

Динамическая визуализация в решении задач инжиниринга ГИС-данных экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленных предприятий

А. В. Белова, И. А. Черницин, А. В. Кычкин

Центр инжиниринга данных и искусственного интеллекта Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Пермь, Россия

Аннотация. В рамках задачи по контролю распространения загрязняющих веществ в атмосфере в целях нормирования выбросов промышленных предприятий рассмотрены аспекты инжиниринга ГИС-данных, включая моделирование концентраций на основе аппарата Гаусса и Лагранжа, их анализа, хранения и визуализации. На базе библиотеки GRAL, реализующей расчет рассеивания Лагранжа в динамике, то есть с учетом переходных процессов, разработано приложение, позволяющее учитывать метеорологические параметры и рельеф местности, строить краткосрочный прогноз распространения облака веществ на примере диоксида серы SO_4 в виде контуров концентраций, а также строить динамические карты рассеиваний. Созданы вспомогательные программные модули, отвечающие за подготовку данных рельефа для использования моделью, модули трансформации форматов данных и преобразования координат ГИС в метрическую систему, а также модули динамической визуализации результирующего состояния концентраций вредных веществ в атмосфере. Формируемые графические образы динамических концентраций рассеиваний обладают высокой степенью интерпретируемости и сопоставимы по достоверности с методиками ГОСТ, работающими в статике. Полученные графические результаты могут быть использованы операторами промышленных установок, экологами-специалистами и сотрудниками контрольно-надзорных органов для оперативного восприятия информации и оценки состояния атмосферы и рисков аварийных уровней загрязнений.

Ключевые слова: прогнозирование рассеивания, загрязняющее вещество, цифровая модель, атмосферный воздух, визуализация данных.

Dynamic visualization within GIS data engineering for environmental monitoring of industrial enterprise atmospheric air

A. V. Belova, I. A. Chernitsin, A. V. Kychkin

Centre of Data and Artificial Intelligence Engineering National Research University
Higher School of Economics Perm, Russia

Abstract. As part of the controlling the spread of pollutants in the atmosphere to regulate emissions from industrial enterprises, GIS data engineering tasks were considered, including modelling concentrations based on the Gaussian and Lagrange techniques, their analysis, storage and visualization. Based on the GRAL library, which implements the calculation of Lagrange dispersion in dynamics, i.e., considering transient processes, an application has been developed that allows meteorological parameters and terrain relief to be considered and a short-term forecast of the spread of a cloud of substances to be made using the example of SO_4 in the form of concentration contours. Auxiliary software modules have been created that are responsible for preparing terrain data for use by the model, modules for transforming data formats and converting GIS coordinates to the metric system, as well as modules for visualizing the resulting state of harmful substance concentrations in the atmosphere. The graphic images of dynamic dispersion concentrations are highly interpretable and comparable in reliability to GOST methods operating in static conditions. The graphical results obtained can be used by industrial plant operators, environmental specialists and employees of control and supervisory authorities for the rapid perception of information and assessment of the state of the atmosphere and the risks of emergency pollution levels.

Keywords: dispersion prediction, pollutant, digital model, atmospheric air, data visualization.

Введение

Стремительное повышение уровня загрязнения атмосферного воздуха оказывает сильное влияние на состояние окружающей среды и здоровье населения, что приводит к необходимости ужесточения правил промышленной безопасности и усиления средств контроля [1, 2]. Несмотря на прогресс в методах математического моделирования атмосферных процессов и технологиях контроля качества воздуха, многие промышленные объекты продолжают использовать устаревшие инструменты, не обеспечивающие оперативного прогнозирования и визуализации пространственно-временной динамики рассеивания выбросов [3, 4]. Особую актуальность приобретает задача динамической визуализации рассеивания загрязняющих веществ для интерактивного отображения пространственно-

временного распределения выбросов с учетом изменяющихся метеорологических параметров, характеристик источника и топографии местности.

Известные и устанавливаемые сегодня комплексы накапливают данные по качеству атмосферного воздуха, которые содержат состав токсичных компонентов атмосферы, и факт нарушения/соблюдения границ предельно допустимых концентраций в заданный момент времени. Определение источников выбросов и оценка динамики распространения загрязнений на практике реализуется уже после фиксации факта инцидента вручную специалистами надзорных органов или экспертами общественных организаций по защите окружающей среды с использованием простейших графических моделей в виде карт местности и контуров концентраций в статике. Подразумевается, что в статике процессы переноса загрязнений в атмосфере не связаны между собой по времени, то есть расчет делается на заданный фиксированный момент времени по средним значениям концентраций по году наблюдений для указанного направления и скорости ветра. Также не всегда учитывается рельеф местности.

В регионах расположения особо крупных промышленных предприятий и условий возрастающих требований к снижению их влияния на природу становится актуальным повышение качества анализа сложной по структуре информации об изменениях в окружающей среде и оценке воздействия на нее различных факторов. Сложившиеся противоречия между требованиями к современным системам экологического мониторинга и уровнем развития современных информационных технологий могут быть преодолены за счет развития практики инжиниринга ГИС-данных [5, 6]. Далее под инжинирингом данных будем подразумевать совокупность процессов создания, управления, анализа и визуализации пространственных данных экомониторинга с использованием специализированного программного обеспечения с целью более достоверного восприятия экологической обстановки и выявления взаимосвязей между данными.

