функционала среднеквадратичного отклонения между расчётными и наблюдаемыми концентрациями. Для её решения применён метод роя частиц, обеспечивающий глобальную оптимизацию параметров источника при ограниченном объёме исходных данных. Разработан программный комплекс, реализующий предложенные модели и алгоритмы и обеспечивающий интеграцию с системами экологического мониторинга. Проведённые вычислительные эксперименты подтверждают повышение точности моделирования и эффективность предложенного подхода к локализации источников загрязнения по сравнению с существующими методами.

Ключевые слова: экологический мониторинг, поллютанты, распространение загрязнителя, локализация источника, задача локализации, имитационное моделирование

Для цитирования: Шнайдер И. А., Богомолов А. С., Кушников В. А. Решение задачи локализации несанкционированных источников загрязнения атмосферы средствами математического моделирования // *Журнал Средневожского математического общества*. 2026. Т. 28, № 3. С. 308–320. DOI: 10.15507/2079-6900.28.202603.308-320

Об авторах:

Шнайдер Илья Андреевич, младший научный сотрудник, Институт проблем точной механики и управления ФГБУН «Саратовский научный центр Российской академии наук» (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, 24), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4739-0130>, e-mail: es1098@mail.ru

Богомолов Алексей Сергеевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией системного анализа и управления Института проблем точной механики и управления ФГБУН «Саратовский научный центр Российской академии наук» (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, 24); профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6972-3181>, e-mail: alexbogomolov@ya.ru

Кушников Вадим Алексеевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией комплексных научных исследований Института проблем точной механики и управления ФГБУН «Саратовский научный центр Российской академии наук» (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, 24); профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (410012, Россия, г. Саратов, ул. Астраханская, 83), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9195-2546>, e-mail: kushnikoff@yandex.ru

Original article

MSC2020 86A22

Solution of a problem of localizing unauthorized sources of atmospheric pollution by means of mathematical modelling

I. A. Shnaider¹, A. S. Bogomolov^{1,2}, V. A. Kushnikov^{1,2}

¹*Institute of Precision Mechanics and Control, Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Saratov, Russian Federation)*

²*Saratov State University (Saratov, Russian Federation)*

Abstract. The problem of localizing unauthorized sources of atmospheric pollution in an industrial area under varying meteorological conditions is considered. A mathematical model of pollutant dispersion is proposed, based on the solution of the transport equation. The model extends the classical Gaussian plume model by incorporating dry deposition and wet scavenging processes. Also the model takes into account the effect of relative humidity on the variation of pollutant particle mass. The source identification problem is formulated as an ill-posed inverse problem and reduced to minimization of a root-mean-square deviation between predicted and observed concentrations. The particle swarm optimization method is applied to solve this problem, providing global optimization of source parameters under limited input data. A software implementing the proposed models and algorithms is developed, providing integration with environmental monitoring systems. Computational experiments demonstrate improved accuracy of modelling and confirm the effectiveness of the proposed approach for source localization in comparison with existing methods.

Keywords: environmental monitoring, pollutants, a pollutant dispersion, Gaussian plume, source localization, simulation

For citation: I. A. Shnaider, A. S. Bogomolov, V. A. Kushnikov. Solution of a problem of localizing unauthorized sources of atmospheric pollution by means of mathematical modelling. *Zhurnal Srednevolzhskogo matematicheskogo obshchestva*. 28:3(2026), 308–320. DOI: 10.15507/2079-6900.28.202603.308-320

И. А. Шнайдер, А. С. Богомолов, В. А. Кушников. Решение задачи локализации...

About the authors:

Il'ya A. Shnaider, Junior Researcher, Institute of Precision Mechanics and Control – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4739-0130>, e-mail: es1098@mail.ru

Aleksey S. Bogomolov, D.Sc. (Engineering), Leading Researcher, Head of the Laboratory of System Analysis and Management, Institute of Precision Mechanics and Control – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia); Professor, Saratov State University (83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6972-3181>, e-mail: alexbogomolov@ya.ru

Vadim A. Kushnikov, D.Sc. (Engineering), Chief Researcher, Head of the Laboratory for Integrated Scientific Research, Institute of Precision Mechanics and Control – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (24 Rabochaya St., Saratov 410028, Russia); Professor, Saratov State University (83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9195-2546>, e-mail: kushnikoff@yandex.ru

1. Введение

В современных условиях распространения промышленных производств и изменения климата растет актуальность вопросов загрязнения атмосферного воздуха. Особую опасность для экологии представляют новые неучтённые или нелегальные источники выбросов, которые затрудняют выполнение государственных нормативов по охране атмосферного воздуха и подрывают эффективность существующей системы экологического контроля [1]. Такие источники могут быть оперативно выявлены на основе анализа данных о превышении норм загрязнения и метеоданных. Задача их локализации может рассматриваться как обратная задача математического моделирования распространения загрязнителя.

