На правах рукописи



Шнайдер Илья Андреевич

Математическая модель и численный метод для решения задачи локализации источника атмосферного загрязнения

Специальность 1.2.2 –
«Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2026

Работа выполнена в Институте проблем точной механики и управления (ИПТМУ РАН) — обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук».

Научный руководитель: **Богомолов Алексей Сергеевич,** доктор технических наук, доцент, ИПТМУ РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории системного анализа и управления.

Официальные оппоненты: **Рапута Владимир Федотович,** доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования процессов в атмосфере и гидросфере.

Бочкарев Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».**

Защита состоится 20 января 2027 года в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.392.08 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке СГУ и на сайте СГУ https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-08.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83, учёному секретарю диссертационного совета 24.2.392.08.

Автореферат разослан «_____» _____2026 г.

Учёный секретарь диссертационного совета, доктор физико-математических наук, доцент **Рыхлов Виктор Сергеевич**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современных условиях распространения промышленных производств и изменения климата растет актуальность вопросов загрязнения атмосферы. Особую опасность представляют новые неучтённые или нелегальные источники выбросов, которые затрудняют соблюдение государственных нормативов по охране атмосферного воздуха и нарушают эффективность существующей системы экологического контроля. 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 вымыванию и осаждению поллютантов. Исследования показывают, что пренебрежение влиянием осадков может приводить к недооценке уровня загрязнения, особенно в районах с повышенной влажностью и частыми дождями. Это, в свою очередь, усложняет оценку реального состояния атмосферы[1,2]. 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 без учета изменения и влияния метеофакторов[3]. При этом влияние переменных метеорологических факторов, в том числе влажности и осадков, учитывается недостаточно. 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 загрязнителей, учитывающих влияние сухого осаждения и жидких осадков, и решение на их основе задач локализации новых источников загрязнения.

Уровень разработанности проблематики. В области моделирования процессов рассеивания поллютантов при различных метеорологических усло-

---

[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. Art. 101472.

[3] Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Приказ от 6 июня 2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе». М., 2017.

виях следует отметить труды А.В. Семакиной[4], в которых предложены математические подходы к описанию динамики загрязнителей воздуха. 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, вопросы учёта влияния сухого осаждения[8] 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 достаточно точного и оперативного определения параметров новых 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 влияния влажности на распространение загрязнителей при осадках.

Для достижения цели решаются следующие **задачи**.

1. Разработать математическую модель распространения загрязняющих ве-

[4]Семакина А.В. Основные математические подходы для оценки процессов рассеяния 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, 01 сентября 2016 года. – Калуга: Эйдос, 2016. – С. 292-294.

[6]Панасенко Е. А., Старченко А.В. Численное решение некоторых обратных задач с различными типами источников атмосферного загрязнения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 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., et al.: A single-point modeling approach for the intercomparison and evaluation of ozone dry deposition across chemical transport models (Activity 2 of AQMEII4), Atmos. Chem. Phys., 23, 9911–9961, 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.

ществ в атмосфере с учетом сухого осаждения и влияния жидких осадков.
2. Построить численный метод для решения задачи локализации источников загрязняющих веществ в атмосфере с учетом переменных метеоусловий, а также влияния сухого осаждения и жидких атмосферных осадков.
3. Разработать комплекс программ для автоматизированного решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения с учетом процессов сухого осаждения и влияния жидких осадков.
4. Проверить точность и подтвердить на практике преимущество полученных результатов с использованием данных экологического мониторинга.

Объектами исследования являются участки промышленной территории с источниками атмосферных выбросов.

Предмет исследования – математические модели и численные методы для решения задач локализации источников атмосферного загрязнения.

Научная новизна.