Основные аспекты инжиниринга ГИС-данных экологического мониторинга атмосферного воздуха промышленных предприятий включают в себя:

- интеграцию данных из разных источников и систем (спутниковые снимки, съемка с дронов, измерения сети сенсоров интернета вещей, системы автоматического контроля – САК, устанавливаемые на дымовых трубах [7]) и их предварительную обработку для использования в ГИС;
- создание структуры данных, определение типов данных, их связей и организации слоев для эффективного хранения и управления ГИС-данными;
- создание и настройку программного обеспечения для вспомогательных задач;
- проведение пространственного анализа, геообработки и моделирования для выявления закономерностей;
- визуализацию данных, включая отрисовку контуров рассеиваний на карте в удобной для эколога форме.

Решение задач визуализации в рамках инжиниринга ГИС-данных экологического мониторинга позволит операторам технологических установок выполнять наблюдения за выбросами вредных веществ в динамике и своевременно корректировать их в случаях риска превышений допустимых норм.

Постановка задачи

Целью данной работы является преодоление противоречий между требованиями к современным системам экологического мониторинга и уровнем развития современных информационных технологий за счет развития практики инжиниринга ГИС-данных, включая динамическую визуализацию результатов наблюдений. Параметры окружающей среды, такие как рельеф местности, а также изменяющиеся погодные условия (скорость и направление ветра, уровень влажности, наличие и характер осадков и др.), могут оказывать сильное влияние на траекторию и скорость распространения загрязнений, в связи с этим генерируемые графические изображения прогнозов изменений концентраций загрязнений должны их учитывать.

Теория

Базой для построения графических карт загрязнений и динамики их распространения являются модели рассеивания. В рамках данной работы были рассмотрены две модели – модель Гаусса и модель на основе переменных Лагранжа и Эйлера.

1. Модель рассеивания Гаусса

Модель Гаусса является одной из самых изученных и наиболее часто используемых в мире моделей рассеивания. Она является достаточно простой и может быть использована при исследовании рассеивания на расстоянии 10 км по направлению ветра и высоте источника не выше 100 м. В основе этой модели лежит уравнение дисперсии для шлейфа от точечного источника. Гауссовы модели могут быть стационарными и нестационарными. Особенностью модели Гаусса является тот факт, что в расчетах используется так называемая «эффективная высота», поскольку при выбросе облако (шлейф) сначала приподнимается над трубой.

Модель основывается на достаточно большом количестве допущений, которые в реальности неверны (например, земля является идеальным отражателем). Однако из-за своей простоты и высокой скорости вычисления является достаточно популярной и основой для многих моделей, применяемых за рубежом [8].

Стационарная модель описывается следующим образом:

$$X = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \left[\exp \left\{ -0.5 \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right\} \right] \left[\exp \left\{ -0.5 \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right],$$

где X – концентрация на расстоянии x в направлении ветра в определенный час, мкг/м³;

u_s – средняя скорость ветра на высоте выброса загрязняющих веществ, м/с;

Q – скорость выброса загрязняющих веществ, мкг/с;

σ_y – стандартное отклонение поперечного распределения концентрации;

σ_z – стандартное отклонение вертикального распределения концентрации;

H – высота выброса загрязняющего вещества, м;

Y – расстояние от источника до измерителя при боковом ветре, м.

Модель Гаусса основывается на следующих предположениях и допущениях:

- постоянство метеорологических условий на территории рассеивания, постоянство облачности, ветра и осадков;
- выбрасываемое загрязняющее вещество постоянно, то есть его характеристики, в том числе концентрация, не изменяются с течением выброса;
- загрязняющее вещество не поглощается землей и окружающими предметами;
- концентрация загрязняющего вещества распределяется в горизонтальном и вертикальном направлениях по закону Гаусса, а коэффициенты диффузии не зависят от координат [9].

К преимуществам гауссовой модели можно отнести довольно легкую формулу расчета, быструю скорость вычислений. Модель пригодна как для краткосрочных, так и долгосрочных прогнозов. Однако у данной модели достаточно много недостатков: она не учитывает изменение метеорологических условий, рельеф и не применима для описания вертикального распределения загрязняющего вещества. В основном модель Гаусса используется в статических расчетах по методикам, которые принято относить к ГОСТ. В этом случае карта выбросов считается для стационарных условий, когда направление и скорость ветра не меняются длительное время, при этом рассматривается плоская местность, здания и другие строительные объекты не учитываются. Специалисты промышленных предприятий широко используют такую модель для подготовки отчетов, а также планирования работы установок, поскольку ее результаты легко воспроизвести со стороны контрольно-надзорных органов в случае расследований аварий.

2. Модель рассеивания Лагранжа

С учетом выявленных недостатков модели Гаусса был рассмотрен способ описания движения жидкостей или воздушных масс в переменных Эйлера и Лагранжа. В математическом представлении в переменных Лагранжа скорости частиц представляют собой производные координат от времени, а в случае использования переменных Эйлера компоненты вектора скорости частиц в точке пространства являются функциями координат, которые в совокупности являются аргументом уравнения.

При описании движения частиц с помощью переменных Эйлера мы определяем, что наблюдается в точках рассматриваемого пространства, через которое движется среда. При представлении движения частиц по Лагранжу мы определяем, что происходит в каждой индивидуальной частице среды.

