

УДК 519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ ЭРОЗИИ ПОЧВЫ

⁺ *Равшанов Н.¹, Таитемирова Н.Н.¹, Камолитдинова Ф.К.²*

¹ Научно-исследовательский институт развития цифровых технологий и искусственного интеллекта, Ташкент, Узбекистан

² UZINFOCOM – Единый интегратор по созданию и поддержке государственных информационных систем в Республике Узбекистан, Ташкент, Узбекистан

⁺ ravshanzade-09@mail.ru

Аннотация. В работе представлена нелинейная математическая модель и численный алгоритм описывающие процессы выноса и транспортировки аэрозольных и пылевых частиц, возникающих в результате ветровой эрозии почвы в условиях сложного орографического рельефа, где учитываются метеорологические параметры, физико-химические свойства частиц, влажность и шероховатость подстилающей поверхности земли. Модель реализована численно с использованием конечно-разностного метода на структурированной сетке, с интеграцией уравнений Навье-Стокса и уравнения переноса примесей. Проведён численный эксперимент, демонстрирующий влияние ветра, влажности почвы и других факторов на интенсивность эрозионных процессов и загрязнение атмосферы. Результаты моделирования подтверждают высокую чувствительность выноса частиц к приземным метеоусловиям и геометрическим особенностям ландшафта, что подчёркивает необходимость комплексного подхода при прогнозировании экологических рисков в аридных и полуаридных регионах.

Ключевые слова: ветровая эрозия, аэрозоль, математическое моделирование, уравнение Навье-Стокса, метеоусловия, орография, загрязнение воздуха, численные методы.

1 ВВЕДЕНИЕ

Эрозия почвы остаётся одной из ключевых экологических проблем современности, напрямую влияющей на устойчивость экосистем, продуктивность сельского хозяйства и качество атмосферного воздуха. Она возникает как в результате естественных процессов, таких как воздействие ветра и влаги, так и вследствие антропогенной деятельности – интенсивного землепользования, вырубки лесов, неправильного агроведения и урбанизации. Исследование механизмов почвенной эрозии имеет долгую историю, начиная с работ В.И. Гартмана [1], который одним из первых выявил связь между скоростью ветра, рельефом местности и началом выноса частиц с поверхности земли. Позднее В.А. Циплиев [2] и В.П. Сидоров [3] уточнили, что орографические особенности усиливают локальную турбулентность, формируя зоны повышенного риска эрозии.

Особую значимость приобретает ветровая эрозия в засушливых и полусушливых регионах, где отсутствует защитный растительный покров. Мелкодисперсные частицы, поднятые в атмосферу, могут служить переносчиками токсичных соединений, включая пестициды, соли и тяжёлые металлы, что превращает эрозию в источник вторичного загрязнения атмосферы. Как подчёркивают А.Ш. Шарипов [4] и В.К. Барсегян [5], подобные процессы особенно интенсивны в районе бывшего Аральского моря, где высохшее дно и солончаки стали основными источниками аэрозолей, распространяемых на большие расстояния.

Современные подходы к исследованию почвенной эрозии базируются на математическом моделировании, позволяющем учитывать сложное взаимодействие метеорологических, геофизических и антропогенных факторов. С.И. Смирнов и В.М. Лебедев [6] показали, что моделирование распространения аэрозольных частиц критично для оценки риска загрязнения воздуха, особенно в условиях усиливающейся пылевой активности. Работы [7-8] сосредоточены на построении моделей, способных интегрировать физико-химические характеристики частиц, данные о рельефе и климатические параметры, что делает их эффективными инструментами оценки и прогнозирования.

Международные исследования также подчеркивают глобальный характер проблемы. A.S. Goudie [9] акцентирует внимание на влиянии пылевых бурь на здоровье человека, выделяя

зоны с аридным климатом как наиболее подверженные риску. J.M. Prospero et al. [10] классифицировали крупнейшие природные источники минеральной пыли, установив, что такие регионы, как Сахара, Центральная Азия и Австралия, являются основными районами формирования атмосферной пыли. При этом S.H. Boroughani et al. [11] и I. Katra [12] подчёркивают важность учёта структуры почвы, растительности и типа землепользования при анализе эрозионной активности.