1. Предложена постановка задачи локализации источников атмосферного загрязнения как обратной задачи математического моделирования распространения шлейфа загрязнителя, отличающаяся совместным учётом вкладов известных (задекларированных) и неизвестных (неинвентаризованных) источников, а также разреженности и зашумлённости результатов наблюдений, позволяющая свести поиск координат и интенсивности новых источников к задаче глобальной оптимизации целевой функции рассогласования модельных и наблюдаемых концентраций.
2. Разработана продукционная математическая модель распространения атмосферных загрязнителей, отличающаяся возможностью учёта сухого осаждения и влияния влажности при жидких атмосферных осадках, и позволяющая повысить точность расчётов распространения загрязнителей при изменяющихся метеоусловиях.
3. Развит иерархический численный метод на основе метода роя частиц (МРЧ) для решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения, отличающийся пространственной декомпозицией области поиска, использованием локальных роёв для формирования информированной начальной популяции глобального роя и позволяющий сократить время решения задачи за счёт параллельного выполнения локальных этапов и использования информированной начальной популяции глобального роя.
4. Для рассматриваемой задачи доказана лемма о монотонном невозрастании целевой функции лучшего решения и теорема о сходимости метода к минимуму целевой функции на всей области поиска при условии сходимости стандартного метода роя частиц, что обеспечивает математическую обоснованность метода.

Теоретическая ценность работы состоит в развитии аппарата математического моделирования распространения атмосферных загрязнителей и решения обратных задач локализации их источников.

Практическая ценность работы состоит в возможности повышения эффективности государственного экологического контроля путем:

- выявления нелегальных и неучтённых источников выбросов;
- поддержки принятия решений по снижению техногенной нагрузки на окружающую среду;
- визуализации экологической обстановки на промышленных территориях в форме картосхем и тепловых карт.

Тема диссертации соответствует направлению из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»): Н8 объективная оценка выбросов и поглощения климатически активных веществ, снижение их негативного воздействия на окружающую среду и климат, повышение возможности качественной адаптации экосистем, населения и отраслей экономики к климатическим изменениям.

Тема диссертации и ее результаты непосредственно связаны с направлением «Адаптация к изменениям климата, сохранение и рациональное использование природных ресурсов» из Указа Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий».

Результаты диссертационной работы соответствуют темам научных исследований ИПТМУ ФИЦ СНЦ РАН и использованы в отчетах о научно-исследовательской работе по теме «Разработка интеллектуальных моделей и методов управления сложными человеко-машинными системами в условиях критических ситуаций» (FFNM-2022-0010).

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует п. 1, 2, 3, 8 паспорта научной специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физ.-мат. науки).

Реализация и внедрение результатов работы. Разработанные математические модели и алгоритмы признаны эффективными и внедрены в производственную и научную деятельность ОАО «Лига», ФГБОУ ВО СГУ им. Н.Г. Чернышевского, ФИЦ СНЦ РАН.

Положения и результаты, выносимые на защиту

1. Постановка задачи локализации источников атмосферного загрязнения как обратной задачи математического моделирования распространения шлейфа загрязнителя, в которой искомые параметры источника (координаты, высота, интенсивность и длительность выброса) восстанавливаются по наблюдениям концентраций на ограниченной совокупности датчиков, а вклады инвентаризованных источников предварительно вычитаются из данных мониторинга.
2. Продукционная математическая модель распространения атмосферных загрязнителей, учитывающая процессы сухого осаждения и выпадения жидких

атмосферных осадков, а также её математические свойства и границы применимости.

3. Развитый многоуровневый иерархический численный метод на основе метода роя частиц для решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения, отличающийся пространственной декомпозицией области поиска и формированием информированной начальной популяции глобального роя на основе локальных роёв.

4. Математическое обоснование разработанного метода: лемма о монотонном невозрастании целевой функции лучшего найденного решения и теорема о сходимости метода к минимуму целевой функции на всей области поиска при условии сходимости стандартного метода роя частиц.

5. Алгоритм и комплекс программ, реализующие разработанную модель и многоуровневый иерархический метод роя частиц и обеспечивающие автоматизированное решение задачи локализации источников атмосферного загрязнения с визуализацией результатов на картосхемах заданных территорий.