Основной принцип лагранжевых моделей — отслеживание множества фиктивных частиц, движущихся по траекториям в трехмерном поле ветра. Положение этих частиц рассчитывается по следующему уравнению:

$$x_{i,new} = x_{i,old} + (\bar{u}_i + u'_i) \cdot \Delta t,$$

где $x_{i,new}$ — новое положение в пространстве (с $i = 1, 2, 3$); $x_{i,old}$ обозначает предыдущее;

\bar{u}_i — средняя значение скорости, а u' — флуктуирующая (случайная, стохастическая) часть, обусловленная турбулентностью движения частицы;

Δt — приращение времени.

Частота прохождения частиц через счетную сетку связывает лагранжеву модель с эйлеровой.

Данный тип модели учитывает следующие параметры окружения при расчете:

- профиль ветра;
- вертикальную дисперсию частиц;
- горизонтальную дисперсию частиц;
- рост облака загрязняющих веществ при подъеме.

Стандартный профиль ветра в модели задается довольно просто и соответствует описанному в документации на модель GRAMM-GRAL [10]:

$$u(z) = u(z_a) \cdot \left(\frac{z}{z_a}\right)^{ex},$$

$$ex = \text{Max}(0.35 - 0.4 \cdot (|L|)^{-0.15}, 0.05) \text{ for } L < 0,$$

$$ex = 0.56 \cdot L^{-0.15} \text{ for } L \geq 0,$$

$$L: \text{Obukhov length}[m].$$

Таким образом, стандартные профили ветра непрерывно изменяются при стратификации. В нейтральных условиях и/или при больших длинах жесткости (городские условия) показатель профиля ветра близок к 0.20, а для сильно конвективных условий уменьшается до 0.05, для сильно устойчивых условий он увеличивается примерно до 0.40.

Для флуктуаций вертикальной составляющей компоненты ветра используется модель Franzese [11]:

$$dw = a(w, z) \cdot dt + [C_0 \cdot \varepsilon(z)]^{0.5} \cdot dW,$$

$$dz(t) = w(t) \cdot dt,$$

где dw — приращение вертикальной составляющей скорости частицы, C_0 — универсальная константа равная 4.0 [12]; $\varepsilon(z)$ — средняя по ансамблю скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; dW — случайное число с нулевым средним значением, дисперсией, равной dt , и гауссовой функцией плотности вероятности (ФПВ).

$$dt(z) = 0.01 \cdot \frac{2 \cdot \sigma_w^2}{C_0 \cdot \varepsilon(z)}.$$

Предполагается, что множитель $a(w, z)$ является функцией вертикальной скорости:

$$a(w, z) = \alpha(z) \cdot w^2 + \beta(z) \cdot w + \gamma(z), \quad (1)$$

где $\alpha(z), \beta(z), \gamma(z)$ — неизвестные параметры, которые задаются уравнением Фоккера–Планка:

$$w \cdot \frac{\partial P_E(w, z)}{\partial z} = - \frac{\partial [a(w, z) \cdot P_E(w, z)]}{\partial w} + \frac{C_0 \cdot \varepsilon(z)}{2} \cdot \frac{\partial^2 P_E(w, z)}{\partial w^2},$$

где $P_E(w, z)$ — является Эйлеровой ФПВ вертикальной составляющей скорости турбулентности на высоте z .

Предполагая квадратичную форму зависимости ускорения, модель Franzese [11] не нуждается в какой-либо информации о форме $P_E(w, z)$, а требует только первый из четырех эйлеровых моментов вертикальной скорости. Коэффициенты в уравнении (1) можно выразить следующими формулами:

$$\alpha(z) = \frac{(1/3) \cdot \partial \bar{w}^4 / \partial z - \bar{w}^3 / (2 \cdot \bar{w}^2) \cdot [\partial \bar{w}^3 / \partial z - C_0 \cdot \varepsilon(z)] - \bar{w}^2 \cdot \partial \bar{w}^2 / \partial z}{\bar{w}^4 - (\bar{w}^3)^2 / \bar{w}^2 - (\bar{w}^2)^2}, \quad (2)$$

$$\beta(z) = \frac{1}{2 \cdot \bar{w}^2} \left[\frac{\partial \bar{w}^3}{\partial z} - 2 \cdot \bar{w}^3 \cdot \alpha(z) - C_0 \cdot \varepsilon(z) \right], \quad (3)$$

$$\gamma(z) = \frac{\partial \bar{w}^2}{\partial z} - \bar{w}^2 \cdot \alpha(z). \quad (4)$$

В уравнениях (2)–(4) $\overline{w^i}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) обозначает наибольший из эйлеровых моментов вертикальной скорости. Первый момент задает среднее значение вертикальной скорости, равной 0, второй – дисперсия – рассчитывается в стабильных и нейтральных условиях $\overline{w^2} = 1.56 \cdot u_*^2(5)$, связывающее уравнение:

$$\overline{w^2} = u_*^2 \cdot \left[1.15 + 0.1 \cdot \left(\frac{z_i}{-L} \right)^{0.67} \right]^2 \quad (6)$$

Третий момент был вычислен в стабильных и нейтральных условиях и для поверхностного слоя в целом $\overline{w^3} = 0$. В конвективных условиях [11]

$$\overline{w^3} = w_*^3 \cdot 1.1 \cdot \left(\frac{z}{z_i} \right) \cdot \left(1 - \frac{z}{z_i} \right)^2,$$

где z_i – планетарный пограничный слой (ППС), u_* – скорость трения, w_* – множитель конвективной скорости, а h высота стабильного ППС рассчитанная для

$$L \geq 0: h = \min \left[0.4 \cdot \left(\frac{u_* \cdot L}{f} \right)^{1/2}, 800 \right],$$

$$L < 0: z_i = \min \left[0.4 \cdot \left(\frac{u_* \cdot L}{f} \right)^{1/2}, 800 \right] + 300 \cdot e^{0.01 \cdot L},$$

где L – длина Обухова, а $f = 0.0001 \text{ s}^{-1}$ параметр Кориолиса [16].