Вопрос интеграции моделей эрозии с атмосферными моделями переноса частиц рассмотрен в обзоре [13], где подчёркивается ограниченность традиционных моделей (например, RUSLE и WEPP) в описании воздушной дисперсии загрязнений. Эту проблему решают современные физико-ориентированные модели, такие как DEAD [14], учитывающие аэродинамику частиц, шероховатость поверхности и скорость ветра. Существенный вклад внесён Y. Shao [15], разработавшим обобщённую физическую модель подъёма и переноса частиц ветром, в которой центральную роль играют сила сцепления, пороговая скорость и микроструктура поверхности.

Дополнительные аспекты, такие как климатическая изменчивость и пространственно-временные метеоданные, рассмотрены в работе [16], где подчёркивается необходимость включения актуальных климатических данных в модели. Применение ГИС-технологий и дистанционного зондирования, как показано в [17], существенно повышает точность расчётов за счёт геопространственной детализации рельефа, распределения растительности и состояния почв.

Таким образом, на фоне растущей значимости проблем почвенной эрозии и пылевого загрязнения атмосферы, особенно в трансформированных ландшафтах, представляется актуальной задача построения математической модели, учитывающей комплекс природных и антропогенных факторов, включая орографию, ветровые поля, влажность почвы и характеристики аэрозольных частиц. Настоящая работа направлена на разработку такой модели и её применение для анализа ситуации в засушливых регионах, на примере Приаралья.

2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исходя из сказанной выше исследование посвящено разработке и применению математической модели распространения пылевых и солевых частиц, образующихся в результате деятельности наземных источников тяжёлых и лёгких аэрозолей, с учётом метеорологических факторов. В математической модели учитываются эрозионные процессы, погодные и климатические условия, физико-механические свойства частиц, а также другие параметры, влияющие на дисперсию загрязнителей [18-22]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + (w - w_g) \frac{\partial \theta}{\partial z} + (\sigma + \alpha) = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + Q_\theta, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_v, \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_w, \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = -\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} + 2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} + 2 \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z} \right). \quad (3)$$

Для системы уравнений (1)-(3) задаются начальные условия

$$\begin{cases} u(x, y, z, 0) = u_0(x, y, z); \\ v(x, y, z, 0) = v_0(x, y, z); \\ w(x, y, z, 0) = w_0(x, y, z); \\ P(x, y, z, 0) = P_0(x, y, z); \\ \theta(x, y, z, 0) = \theta_0(x, y, z) \end{cases} \quad (4)$$

и граничные условия

$$\begin{cases} -D \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = \gamma(\theta - \theta_a); & -D \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=0} = \gamma(\theta - \theta_a); & -D \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \gamma(\beta\theta - F_0); \\ D \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = \gamma(\theta - \theta_a); & D \frac{\partial \theta}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = \gamma(\theta - \theta_a); & D \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = \gamma(\theta - \theta_a). \end{cases} \quad (5)$$

Граничные условия на входе области задаются по данным о скорости ветра, полученным, например, из метеорологических источников, таких как OpenWeatherMap, что позволяет учитывать основные атмосферные условия в моделировании:

$$u(0, y, z, t) = u_{\text{inlet}}(t); \quad v(0, y, z, t) = v_{\text{inlet}}(t); \quad w(0, y, z, t) = w_{\text{inlet}}(t). \quad (6)$$

Скорость потока на выходе области задаётся с помощью условий Неймана, предполагающих отсутствие значительных градиентов скорости, что соответствует стабилизированному, вытекающему потоку:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; & \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; & \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; & \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; & \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; & \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \\ \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0; & \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; & \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; & \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0; & \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = 0; & \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = 0; \\ \frac{\partial v}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0; & \frac{\partial v}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = 0; & \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = 0; & \frac{\partial w}{\partial x} \Big|_{x=L_x} = 0; & \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=L_y} = 0; & \frac{\partial w}{\partial z} \Big|_{z=L_z} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Внутри твердых объектов, формирующих сложную геометрию (например, зданий), поток воздуха отсутствует, а концентрация загрязняющих веществ принимается равной нулю, что соответствует условиям непроницаемости и изоляции:

$$u = 0; \quad v = 0; \quad w = 0; \quad P = P_0; \quad \theta = 0, \quad \text{если } (x, y, z) \in \Omega_{\text{object}}. \quad (8)$$

На поверхностях твёрдых объектов скорость потока определяется с использованием логарифмического закона стенки:

$$u = U_\tau \left(\frac{1}{\kappa} \ln(x^+) + b \right); \quad v = U_\tau \left(\frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + b \right); \quad w = U_\tau \left(\frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + b \right), \quad (9)$$