Апробация работы

Основные конференции и семинары:

1. XIV научно-практическая конференция «Presenting Academic Achievements to the World» (Саратов, 2023).
2. XVI – XVIII международные конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD) (Москва, ИПУ РАН, 2023, 2024, 2025).
3. XI всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-23 (Казань, 2023).
4. Всероссийская научно-практическая конференция «Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения» (Саратов, 2024).
5. Семинары лаборатории № 33 крупномасштабных систем ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН; семинар лабораторий системного анализа и управления и лаборатории комплексных научных исследований ИПТМУ ФИЦ СНЦ РАН.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 12 печатных изданиях, в том числе трех из перечня ВАК по данной специальности (I, II и III уровни), а также – 3 публикациях, индексированных в Scopus.

Личный вклад автора: соискатель самостоятельно

1. установил, что задача локализации новых источников атмосферного загрязнения может решаться как обратная задача математического моделирования распространения шлейфа загрязнителя с использованием оптимизации методом роя частиц (публикации № 3, 7, 9);
2. предположил и обосновал, что учет сухого осаждения и влияния влажности при жидких осадках позволяет существенно более точно моделировать распространение шлейфа загрязнителей атмосферы (публикации № 1, 8);

3. разработал математическую модель распространения загрязнителей в атмосфере с учётом сухого осаждения и влияния влажности при осадках (публикации № 1, 8);
4. построил алгоритм решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения, основанный на применении разработанной модели и многоуровневого иерархического метода роя частиц (публикации № 2, 14);
5. сформулировал и доказал лемму о монотонном невозрастании целевой функции лучшего решения и теорему о сходимости метода к минимуму целевой функции на всей области поиска при условии сходимости стандартного метода роя частиц (публикация № 14);
6. разработал проблемно-ориентированный комплекс программ, обеспечивающий автоматизацию поиска источников загрязнения и визуализацию результатов на картосхемах заданных территорий (публикации № 1, 2, 3, 7, 9, 14).

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечиваются корректным применением известных математических методов и алгоритмов.

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, 4 главы, заключение, список литературы из 124 наименований и приложения. Работа изложена на 136 страницах, содержит 23 рисунка, 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится краткий обзор современного состояния изучаемой проблемы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проведён обзор актуальных проблем и подходов в области моделирования распространения атмосферных загрязнителей и локализации источников выбросов. Рассмотрены классические и современные модели дисперсии, включая модель Гауссова шлейфа, модели Сеттона и Д.Л. Эрмака, подходы Лагранжа и Эйлера. Формально определена постановка задачи локализации источника атмосферного загрязнения.

Вторая глава посвящена разработке метода моделирования распространения атмосферных загрязнителей в атмосферном воздухе с учетом влияния сухого осаждения и влажности при жидких атмосферных осадках. В основу 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 влажности при осадках:

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

где RH – относительная влажность воздуха (в долях, при $RH = 1$ ограничивается сверху), 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.

Вид разработанной продукционной модели может быть представлен как:

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

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, ρ – плотность 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; $e_1 = \exp\left(-\frac{W_{\text{set}}(z-H)}{2K_z} - \frac{W_{\text{set}}^2\sigma_z^2}{8K_z^2}\right)$; $e_2 = \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)$; $e_3 = \exp\left(\frac{W_0(z+H)}{K_z} + \frac{W_0^2\sigma_z^2}{2K_z^2}\right)$; $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^\infty e^{-t^2}\,dt$.

В третьей главе предлагается алгоритм решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения, включающий предварительную обработку мониторинговых данных, прямое моделирование с использованием разработанной продукционной модели и решение обратной задачи расчета распространения загрязнителя.

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 (координаты, интенсивность) с использованием иерархического 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), минимизирующих следующую целевую функцию:

$$J(\theta) = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left[\, C_{\text{прог},\,\theta}(x_i, y_i, z_i) - C_{\text{набл}}(x_i, y_i, z_i)\,\right]^2}, \qquad (3)$$

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 интенсивность источника Q, $Q \in [0, Q_{\max}]$.

При большом размере области поиска стандартный МРЧ требует многократного исследования всей области допустимых значений параметров, что приводит к значительным вычислительным затратам.