Четвертый момент задается в конвективных условиях $\overline{w^4} = 3.5 \cdot [\overline{w^2(z)}]^2$, при стабильных и нейтральных условиях и поверхностным слоем $\overline{w^4} = 3 \cdot [\overline{w^2(z)}]^2$, являющимся Гауссовым предположением [11].

Скорость ветра и его направление имеют большие отклонения от среднего при низких средних скоростях из-за его извилистости в пространстве. Это приводит к измененной формуле распространения по вертикали, так как каждое направление считается основным и имеет различные высоты облака распространения [13].

Для учета особенностей рельефа при выполнении расчетов модель рассеивания Лагранжа требует данные рельефа местности в формате сетки значений с заданным шагом. Разработан алгоритм преобразования имеющихся открытых данных рельефа в виде контуров, представленных в формате GeoJSON, в необходимый формат данных, содержащий следующие шаги:

1. Загрузка и валидация данных контуров в формате GeoJSON;
2. Проецирование координат контуров из системы WGS84 в местную систему координат заданной области;
3. Сортировка контуров по высоте, создание внешних и внутренних контуров;
4. Преобразование контуров в набор непересекающихся заполненных полигонов для формирования корректного рельефа местности;
5. Формирование сетки высот с заданным шагом на основе полигонов.

Проецирование координат контуров из общей системы в местную необходимо для точного соответствия географическим данным, специфичным для выбранной области, что позволяет повысить точность прогнозирования рассеивания загрязняющих веществ.

На рисунке 1 представлен результат работы алгоритма для формирования карты высот, для примера взят фрагмент рельефа местности Липецкой области со стандартными долготой и широтой и контурами высот, далее было проведено преобразование в местную метрическую систему координат МСК-48, а затем контура высот (замкнутые линии) заменены на полигоны высот (области с заливкой).

Данные по рельефу совместно с метеоданными введены в библиотеку GRAL, которая может быть использована для расчета рассеиваний по Лагранжу. Дополнительно введены данные по источникам выбросов, в том числе высоты труб, диаметры, типы веществ и мощности выбросов. Расчет рассеивания загрязнений представляет собой сетку концентраций загрязняющих веществ в $\text{кг}/\text{м}^2$. Значения концентраций в разных точках сетки прогноза могут отличаться на тысячные доли килограмма и количество уникальных концентраций может достигать сотен тысяч значений, в зависимости от размера и разрешения сетки прогноза данные в сыром виде при создании графика

будут не читаемы, поэтому процесс визуализации результатов работы модели включает в себя этап предобработки значений.

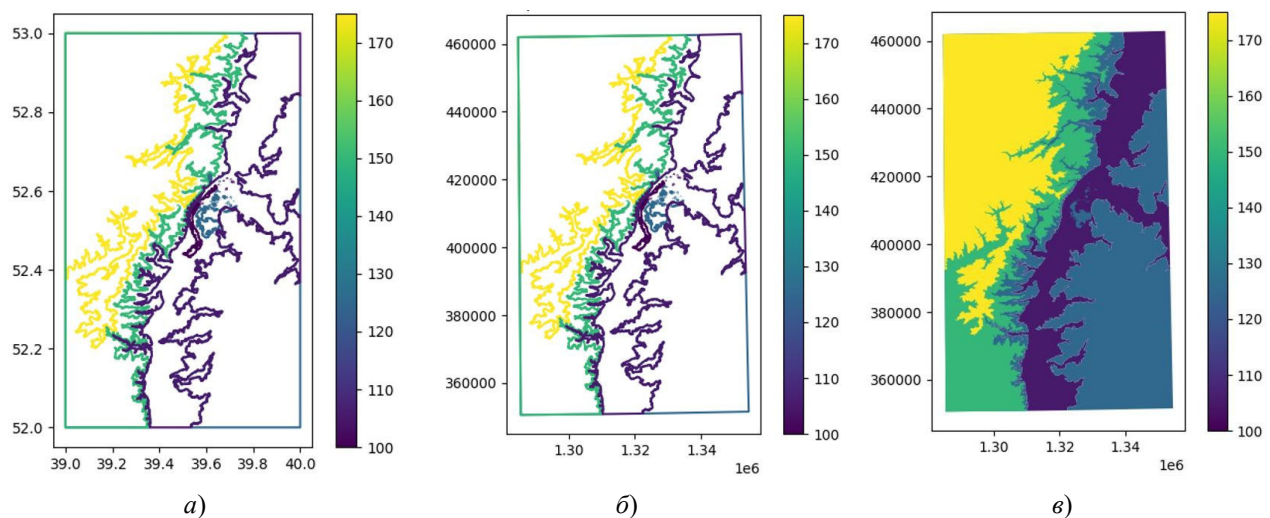


Рисунок 1. Карта высот выбранного участка местности в формате исходных данных по долготе/широте (а), проекция координат в метрическую систему МСК-48 (б), метрическая система МСК-48 с полигонами (в)