На формирование и пространственное распределение шлейфов загрязнителей существенное влияние оказывают метеорологические факторы, в частности атмосферные осадки, которые способствуют процессам вымывания и осаждения примесей. Исследования показывают, что пренебрежение влиянием осадков может приводить к недооценке уровня загрязнения, особенно в районах с повышенной влажностью и частыми дождями, что, в свою очередь, усложняет оценку реального состояния атмосферного воздуха [2]. Традиционные модели рассеивания не всегда позволяют корректно определить координаты источников выбросов, особенно при сочетании множества факторов – рельефа местности, скорости и направления ветра, температуры и осадков.

Анализ нормативных документов, включая Приказ Минприроды России от 06.06.2017 № 273, показывает, что существующие методики ориентированы преимущественно на оценку воздействия стационарных источников в процессе проектирования промышленных объектов [3]. При этом влияние переменных метеорологических факторов, в том числе осадков, учитывается лишь в ограниченном объеме. В настоящее время отсутствуют систематические рекомендации, касающиеся локализации источников выбросов в реальном времени с учетом сухого осаждения и влияния жидких осадков.

В связи с этим актуальной научной задачей является разработка математических моделей и комплексов программ для моделирования распространения загрязнителя, учитывающих влияние на концентрацию сухого осаждения и жидких осадков, и решения на этой основе задач локализации новых источников загрязнения.

В области моделирования процессов рассеивания примесей при различных метеорологических условиях следует отметить труды А.В. Семакиной, в которых предложены математические подходы к описанию динамики загрязнителей воздуха [4]. В работах В.И. Рязанова разработаны методологические основы численного моделирования атмосферных загрязнений с использованием дистанционных измерений и обратных задач для оценки качества воздуха [5]. Численные методы решения обратных задач, позволяющие определять параметры источников по данным наблюдений концентраций, развиваются в работах Е.А. Панасенко и А.В. Старченко [6], А.А. Чубатова и В.Н. Кармазина [7].

Несмотря на значительные достижения в области моделирования атмосферного переноса загрязняющих веществ [8], вопросы учёта влияния сухого осаждения и осадков при решении задач локализации источников выбросов остаются недостаточно исследованными [9] в части влияния состава частиц, взаимодействия сухого и влажного осаждения, а также точности коэффициентов осаждения и их валидации экспериментальными данными. Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью автоматизации обработки больших объёмов данных, учёта погодных факторов в моделировании и обеспечения точного и оперативного определения параметров источников выбросов.

Целью исследования является разработка математической модели, численного метода и комплекса программ для решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения на промышленной территории с учётом процессов сухого осаждения и вымывания загрязнителей осадками.

2. Постановка задачи локализации несанкционированных источников атмосферного загрязнения

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 [10].

Формально задача поиска источника может быть сведена к задаче оптимизации целевой функции, представляющей среднеквадратичное отклонение предсказанной концентрации от измеренной на датчиках:

$$J(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [C_{\text{pred}}(x_i, y_i, z_i, Q, H) - C_{\text{obs}}(x_i, y_i, z_i)]^2} \longrightarrow \min_{\theta \in \Theta}.$$

Здесь

- $\theta = (x, y, z, Q, H)$ – вектор параметров источника, включающий координаты (x, y, z) , интенсивность выброса Q и высоту источника H ;
- $\Theta \subset \mathbb{R}^5$ – множество допустимых значений параметров источника:

$$\Theta = [x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}] \times [z_{\min}, z_{\max}] \times [Q_{\min}, Q_{\max}] \times [H_{\min}, H_{\max}];$$

- C_{pred} – концентрация, рассчитанная продукционной моделью шлейфа;
- C_{obs} – наблюдаемая концентрация на i -м датчике;
- N – количество контрольных точек наблюдений.