Для повышения вычислительной эффективности разработан многоуровневый иерархический метод роя частиц, основанный на пространственной декомпозиции области поиска. Исходная область параметров источника загрязнения Ω разбивается на совокупность подучастков: $\Omega = \bigcup_{j=1}^{M} \Omega_j$.

На первом уровне в каждом подучастке независимо выполняется локальный поиск методом роя частиц. Цель локального этапа состоит в выявлении перспективных областей пространства поиска. По результатам локальной оптимизации отбираются частицы с наименьшими значениями целевой функции, которые объединяются в множество информированных решений и используются для формирования начальной популяции глобального роя.

На втором уровне выполняется глобальный поиск на всей области Ω с использованием полной совокупности данных экологического мониторинга. На этом этапе отсутствуют ограничения на перемещение частиц между подучастками, поэтому пространственная декомпозиция влияет только на способ формирования начального состояния роя и не ограничивает область последующего поиска.

Ключевым отличием предложенного метода от стандартного МРЧ является использование результатов локального поиска для инициализации глобального роя. Преимущества метода заключаются в сокращении числа вычислений за счёт предварительного исследования отдельных областей пространства поиска и концентрации вычислительных ресурсов в наиболее перспективных областях. Метод позволяет учитывать локальные метеорологические условия на этапе предварительного поиска, сохраняет глобальный характер оптими-

зации благодаря последующему поиску на всей области и обеспечивает возможность параллельного выполнения локальных роев. Это дает возможность использовать преимущества многопоточных процессоров и дополнительно уменьшает время вычислений. Доказаны следующие утверждения.

Лемма. В предлагаемом методе значение целевой функции лучшего найденного решения не возрастает с увеличением числа итераций глобального роя.

Теорема. Пусть область поиска Ω является ограниченной и замкнутой, а целевая функция $J(\theta)$ непрерывна и ограничена снизу. Пусть Ω разбита на подучастки, в каждом из которых выполняется локальный поиск, результаты которого ограничены соответствующими допустимыми подучастками и используются для формирования допустимого начального состояния глобального роя. Если МРЧ при выбранных параметрах и заданных ограничениях на положение и скорость частиц сходится к минимуму функции J на Ω при любом допустимом начальном состоянии роя, то предлагаемый метод также сходится к минимуму J на области Ω.

В четвертой главе описана программная реализация разработанной модели и подхода к решению задачи локализации в виде комплекса программ на Python 3.12. 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 продукционной модели шлейфа и МРЧ.

Комплекс программ обеспечивает интеграцию с БД экомониторинга MS SQL Server, схема работы представлена на рисунке 1.

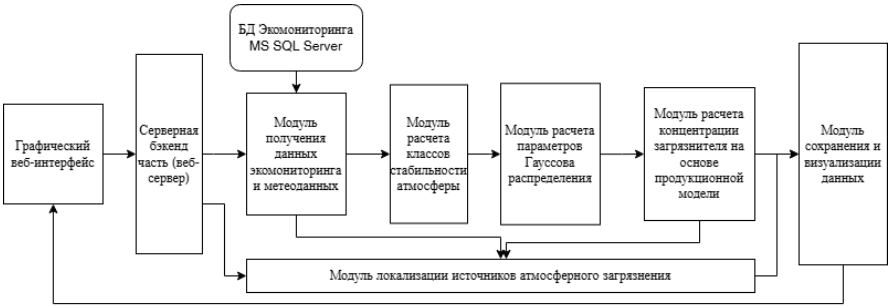


Рисунок 1 — Схема работы комплекса программ

Для проверки точности разработанной модели и подхода рассмотрен практический пример. Исследуется область промышленной территории размером 5x5 километров с преимущественно гладким рельефом. На участке расположены стационарные пункты экомониторинга

$R_1, \ldots, R_5$, осуществляющие сбор концентраций загрязнителей и метеоданных. Также на участке расположены инвентаризованные источники выбросов – промышленные предприятия с задекларированными характеристиками. В качестве входных данных используются измерения из базы экомониторинга: концентрации сероводорода, данные о скорости, направлении ветра, интенсивности осадков. На временном отрезке 24 часа проведены 72 итерации расчета распространения для 20-минутных интервалов времени. Среднее время моделирования периода составило 20 секунд. Вычислительные эксперименты проводились на настольном компьютере с характеристиками: ЦПУ AMD Ryzen 5700X (8 ядер, 16 потоков, тактовая частота 3,4 ГГц), 32 ГБ ОЗУ. Вычислено среднее значение концентрации загрязнителя за день, построены карты распределения загрязнения и тепловые карты концентраций.