На данном этапе количество уникальных значений концентраций веществ сетки уменьшается для их последующего объединения в небольшое количество полигонов и визуализации на графике. Для этого выбирается пороговое значение концентрации, выше которого данные округляются до целого числа, а ниже – до выбранного количества промежутков. Выбор единицы в качестве порогового значения и количества промежутков для округления равного 5..10 позволяет сохранить информацию о высоких концентрациях веществ в эпицентрах источников распространения без потери очертаний облака вещества.

Для получения единого полигона с определенным значением концентрации вещества выбранные точки сетки преобразуются в квадратные полигоны с длиной стороны, равной шагу сетки, и центром полигона в координатах точки. Границы результирующих квадратных полигонов соприкасаются между собой, что позволяет выполнить их объединение в единый полигон или в мультиполигоны, что также важно при визуализации различных типов загрязнителей [13]. На рисунке 2 представлен результат визуализации результатов работы модели расчета рассеиваний с описанным алгоритмом обработки значений.

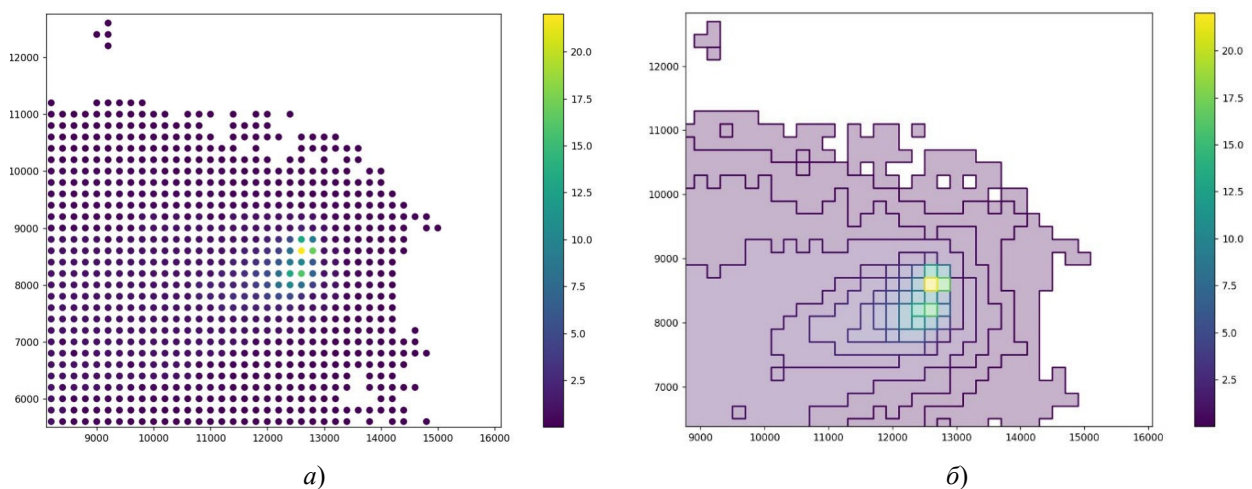


Рисунок 2. Результат визуализации результатов работы модели расчета рассеиваний в виде облака точек (а) и виде полигонов (б)

Параметры и пороговые значения могут быть скорректированы для индивидуальных условий задачи и типа загрязняющего вещества.

Результаты экспериментов

Для тестирования модели Лагранжа была проведена серия экспериментальных расчетов по суткам, а затем посчитанные средние концентрации за зимний сезон 2024–2025 г. В качестве источника загрязнения выбрана одна труба (почти точечный источник) с постоянным значением выброса диоксида серы (SO_4) и фиксированными скоростью и температурой выброса (см. табл. 1). Оценка качества модели проводилась путем выбора ряда точек на карте, усреднения значений концентраций вещества в них и сравнения прогноза модели со значениями, рассчитанными программой «ЭКОцентр–РРВА», версия 2.0 (см. табл. 2).

Таблица 1. Параметры тестового источника загрязнения атмосферы

Высота, м	Диаметр, м	Координаты		Параметры газовой смеси			Загрязняющее вещество	
		X1, X2	Y1, Y2	Скорость, м/с	Объем, м ³ /с	Темп., °C	Код	Выброс, г/с
42.0	1.1	2236807, 7	513435, 9	11.4286	10.861	268.6	0330	6.944

Таблица 2. Результаты экспериментальных расчетов

Модель	Среднее значение, доля ПДК			
Шаг сетки, м	100	50	10	5
Размер экспериментальной области – 1000 м на 1000 м				
ГОСТ	0.036	0.036	0.036	0.036
Модель Лагранжа	0.0425	0.0399	0.0338	0.0341
Размер экспериментальной области – 2000 м на 2000 м				
ГОСТ	0.030	0.030	0.030	0.030
Модель Лагранжа	0.0293	0.0277	0.0231	0.0228
Размер экспериментальной области – 5000 м на 5000 м				
ГОСТ	0.024	0.024	0.024	0.024
Модель Лагранжа	0.0124	0.0150	0.0137	0.0149

Результаты прогнозирования сравнивались с моделью, работающей на основе методики расчета государственного стандарта – с программой расчёта рассеивания для ЭВМ «ЭКОцентр–РРВА», версия 2.0 (положительное заключение экспертизы Росгидромета от 10.11.2020 № 140-08474/20И).