3. Продукционная модель распространения загрязнителя.

В основу разработанной продукционной модели была положена модель Д. Л. Эрмака, получаемая путем решения уравнения переноса (адвекции-диффузии) при граничных условиях Робина и Неймана при помощи преобразования Фурье. В модель введен коэффициент K_{RH} изменения концентрации поллютанта под действием осадков. Аэрозольные частицы в атмосфере никогда не существуют в изолированном виде, они находятся в динамическом взаимодействии с окружающим водяным паром. При этом ключевыми процессами, определяющими равновесное содержание воды в частице, являются эффект Рауля – растворённое вещество понижает давление насыщенного пара воды над каплей, что облегчает конденсацию молекул воды на частице и способствует её росту, и эффект Кельвина (кривизны) – чем меньше радиус капли, тем выше давление насыщенного пара над её поверхностью. Комбинация этих эффектов приводит к понижению давления за счёт растворённых веществ. Повышение давления из-за кривизны описывается уравнением Кёлера.

Влажность воздуха (RH) определяет, в какой мере эти процессы будут развиваться. При низкой влажности частицы остаются сухими, но по мере увеличения RH они начинают набирать воду. Вблизи насыщения ($RH \rightarrow 1$) наблюдается резкий рост количества конденсированной воды и переход частиц в капельное состояние. Это изменение массы можно описать коэффициентом

$$K_{RH} = \frac{m_s}{m_p},$$

который показывает, во сколько раз увеличилась масса частицы (а вместе с ней и эффективная концентрация загрязнителя) при данной влажности:

$$K_{RH} = 1 + \frac{RH \cdot \vartheta \cdot M_w}{M_p(1 - RH)}, \quad (3.1)$$

где RH – относительная влажность воздуха, ϑ – гигроскопический коэффициент связываемости поллютанта с водой, M_w – молярная масса воды, M_p – молярная масса загрязнителя. Значение K_{RH} показывает увеличение массы частицы загрязнителя за счет соединения с молекулами воды в процессе конденсации под воздействием атмосферной влажности, вызывающее пропорциональный рост концентрации загрязнителя в атмосфере.

Разработанная математическая модель примет вид:

$$C(x, y, z) = \begin{cases} \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) e_1 \left[e_2 - \sqrt{2\pi} \frac{W_0 \sigma_z}{K_z} e_3 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{W_0}{\sqrt{2K_z}} + \frac{z+H}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) \right], & \text{без осадков} \\ \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) e_1 \left[e_2 - \sqrt{2\pi} \frac{W_0 \sigma_z}{K_z} e_3 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{W_0}{\sqrt{2K_z}} + \frac{z+H}{\sqrt{2\sigma_z}}\right) \right] \cdot K_{RH}, & \text{в случае осадков,} \end{cases} \quad (3.2)$$

где: $C(x, y, z)$ – концентрация загрязнителя в точке (x, y, z) , кг/м^3 ; x, y, z – пространственные координаты, м; H – высота источника выброса, м; Q – скорость выброса загрязнителя, кг/с ; u – скорость ветра, м/с ; σ_y, σ_z – параметры гауссовского распределения по направлениям y и z , м; $K_z = \sigma_z^2 u / 2x$ – коэффициент турбулентной диффузии; $W_{\text{set}} = \rho g d^2 / 18\mu$ – скорость осаждения сферических частиц по закону Стокса, где ρ – плотность частицы загрязнителя, d – диаметр частицы, g – ускорение свободного падения, μ – вязкость воздуха; $W_0 = W_{\text{dep}} - \frac{1}{2} W_{\text{set}}$, где $W_{\text{dep}} > 0$ – скорость сухого осаждения; ρ – плотность частиц, кг/м^3 ; d – диаметр частицы, м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; W_{set} – скорость оседания частиц, м/с ; W_{dep} – скорость сухого осаждения (экспериментальная), м/с ; W_0 – составной параметр, учитывающий осаждение м/с ; $e_1 = \exp\left(-\frac{W_{\text{set}}(z-H)}{2K_z} - \frac{W_{\text{set}}^2 \sigma_z^2}{8K_z^2}\right)$; $e_2 = \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$; $e_3 = \exp\left(\frac{W_0(z+H)}{K_z} + \frac{W_0^2 \sigma_z^2}{2K_z^2}\right)$; erfc – дополнительная функция коррекции ошибок [11].