где $x^+ = \frac{U_\tau x}{\nu}$; $y^+ = \frac{U_\tau y}{\nu}$; $z^+ = \frac{U_\tau z}{\nu}$; $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$. τ_w – касательное напряжение на поверхности

стены; κ – постоянная фон Кармана; b – константа модели; θ – концентрация загрязняющего вещества; t – время; x, y, z – пространственные координаты в декартовой системе; u, v, w – компоненты скорости ветра в направлениях x, y, z соответственно; w_g – скорость осаждения частицы; σ – коэффициент поглощения частиц, α – захват частиц растительностью; D – коэффициент диффузии, описывающий молекулярное или турбулентное распространение вещества; γ – безразмерный параметр; β – коэффициент взаимодействия с подстилающей поверхностью; F_0 – количество вредного вещества, отрывающееся от шероховатой поверхности земли; Q_θ – источник эмиссии загрязняющих веществ; P – атмосферное давление; ρ – плотность воздуха; ν – кинематическая вязкость воздуха; F_u, F_v, F_w – внешние силы в направлениях x, y, z , например, сила Кориолиса или гравитация.

Значение величины F_0 выражается как функция от x, y, z, t и должно быть получено эмпирическим путём, принимая во внимание метеорологические параметры, свойства подстилающего слоя, а также геометрические и плотностные характеристики переносимых частиц.

Статистическая обработка данных, отражающих влияние различных погодных и климатических условий на вынос частиц с поверхности почвы, показывает, что основным фактором, способствующим развитию эрозийных процессов, является скорость набегающего воздушного потока. В то же время определяющим стабилизирующим параметром выступает влажность почвы. Остальные

метеорологические и физико-механические характеристики оказывают менее устойчивое и зачастую неоднозначное воздействие. В связи с этим при построении математических моделей, описывающих перенос вредных примесей и изменение их концентрации во времени, необходимо в первую очередь учитывать параметры воздушного потока и влажностные характеристики почвы, принимая физико-химические свойства почвы за постоянные величины, включённые в расчетные выражения.

Скорость ветра и влажность почвы по-разному влияют на динамику как выноса частиц, так и формирования зон загрязнения. Повышение скорости потока воздуха интенсифицирует эрозионные процессы, тогда как увеличение влажности способствует росту сцепления между почвенными частицами, тем самым препятствуя их разрушению и уносу.

Общая функциональная зависимость объема уносимых частиц от внешних воздействий приводится по [23] в виде:

$$F_0 = f(u, w), \quad (10)$$

где F_0 – объемный расход почвенных частиц, уносимых атмосферным фронтом, м³/с.

Для определения вида зависимости (10) проводится анализ действующих на почву сил. Разрушающее воздействие (F) обусловлено касательными напряжениями в пограничном слое воздушного потока, в то время как сопротивляющиеся силы (R) зависят от влажности и других физико-механических свойств почвы. Процесс эрозии начинается при превышении $F > R$. В условиях динамического равновесия справедливо соотношение:

$$F - R = 0. \quad (11)$$

Касательное напряжение, определяющее интенсивность разрушения почвы, можно выразить через скорость набегающего потока:

$$F = \frac{\partial F_0}{\partial u} \cdot \chi, \quad (12)$$

χ – касательное напряжение, кг/м².

Сопротивляющаяся сила, по аналогии, задаётся выражением:

$$R = c_0 \frac{\mu_c}{l} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta}, \quad (13)$$

где μ_c – вязкость смеси воздух-почва, кг·с/м²; l – среднее расстояние между частицами, м; c_0 – структурная константа почвы.

Подставляя (11) и (12) в (10), получаем:

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} \chi - c_0 \frac{\mu_c}{l} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0, \quad (14)$$

или в более развернутом виде:

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} - c_0 \frac{\mu_c}{l \chi} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0, \quad (15)$$

где u – скорость ветра, а μ_c – функция, зависящая от влажности почвы.

Приближенно касательное напряжение может быть выражено через внешнюю скорость потока:

$$c_0 \mu_c / (l \chi) = c_0 \mu_c / (l u_\infty). \quad (16)$$

В этом случае вязкость смеси μ_c считается функцией влажности, поскольку последняя определяет силу сцепления между частицами. Соответственно, структурная константа c_0 может быть выражена через зависимость от влажности:

$$c_0 \mu_c / (l u_\infty) \cong c'_0 f(\zeta). \quad (17)$$

Для упрощения модели функция $f(\zeta)$ принимается в виде:

$$f(\zeta) \cong c_0 c'_0 \zeta. \tag{18}$$

Таким образом, итоговое выражение принимает вид:

$$c_0 \mu_0 / (l u_\infty) \cong c_0 f(\zeta) \cong c_0 c'_0 \zeta = k_p w, \tag{19}$$

где k_p – обобщённый коэффициент, включающий постоянные параметры почвы и среды.