Расчетная область является квадратом и выбирается так, чтобы точечный источник был в её центре. Расчетная область представляла собой квадрат с длиной стороны от 1000 м до 5000 м (рис. 3–5). Во всех расчетах метеорологические условия остаются неизменными:

- средняя температура наружного воздуха –16.6 °C;
- скорость ветра (u^*) 0.5..7 м/с;
- параметры перебора направления ветров 0..360 метео °.

По результатам тестирования можно заметить, что средние значения выбросов для всех расчетов в области 1000 м на 1000 м отличаются от значения, рассчитанного ГОСТ, не более чем на 15 % – модель Лагранжа приближает расчетные данные довольно хорошо к реальным. Как видно из графического представления, с уменьшением шага увеличивается разрешение контуров, но они не являются радиальными. Кроме того, в модели Лагранжа наибольшее влияние на результат оказывают отклонения от среднего направления ветра и его скорости. Средние значения выбросов для всех расчетов в области 5000 м на 5000 м на 50 % отличаются от значения, рассчитанного ГОСТ за счет влияния рельефа местности, но при этом все результаты являются заниженными, что допустимо для этого типа моделей, так как в них используется множество упрощений. Занижение прогнозных данных встречается по всей расчетной области, оно может быть исправлено с помощью поправочного множителя либо входных, либо выходных данных. Как видно из графического представления, тренд на мелкие локальные зоны сохраняется. Общая картина похожа на рассчитанную способом ГОСТа, но с некоторыми поправками на рельеф и метеорологические условия.

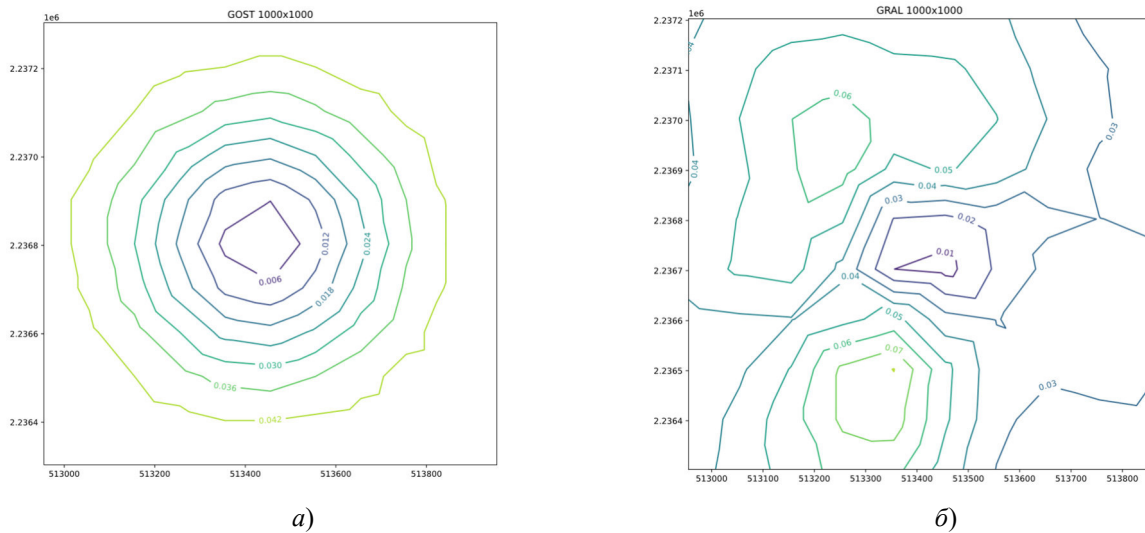


Рисунок 3. Визуальное представление расчетов на сетке 1000 * 1000 м. Точечный источник находится в центре графика: а) расчет ГОСТ; б) расчет с шагом 10 м