4. Алгоритм решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения

Алгоритм решения задачи включает в себя предварительную обработку мониторинговых данных, прямое моделирование с использованием разработанной продукционной модели и решение обратной задачи расчета распространения загрязнителя с помощью метода роя частиц (МРЧ).

Алгоритм состоит из следующих последовательных этапов:

- анализ и очистка данных измерений и метеорологических наблюдений;
- прямое моделирование вкладов известных (задекларированных) источников на выбранных временных интервалах;

- вычисление поля отклонений наблюдений от вкладов известных источников и формирование задачи поиска неизвестных источников;
- решение полученной задачи оптимизации параметров источника(ов) (координаты, интенсивность, длительность) посредством МРЧ;
- интерпретация и визуализация результатов.

Предполагается, что источник выброса находится в точке максимальной концентрации загрязнителя. Задачу локализации источников атмосферного загрязнения сведем к поиску параметров θ (координат и характеристик источника, либо набора таких источников), при минимизирующих следующую целевую функцию:

$$J(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [C_{\text{прог}, \theta}(x_i, y_i, z_i) - C_{\text{набл}}(x_i, y_i, z_i)]^2}, \quad (4.3)$$

где $C_{\text{набл}}$ – наблюдаемая на датчике концентрация, $C_{\text{прог}, \theta}$ – прогнозируемая моделью концентрация.

Функция $J(\theta)$ минимизируется с помощью МРЧ, каждой частице роя соответствуют точки пространства (x_s, y_s, z_s) и параметры выброса Q и τ . $Q \in [0, Q_{\text{max}}]$, $\tau \in [\tau_{\text{min}}, \tau_{\text{max}}]$.

5. Численное решение задачи локализации

Для автоматизированного поиска возможных решений задачи локализации источников атмосферного выброса на основе метода роя частиц и разработанной математической 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. Программный комплекс обеспечивает интеграцию с БД экомониторинга MS SQL Server.

Реализуются два основных режима работы:

1. Моделирование распространения загрязнителей от известных источников с учётом метеопараметров и характеристик выброса.
2. Решение задачи локализации неизвестных источников атмосферного загрязнения на основе данных системы датчиков и API сервиса метеонаблюдений, разработанной производственной модели шлейфа и МРЧ.

Для проверки точности разработанной модели и подхода рассмотрим модельный пример. Исследуется область промышленной территории размером 5×5 квадратных километров с преимущественно гладким рельефом. На участке расположены стационарные пункты экомониторинга $R_1, \dots, R_5$, осуществляющие сбор концентраций загрязнителей и метеоданных. Также на участке расположены инвентаризированные источники выбросов – промышленные предприятия с задекларированными характеристиками: местоположение, высота над уровнем суши, количество часов работы и интенсивность выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. В качестве исходных данных используются измерения из базы экомониторинга: концентрации сероводорода в сети сенсоров,

данные о скорости, направлении ветра, интенсивности осадков. На 24-х часовом периоде были проведены 72 итерации для 20-минутных интервалов времени. Среднее время моделирования периода составило 20 секунд. Вычислительные эксперименты проводились на персональном компьютере со следующими характеристиками: процессор AMD Ryzen 7 5700X (8 ядер, 16 потоков, базовая тактовая частота 3.4 ГГц), 32 ГБ оперативной памяти DDR4, операционная система Windows 10 64-bit. Вычислено среднее значение концентрации загрязнителя за день, построены карты распределения загрязнения и тепловые карты концентраций. На рис. 5.1 представлены результаты моделирования распространения сероводорода, слева – с использованием модели без учета влияния осадков, справа – с использованием разработанной производственной модели. Согласно метеорологическим наблюдениям, в течение дня наблюдались осадки в виде дождя, состояние атмосферы характеризовалось преимущественно высокой неустойчивостью (классы А–В).