На рисунке 2 представлены результаты моделирования без учёта влияния влажности при осадках. Согласно метеорологическим наблюдениям, в течение дня наблюдались осадки в виде дождя, состояние атмосферы характеризовалось высокой неустойчивостью.

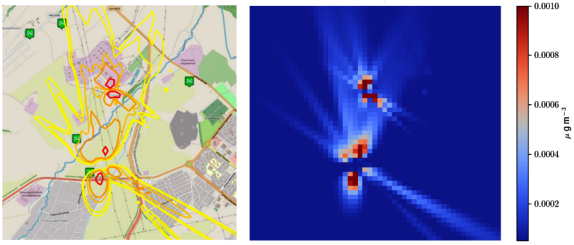


Рисунок 2 — Распространение сероводорода без учёта влияния влажности

На рисунке 3 представлены результаты моделирования распространения сероводорода с использованием разработанной продукционной модели, учитывающей сухое осаждение и влияние повышенной влажности воздуха при осадках, в тот же день. По сравнению с моделью Д.Л. Эрмака (рисунок 2) зоны повышенных концентраций вблизи источника расширяются, что согласуется с данными экологического мониторинга исследуемой территории.

Значения ошибок прогнозирования с учетом влияния влажности при осадках составили *MAE*=0,000086 мг/м^3 и *MAPE*=41,04%, без учета – *MAE*=0,000135 мг/м^3 и *MAPE*=48,51%.

В рассматриваемой задаче локализации источника по показаниям четырёх станций с разбиением области поиска на 4 участка и параллельным выполнением локального этапа иерархический МРЧ достигал заданной точности в 90% запусков против 30–60% у обычного МРЧ (20–60 частиц). Число вызовов целевой функции на один успешный запуск сократилось примерно в 4 раза.

Для оценки точности решения задачи локализации рассмотрен второй

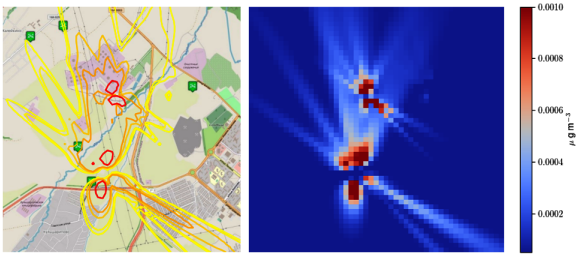


Рисунок 3 — Распространение сероводорода с учётом влияния влажности

практический пример на участке промышленной территории 5x5 км (рисунок 4) с единственным источником выбросов сероводорода – предприятием по переработке природного газа (обозначено линиями) и одним датчиком системы экомониторинга (обозначен полукруглой меткой). Для выбора параметров МРЧ, обеспечивающих лучшую точность при меньшем времени выполнения, проведена серия экспериментов на фиксированном временном интервале. Получены значения: $w = 0{,}45$, $c_1 = 1{,}8$, $c_2 = 1{,}6$.

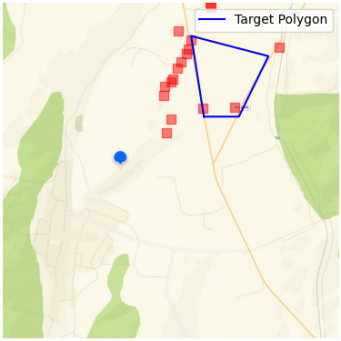


Рисунок 4 — Картосхема результатов поиска источника загрязнений

Для проведения эксперимента по поиску источника сероводорода использовались данные наблюдений со станции экомониторинга с полученными параметрами. Результаты представлены на рисунке 4, квадраты – прогнозируемые локации источника.