Подставляя (19) в уравнение переноса, получаем выражение

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} - k_p \zeta \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0, \tag{20}$$

позволяющее количественно оценивать объем уноса частиц в зависимости от горизонтальной скорости воздушного потока в приземном слое атмосферы.

3 МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для численного моделирования переноса аэрозольных частиц от наземных источников под воздействием ветровых потоков и метеоусловий используется конечно-разностный метод. Он позволяет дискретизировать систему уравнений, описывающих аэродинамику, процесс эрозии почвы, транспорт и осаждение загрязняющих частиц. Учитывая сложность рельефа и пространственно-временную изменчивость метеоусловий, задача решается в трёхмерной области с использованием структурированной сетки.

Математически расчётная область формализуется следующим образом:

$$\Omega_{x,y,z,t} = \left\{ \left(x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z, t_n = n\Delta t \right); \right. \\ \left. i = \overline{1, N_x}; j = \overline{1, N_y}; k = \overline{1, N_z}; n = \overline{0, N_t}; \Delta t = \frac{T}{N_t} \right\}.$$

Здесь N_x, N_y, N_z – количество узлов сетки по каждой координатной оси; N_t – количество временных слоев; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – шаги по пространственным координатам; Δt – шаг по времени.

В процессе дискретизации дифференциальные операторы заменены конечными разностями, в результате чего сформированы дискретные аналоги уравнений Навье-Стокса, пригодные для численного решения. Это позволяет упростить математическую постановку для реализации на ЭВМ. Уравнения Навье-Стокса, описывающие поля скорости и давления в потоке, дискретизируются с использованием различных численных схем. Одной из распространённых является схема upwind-downwind, в которой направление потока определяет выбор разностного приближения, обеспечивая устойчивость и физическую корректность моделирования конвективных переносов.

Для реализации численного решения уравнений Навье-Стокса и получения устойчивого и корректного поля скоростей, на каждом временном шаге вводятся промежуточные значения скоростей. Эти промежуточные значения представляют собой аппроксимацию компоненты скорости без учета давления и служат основой для дальнейшего вычисления поля давления и окончательной коррекции скоростей, обеспечивающей выполнение условия несжимаемости (дивергенция скорости равна нулю).

Расчет промежуточной скорости выполнено по следующей схеме, сначала решаются дискретные уравнения для компонент скорости $u'_{i,j,k}, v'_{i,j,k}, w'_{i,j,k}$, в которых отсутствует давление. Затем решается уравнение Пуассона для давления, основанное на требовании дивергенции скорости быть равной нулю. После этого производится коррекция промежуточных скоростей с учетом градиента давления, чтобы получить финальные значения $u_{i,j,k}^{n+1}, v_{i,j,k}^{n+1}, w_{i,j,k}^{n+1}$, соответствующие текущему шагу по времени.

Для расчета поля скоростей дискретизация в направлении x

$$\frac{u'_{i,j,k} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} = - \left\{ \begin{array}{l} u_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x}, \quad \text{если } u_{i,j,k}^n > 0 \\ u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta x}, \quad \text{если } u_{i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} -$$

$$\begin{aligned}
& - \left\{ \begin{array}{l} v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n > 0 \\ v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j+1,k}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} - \\
& - \left\{ \begin{array}{l} (w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n) \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n > 0 \\ (w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n) \frac{u_{i,j,k+1}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} + \\
& + v \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right); \\
& \quad \quad \quad u'_{i,j,k} = u_{i,j,k}^n - \\
& - \Delta t \left\{ \begin{array}{l} u_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x}, \quad \text{если } u_{i,j,k}^n > 0 \\ u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta x}, \quad \text{если } u_{i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} - \Delta t \left\{ \begin{array}{l} v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n > 0 \\ v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j+1,k}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} - \\
& - \Delta t \left\{ \begin{array}{l} (w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n) \frac{u_{i,j,k}^n - u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n > 0 \\ (w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n) \frac{u_{i,j,k+1}^n - u_{i,j,k}^n}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} + \\
& + \Delta t v \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right).
\end{aligned}$$

Представленная формула является дискретным аналогом уравнения Навье-Стокса и описывает эволюцию компоненты скорости в заданном направлении. Она учитывает влияние конвективных переносов, вязкостной диффузии, а также нестационарных (временных) изменений. Для повышения численной устойчивости расчетов используется схема противоточной разности (upwind), позволяющая адаптивно выбирать направление аппроксимации производных в зависимости от направления потока.