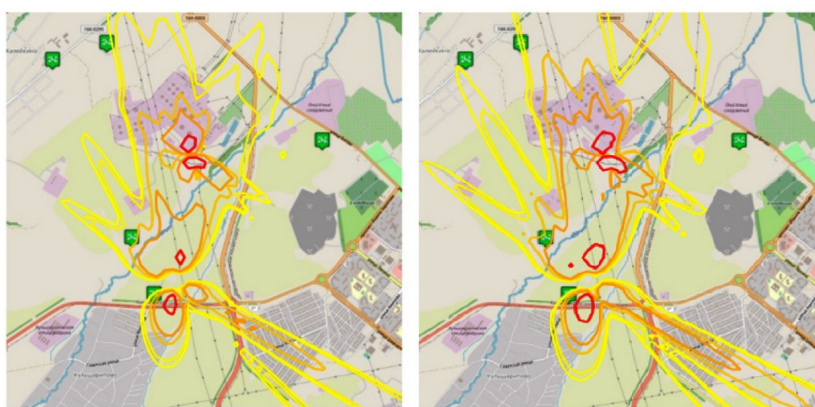


Рис. 5.1. Моделирование распространения сероводорода на исследуемом участке, слева – без учёта влияния осадков, справа – с учётом влияния осадков на шлейф загрязнителя

Fig. 5.1. Modeling the spread of hydrogen sulfide in the study area: left – without the influence of precipitation; right – with the influence of precipitation on the pollutant plume

Учёт вымывания загрязнителя позволяет уменьшить завышенные значения концентраций в областях, удалённых от источника. Как видно на рис. 5.1, вблизи источника наблюдается большее количество зон с повышенными концентрациями загрязнителя, что подтверждается данными экологического мониторинга исследуемой территории.

Значения ошибок прогнозирования составили $MAE = 0.000086$ и $MAPE = 41.04\%$, в то время как при реализации модели Д. Эрмака $MAE = 0.000135$ и $MAPE = 48.51\%$.

Для оценки точности решения задачи локализации рассмотрен второй модельный пример на участке промышленной территории 5×5 квадратных км с единственным источником выбросов сероводорода – предприятием по переработке природного газа и одним датчиком системы экомониторинга. Для выбора параметров МРЧ, обеспечивающих лучшую точность при меньшем времени выполнения проведена серия экспериментов на фиксированном временном интервале. Получены значения: $w = 0.45$, $c_1 = 1.8$, $c_2 = 1.6$.

Для проведения эксперимента по поиску источника сероводорода использовались данные наблюдений со станции экомониторинга с использованием полученных параметров. Результаты представлены на рис. 5.2. Сплошной линией показаны границы предприятия-источника, квадратами – участки, предположительно содержащие источник, полукругом – местоположение сенсора.

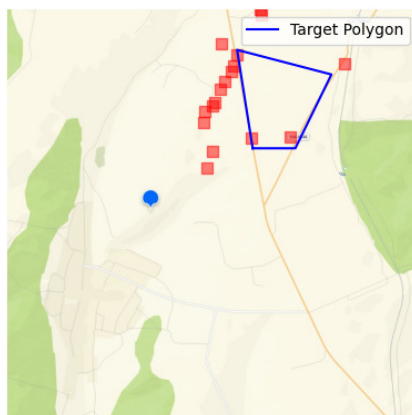


Рис. 5.2. Картограмма результатов поиска источника загрязнений на участке № 2

Fig. 5.2. Map of the results of the search for the source of pollution at plot № 2

Средняя абсолютная ошибка программного комплекса составила $MAE = 137.78$ м при использовании одного сенсора. Для сравнения, в работе [12] при применении гибридного метода роя частиц (ГМРЧ) и модели Гауссова шлейфа средняя ошибка определения координат источников при использовании двух сенсоров достигала более 1 км, снижаясь лишь при существенном увеличении числа сенсоров и итераций алгоритма. Полученное значение ошибки программного комплекса при одном сенсоре находится в диапазоне ошибок, характерных для современных инверсных моделей, и демонстрирует достаточно высокую точность предлагаемого метода при минимальном объёме исходных данных.

На первом участке 5×5 квадратных км с несколькими предприятиями также был проведён полный эксперимент по локализации источников на временном интервале с зафиксированным превышением ПДК и успешно локализованным нелегальным источником загрязнения. Результаты моделирования представлены на рис. 5.3. Сплошными линиями обозначены уровни концентрации предполагаемого распространения искомого источника, пунктиром – линии нулевой концентрации, звездочкой – местоположение этого источника.