Абсолютная ошибка локализации определялась как среднее евклидово расстояние в горизонтальной плоскости координатной сетки между истинным положением источника и положением, определённым комплексом программ, и составила *MAE* = 137,78 м для одного сенсора. Для сравнения, в работе W. Chaiwino и соавт. [10] при применении гибридного метода роя частиц и модели Гауссова шлейфа средняя ошибка достигала 1 км при использовании двух сенсоров, снижаясь при существенном увеличении числа сенсоров и итераций алгоритма. Полученное значение ошибки комплекса программ при одном сенсоре находится в диапазоне, характерном для современных инверсных моделей, и демонстрирует достаточно высокую точность предлагаемого метода при небольшом объёме исходных данных.

В заключении приведены основные результаты работы

[10] Chaiwino, W.; Manorot, P.; Poochinapan, K.; Mouktonglang, T. Identifying the Locations of Atmospheric Pollution Point Source by Using a Hybrid Particle Swarm Optimization. Symmetry 2021, 13, 985.

1. Проведён аналитический обзор современных подходов к моделированию распространения атмосферных поллютантов и методов локализации источников выбросов. Сформулирована постановка задачи локализации источников атмосферного загрязнения.
2. Построена продукционная математическая модель распространения загрязнителей атмосферы с учётом процесса сухого осаждения и влияния влажности при выпадении жидких осадков. Определены условия применения модели и даны рекомендации по выбору параметров для различных метеоусловий.
3. Построен метод численного решения задачи локализации источников атмосферного загрязнения на основе разработанной продукционной модели и метода роя чатсиц, предусматривающий иерархическую процедуру поиска с использованием результатов локальной оптимизации для формирования начального состояния глобального роя.
4. Сформулированы и доказаны свойства монотонного невозрастания целевой функции лучшего решения и теорема о сходимости метода к минимуму целевой функции на всей области поиска.
5. Разработан комплекс программ для локализации источника атмосферного загрязнения и моделирования распространения атмосферных загрязнителей.
6. Проведена серия экспериментов по моделированию распространения атмосферных загрязнителей и локализации источников. Экспериментально определены входные параметры численного метода, обеспечивающие достаточно высокую точность при меньшем времени выполнения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Издания, рекомендованные ВАК Минобрнауки России

1. Shnaider I. A., Bogomolov A. S., Kushnikov V. A. Simulation modeling of atmospheric pollutant dispersion considering dry deposition and the influence of liquid atmospheric precipitation // Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics. — 2025. — Vol. 25, iss. 4. — P. 589–599. DOI: 10.18500/1816-9791-2025-25-4-589-599 (К1, физ.-мат. науки; I уровень Белого списка). *Вклад Шнайдера И. А.: математическая модель и комплекс программ для компьютерного моделирования рассеивания поллютантов в атмосфере.*

2. Шнайдер И. А., Богомолов А. С., Кушников В. А. Решение задачи локализации несанкционированных источников загрязнения атмосферы средствами математического моделирования // Журнал Средневолжского математического общества. — 2026. — Т. 28, № 3. С. 294–306. DOI: 10.15507/2079-6900.28.202603.294-306 (К2, физ.-мат. науки; III уровень Белого списка). *Вклад Шнайдера И. А.: постановка, математическая модель и метод решения задачи, комплекс программ и математическое моделирование.*

3. Шнайдер И. А., Богомолов А. С. Метод локализации источника атмосферного загрязнения // Современная наука: актуальные проблемы теории

и практики. Серия «Естественные и технические науки». — 2025. — № 9. С. 55-59. DOI: 10.37882/2223-2966.2025.09.04 (К3). *Вклад Шнайдера И. А.: метод решения задачи локализации.*

Зарегистрированные программы для ЭВМ

4. Программный комплекс локализации источников атмосферного загрязнения // Шнайдер И. А., Богомолов А. С., Кушников В. А.; Шнайдер И. А., Богомолов А. С., Кушников В. А. — № 2025694290; заявл. 04.12.2025; опубл. 04.12.2025, 2025693719 (Россия).