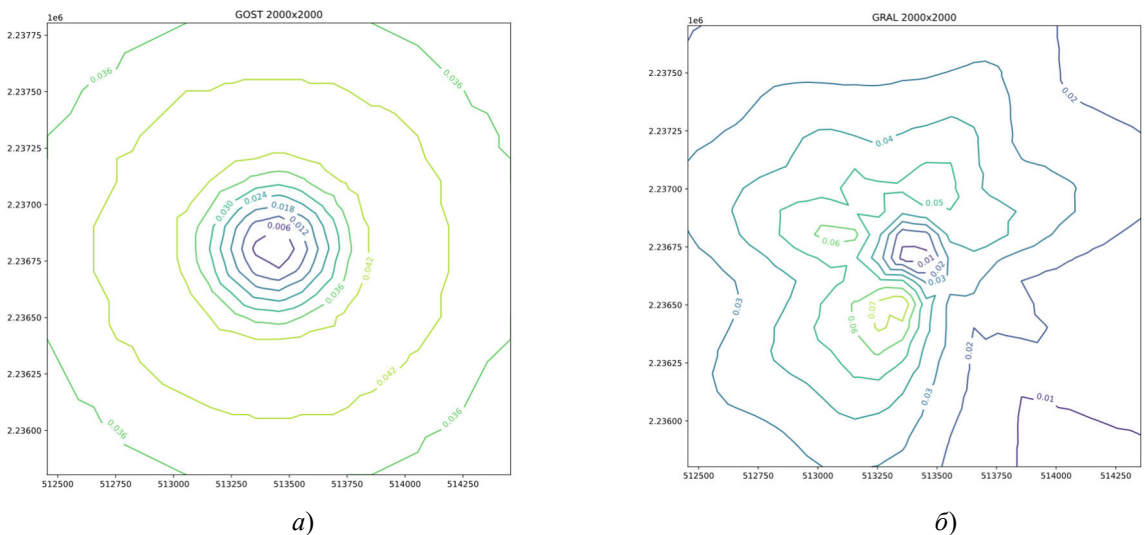


Рисунок 4. Визуальное представление расчетов на сетке 2000 * 2000 м. Точечный источник находится в центре графика: а) расчет ГОСТ; б) расчет с шагом 50 м

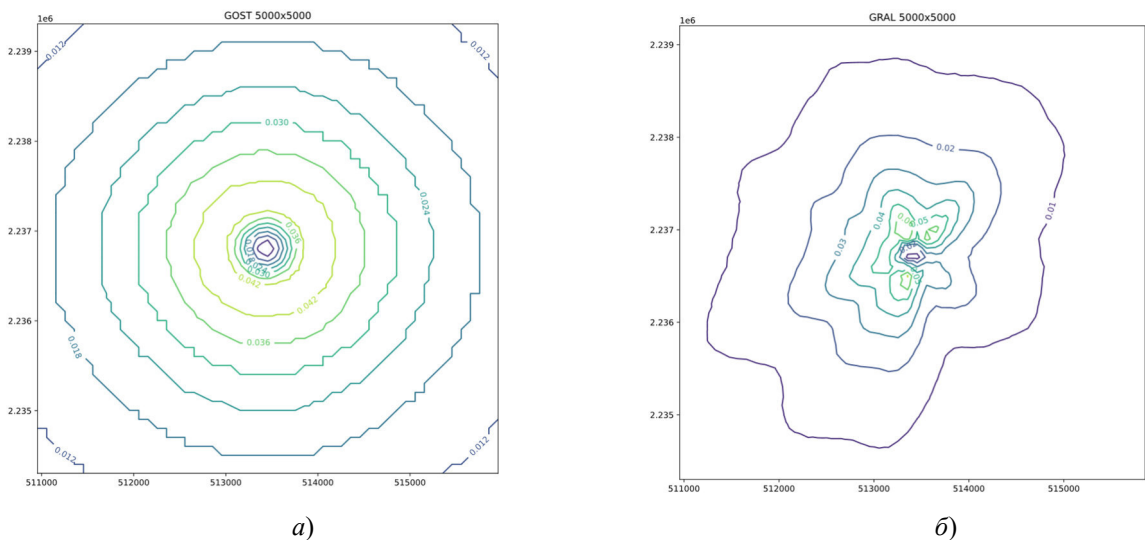


Рисунок 5. Визуальное представление расчетов на сетке 5000 * 5000 м. Точечный источник находится в центре графика: а) расчет ГОСТ; б) расчет с шагом 100 м

Обсуждение результатов

Представленная модель Лагранжа, в отличие от модели Гаусса, обладает рядом преимуществ, которые позволяют использовать ее для решения задач динамической визуализации рассеиваний загрязнений:

- позволяет учесть нестационарность источника выброса;
- учитывает влияние погоды, метеорологические параметры;
- учитывает строения и ландшафт;
- учитывает вертикальное распространение загрязнения.

Применение модели Лагранжа не противоречит расчетам по ГОСТ, при этом обеспечивает базу для использования более сложных моделей анализа данных с применением технологий машинного обучения [14].

Разработанный алгоритм визуализации прогнозов модели, использующий методы группировки значений концентраций, позволяет создать более информативный график рассеивания, по сравнению с простым отображением необработанных данных. Настройка параметров и порогов обработки концентраций помогает учесть особенности разных загрязняющих веществ и их максимальные безопасные значения.

Заключение

Исходя из сравнительных расчетов по средним значениям видно, что модель Лагранжа позволяет получить расчетные данные, не противоречащие результатам ГОСТ, рассчитанным посредством ЭВМ «ЭКОцентр–РРВА», версия 2.0 (положительное заключение экспертизы Росгидромета от 10.11.2020 № 140-08474/20И). При увеличении количества ячеек или уменьшении размера ячейки сетки увеличивается точность определения характера распределения выброса, но частично уменьшается точность самих вычисленных данных. Наиболее точные результаты расчета выбросов моделью могут быть получены при некоторой корректировке входных данных и большом размере расчетной сетки.

Полученная модель рассеивания на основе переменных Лагранжа может быть использована для формирования динамических визуализаций распределения загрязняющих веществ в атмосфере с шагом обновления, например, 20 минут, при этом учитывая рельеф местности (рис. 6).