Сопоставление результатов с данными экомониторинга показало достаточно близкое расположение источника, рассчитанное с помощью программного комплекса, с локацией обнаруженного незарегистрированного источника зафиксированных ранее незарегистрированных выбросов сероводорода в виде разгерметизации газопровода, что подтверждает практическую значимость предложенного подхода.

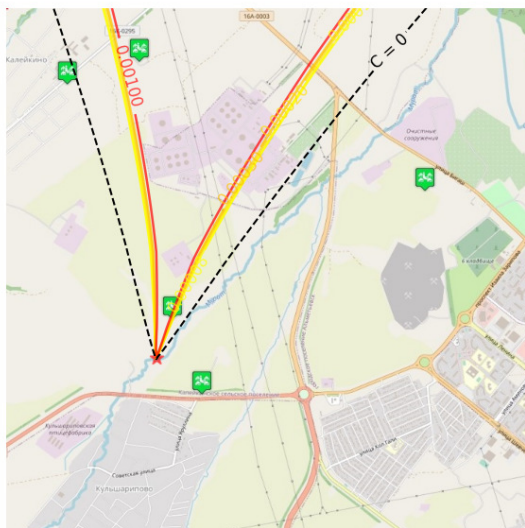


Рис. 5.3. Результаты моделирования поиска источника атмосферных выбросов и предполагаемого распространения сероводорода на картосхеме участка № 1
Fig. 5.3. The results of modeling the search for the source of atmospheric emissions and the supposed spread of hydrogen sulfide on the map of site № 1.

6. Заключение

Статья посвящена решению актуальной научно-практической задачи локализации источников атмосферного загрязнения и расчёта распространения примесей с использованием методов численного моделирования и глобальной оптимизации. На основе анализа современных подходов к моделированию переноса поллютантов и идентификации источников сформулирована корректная постановка задачи.

Разработан метод численного решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения, основанный на сведении задачи к некорректной обратной задаче и применении метода роя частиц, а также реализован программный комплекс для моделирования и определения параметров источника.

В результате вычислительных экспериментов определены рациональные значения параметров численного метода, обеспечивающие повышение точности расчётов при сокращении времени вычислений, что подтверждает эффективность предложенного подхода и его практическую значимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Короткова Н. В., Семенова Н. В. Влияние метеорологических условий на загрязнение атмосферного воздуха в Саратове // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле*. 2019. Т. 19, вып. 3. С. 168–173.

2. Puig Duran M., Darbra R. M. Innovations and insights in environmental monitoring and assessment in port areas. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2024. Vol. 70. 101472.
3. Минприроды России. Приказ от 6 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе». М., 2017.
4. Семакина А. В. Основные математические подходы для оценки процессов рассеивания примеси в атмосферном воздухе // *Антропогенная трансформация природной среды*. 2024. Т. 10, № 2. С. 42–64.
5. Рязанов В. И. Моделирование распространения примесей в атмосфере на основе трехмерной модели с использованием данных ДМРЛ. *Идеи К. Э. Циолковского в инновациях науки и техники: материалы 51-х Научных чтений памяти К. Э. Циолковского*. Калуга: Эйдос, 2016. С. 292–294.
6. Панасенко Е. А. Численное решение некоторых обратных задач с различными типами источников атмосферного загрязнения // *Вестн. Томск. гос. ун-та. Мат. и мех.* 2008. № 2(3). С. 47–55.
7. Чубатов А. А., Кармазин В. Н. Устойчивая оценка интенсивности источника загрязнения атмосферы на основе метода последовательной функциональной аппроксимации // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2009. Т. 1, № 4. С. 391–403.
8. Clifton O. E., Schwede D., Hogrefe C., Bash J. A single-point modeling approach for the intercomparison and evaluation of ozone dry deposition across chemical transport models (Activity 2 of AQMEII4). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 23. P. 9911–9961. DOI:10.5194/acp-23-9911-2023
9. Van Leuven S., De Meutter P., Camps J., Termonia P., Delcloo A. An optimisation method to improve modelling of wet deposition in atmospheric transport models: applied to FLEXPART v10.4. *Geoscientific Model Development*. 2023. Vol. 16. P. 5323–5338.
10. Резчиков А. Ф., Богомолов А. С., Лапковский Р. Ю., Кушников В. А., Шнайдер И. А. Задача локализации источников повышенного атмосферного выброса. *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): Труды Шестнадцатой международной конференции*. Москва: ИПУ РАН, 2023. С. 507–511.
11. Резчиков А. Ф., Богомолов А. С., Лапковский Р. Ю., Кушников В. А., Шнайдер И. А. Продукционная модель расчета распространения атмосферного загрязнителя с учетом влияния атмосферных осадков. *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2024): Труды Семнадцатой международной конференции*. Москва: ИПУ РАН, 2024. С. 413–419.
12. Chaiwino W., Manorot P., Pochinapan K., Mouktonglang T. Identifying the Locations of Atmospheric Pollution Point Source by Using a Hybrid Particle Swarm Optimization. *Symmetry*. 2021. Vol. 13. 985. DOI:10.3390/sym13060985