5. Комплекс программ для решения задачи локализации источников атмосферного выброса на многопоточных процессорах // Шнайдер И. А., Кушинков В. А., Богомолов А. С.; ФГБУН ФИЦ «Саратовский научный центр РАН». — № 2026691747; заявл. 14.10.2026; опубл. 14.10.2026, 2026692024 (Россия).

Монография

6. Резчиков А. Ф., Кушников В. А., Богомолов А. С., Хамутова М. В., Шнайдер И. А. Задачи, модели и методы анализа выполнимости мероприятий по управлению сложными организационно-техническими системами в условиях развития критических комбинаций событий : монография. — Саратов : Саратовский университет, 2024. — 92 с. — DOI: 10.18500/978-5-292-04872-5.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus

7. Shnaider I. A., Bogomolov A. S., Lapkovsky R. Y., Kushnikova E. V. An Approach to Locating Unknown Sources of Increased Air Emissions // 2023 16th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD). — Moscow, Russian Federation, 2023. — Pp. 1–5. — DOI: 10.1109/MLSD58227.2023.10303966. *Вклад Шнайдера И. А.: подход к задаче локализации новых источников атмосферного выброса.*

8. Shnaider I. A., Lapkovsky R. Y., Urumbaeva R. N., Zhabinskaya V. A Production Model for Calculating Pollutant Concentration Considering the Influence of Precipitation Washout and Dry Deposition // 2024 17th Inter-national Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD). — Moscow, Russian Federation, 2024. — Pp. 1–4. — DOI: 10.1109/MLSD61779.2024.10739434. *Вклад Шнайдера И. А.: продукционная математическая модель для расчета концентрации поллютантов под влиянием атмосферных осадков.*

9. Shnaider I. A., Lapkovsky R. Y., Kushnikova E. V., Urumbaeva R. N., Stepanovskaya I. A. An approach to detect new sources of air pollution using the particle swarm optimization // 2025 18th International Conference on Management of Large-Scale System Development (MLSD). — Moscow, Russian Federation, 2025. — Pp. 1–4. — DOI: 10.1109/MLSD65526.2025.11220689. *Вклад Шнайдера И. А.: подход к решению задачи локализации новых источников атмосферного выброса с использованием метода роя частиц.*

Публикации в других изданиях и на конференциях

10. Шнайдер И. А. Имитационное моделирование в задаче локализации источников повышенного атмосферного выброса // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023) : Сборник трудов одиннадцатой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности, Казань, 18–20 октября 2023 года. — Казань : Издательство АН РТ, 2023. — С. 780–786.

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: Труды XVII международной конференции, Москва, 24–26 сентября 2024 года. — Москва : ИПУ РАН, 2024. — С. 413–419.

12. Богомолов А. С., Шнайдер И. А. Математическая модель для разработки цифрового двойника процесса распространения атмосферного загрязнителя с учетом сухого осаждения и влияния атмосферных осадков // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения : Сборник научных трудов VI Всероссийской научно-практической конференции "Экологический форсайт". — Саратов : СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2024. — С. 103–109.

13. Шнайдер И. А., Лапковский Р. Ю., Кушникова Е. В., Урумбаева Р. Н., Степановская И. А. Локализация источника атмосферного выброса на основе метода роя частиц // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2025) : Труды восемнадцатой международной конференции, Москва, 24–26 сентября 2025 года. — Москва : ИПУ РАН, 2025. — С. 1165–1170.

14. Резчиков А. Ф., Богомолов А. С., Лапковский Р. Ю., Кушников В. А., Шнайдер И. А. Подход к расчету концентрации поллютантов с учетом жидких осадков и алгоритм решения задачи поиска новых источников загрязнения // Управление развитием крупномасштабных систем: Труды XIX международной конференции, Москва, 22–24 сентября 2026 года. — Москва : ИПУ РАН, 2026.