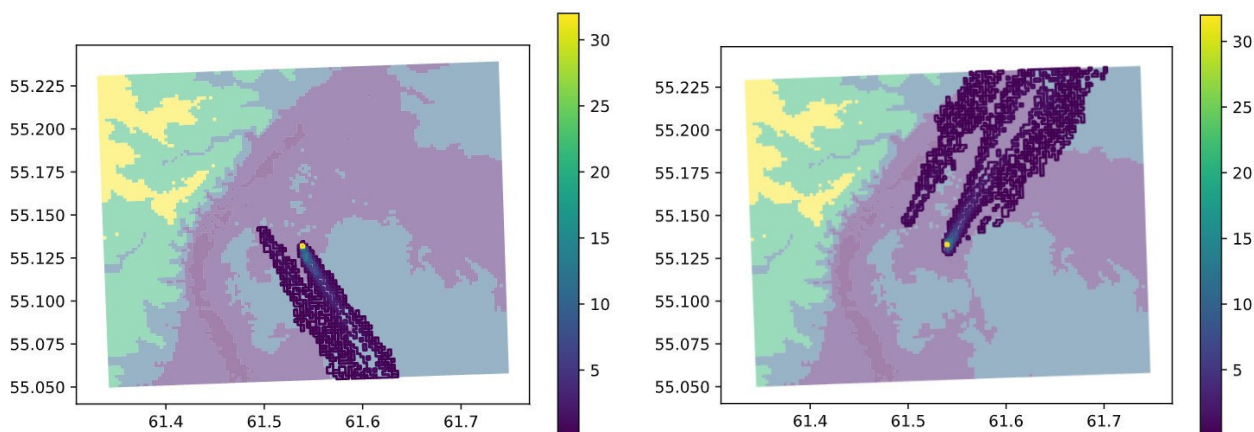


Рисунок 6. Пример прогнозирования распределения загрязняющих веществ с изменением параметров ветра в течение суток. В качестве фонового рисунка отображается карта рельефа местности

Набор полигонов концентраций загрязняющих веществ, получаемый при динамической визуализации результатов работы, может быть использован для онлайн-наблюдения за выбросами источников промышленных предприятий, а также оценки риска аварийных выбросов и их влияния на экономику региона [15]. Приведение координат полигонов к местной системе координат области упрощает процесс анализа рисков опасных уровней концентраций, а введение рельефа позволяет более достоверно оценивать динамику выбросов, что в целом соответствует аспектам инжиниринга ГИС-данных для систем экологического мониторинга.

Источник финансирования

Данная работа является результатом исследовательского проекта, реализованного в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Список литературы

1. Use of Machine Learning in Air Pollution Research: A Bibliographic Perspective / Jain S., Kaur N., Verma S., et al. // *Electronics*. 2022. Vol. 11, no. 21. P. 3621.
2. Air quality index and air pollutant concentration prediction based on machine learning algorithms / Liu H., Li Q., Yu D., Yu G. // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 19. P. 4069.
3. Prediction and analysis of pollution levels in Delhi using multilayer perceptron / Akhtar A., Masood S., Gupta C., Masood A. // *Data engineering and intelligent computing*. Springer, Singapore. 2018. Vol. 542. P. 563–572.
4. Internet of Things mobile – air pollution monitoring system (IoT-mobair) / Dhingra S., Babu Madda R., Gandomi A. H., et al. // *IEEE Internet of Things Journal*. 2019. Vol. 6, no. 3. P. 5577–5584.
5. A Review of Air Quality Modeling / Karroum K., Lin Y., Chiang Y.Y., et al. // *MAPAN*. 2020. Vol. 35. P. 287–300.
6. AiCareAir: Hybrid-ensemble Internet-of-Things sensing unit model for air pollutant control / Borah J., Nadzir M. S. M., Cayetano M. G., et al. // *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24 (13). P. 21558–21565.
7. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году (Государственный доклад). М: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2020. 1000 с.
8. Jeong S.-J. CALPUFF and AERMOD dispersion models for estimating odor emissions from Industrial Complex Area sources // *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 5(1). P. 1–7.
9. Завгороднев А. В., Аكوпова Г. С., Мельников А. В. Теоретические основы рассеивания в атмосфере организованных нестационарных выбросов газа на объектах газотранспортных предприятий // *Территория Нефтегаз*. 2011. № 10. С. 68–73.
10. Evaluation of high-resolution GRAMM–GRAL (v15.12/v14.8) simulations over the city of Zürich, Switzerland / Berchet A., Zink K., Oetli D., et al. // *Geosci. Model Dev*. 2017. Vol. 10, no. 9. P. 3441–3459.
11. An efficient Lagrangian stochastic model of vertical dispersion in the convective boundary layer / Franzese P., Luhar A. K., Borgas M. S. // *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33(15) P. 2337–2345.
12. Estimation of the Lagrangian structure function constant C0 from surface layer wind data / Anfossi D., Degrazia G., Ferrero E., et al. // *Boundary-Layer Meteorol*. 2000. Vol. 95. P. 249–270.
13. Stationary and portable multipollutant monitors for high-spatiotemporal-resolution air quality studies including online calibration / Buehler C., Xiong F., Zamora M. L., et al. // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14(2). P. 995–1013.
14. Modeling P M2.5 forecast using a self-weighted ensemble GRU network: Method optimization and evaluation / Huang H., Qian C. // *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 156. Article. 111138.
15. Air pollution control or economic development? Empirical evidence from enterprises with production restrictions / Feng T., Chen X., Ma J., et al. // *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 336. Article. 117611.