Поступила 27.04.2026; доработана после рецензирования 10.08.2026;
принята к публикации 25.08.2026

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. N. V. Korotkova, N. V. Semenova, "Influence of meteorological conditions on atmospheric air pollution in Saratov", *Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Nauki o Zemle*, **19:3** (2019), 168–173 (In Russ.).
2. M. Puig Duran, R. M. Darbra, "Innovations and insights in environmental monitoring and assessment in port areas", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **70** (2024), 101472.
3. Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation, *Order of June 6, 2017 No. 273 "On approval of methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air"*, Moscow, 2017 (In Russ.).
4. A. V. Semakina, "Basic mathematical approaches for assessing the processes of impurity dispersion in the atmospheric air", *Antropogennaya transformatsiya prirodnoy sredy*, **10:2** (2024), 42–64 (In Russ.).
5. V. I. Ryazanov, "Simulation of the spread of impurities in the atmosphere based on a three-dimensional model using DMRL data", *Idey K. E. Tsiolkovskogo v innovatsiyakh nauki i tekhniki: materialy 51-kh Nauchnykh chteniy pamyati K. E. Tsiolkovskogo*, 2016, 292–294 (In Russ.).
6. E. A. Panasenکو, "Numerical solution of some inverse problems with different types of atmospheric pollution sources", *Vestn. Tomsk. gos. un-ta. Mat. i mekh.*, 2008, no. 2(3), 47–55 (In Russ.).
7. A. A. Chubátov, V. N. Karmazin, "Stable estimation of the intensity of an atmospheric pollution source based on the method of sequential functional approximation", *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye*, **1:4** (2009), 391–403 (In Russ.).
8. O. E. Clifton, D. Schwede, C. Hogrefe, J. Bash, "A single-point modeling approach for the intercomparison and evaluation of ozone dry deposition across chemical transport models (Activity 2 of AQMEII4)", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **23** (2023), 9911–9961. DOI: 10.5194/acp-23-9911-2023
9. S. Van Leuven, P. De Meutter, J. Camps, P. Termonia, A. Delcloo, "An optimisation method to improve modelling of wet deposition in atmospheric transport models: applied to FLEXPART v10.4", *Geoscientific Model Development*, **16** (2023), 5323–5338.
10. A. F. Rezhnikov, A. S. Bogomolov, R. Yu. Lapkovsky, V. A. Kushnikov, I. A. Shnayder, "The problem of localization of sources of increased atmospheric emissions", *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2023): Trudy Shestnadsatoj mezhdunarodnoj konferentsii*, 2023, 507–511 (In Russ.).

11. A. F. Rezchikov, A. S. Bogomolov, R. Yu. Lapkovsky, V. A. Kushnikov, I. A. Shnayder, “Production model for calculating the spread of an atmospheric pollutant taking into account the influence of atmospheric precipitation”, *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2024): Trudy Semnadsatoj mezhdunarodnoj konferentsii*, 2024, 413–419 (In Russ.).
12. W. Chaiwino, P. Manorot, K. Pochinapan, T. Mouktonglang, “Identifying the Locations of Atmospheric Pollution Point Source by Using a Hybrid Particle Swarm Optimization”, *Symmetry*, **13** (2021), 985. DOI: 10.3390/sym13060985

Submitted 27.04.2026; Revised 10.08.2026; Accepted 25.08.2026

The authors have read and approved the final manuscript.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.