Для компонент скорости в направлениях y и z (соответственно v и w) используются аналогичные дискретные уравнения. Выражение для компоненты скорости в направлении y .

$$\begin{aligned}
\frac{v'_{i,j,k} - v_{i,j,k}^n}{\Delta t} = & - \left\{ \begin{array}{l} u_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j,k}^n - v_{i-1,j,k}^n}{\Delta x}, \quad \text{если } u_{i,j,k}^n > 0 \\ u_{i,j,k}^n \frac{v_{i+1,j,k}^n - v_{i,j,k}^n}{\Delta x}, \quad \text{если } u_{i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} - \\
& - \left\{ \begin{array}{l} v_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j,k}^n - v_{i,j-1,k}^n}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n > 0 \\ v_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j+1,k}^n - v_{i,j,k}^n}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} - \\
& - \left\{ \begin{array}{l} (w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n) \frac{v_{i,j,k}^n - v_{i,j,k-1}^n}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n > 0 \\ (w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n) \frac{v_{i,j,k+1}^n - v_{i,j,k}^n}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n - w_{g\ i,j,k}^n < 0 \end{array} \right\} + \\
& + v \left(\frac{v_{i+1,j,k}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{v_{i,j+1,k}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{v_{i,j,k+1}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right).
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 v'_{i,j,k} = v^n_{i,j,k} - \Delta t & \left\{ \begin{aligned} & u^n_{i,j,k} \frac{v^n_{i,j,k} - v^n_{i-1,j,k}}{\Delta x}, & \text{если } u^n_{i,j,k} > 0 \\ & u^n_{i,j,k} \frac{v^n_{i+1,j,k} - v^n_{i,j,k}}{\Delta x}, & \text{если } u^n_{i,j,k} < 0 \end{aligned} \right\} - \\
 & - \Delta t \left\{ \begin{aligned} & v^n_{i,j,k} \frac{v^n_{i,j,k} - v^n_{i,j-1,k}}{\Delta y}, & \text{если } v^n_{i,j,k} > 0 \\ & v^n_{i,j,k} \frac{v^n_{i,j+1,k} - v^n_{i,j,k}}{\Delta y}, & \text{если } v^n_{i,j,k} < 0 \end{aligned} \right\} - \\
 & - \Delta t \left\{ \begin{aligned} & (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) \frac{v^n_{i,j,k} - v^n_{i,j,k-1}}{\Delta z}, & \text{если } w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k} > 0 \\ & (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) \frac{v^n_{i,j,k+1} - v^n_{i,j,k}}{\Delta z}, & \text{если } w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k} < 0 \end{aligned} \right\} + \\
 + \Delta t v & \left(\frac{v^n_{i+1,j,k} - 2v^n_{i,j,k} + v^n_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{v^n_{i,j+1,k} - 2v^n_{i,j,k} + v^n_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{v^n_{i,j,k+1} - 2v^n_{i,j,k} + v^n_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} \right).
 \end{aligned}$$

Выражение для компоненты скорости в направлении z:

$$\begin{aligned}
 & \frac{w'_{i,j,k} - (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k})}{\Delta t} = \\
 = & - \left\{ \begin{aligned} & u^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) - (w^n_{i-1,j,k} - w^n_{g i-1,j,k})}{\Delta x}, & \text{если } u^n_{i,j,k} > 0 \\ & u^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i+1,j,k} - w^n_{g i+1,j,k}) - (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k})}{\Delta x}, & \text{если } u^n_{i,j,k} < 0 \end{aligned} \right\} - \\
 & - \left\{ \begin{aligned} & v^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) - (w^n_{i,j-1,k} - w^n_{g i,j-1,k})}{\Delta y}, & \text{если } v^n_{i,j,k} > 0 \\ & v^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i,j+1,k} - w^n_{g i,j+1,k}) - (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k})}{\Delta y}, & \text{если } v^n_{i,j,k} < 0 \end{aligned} \right\} - \\
 & - \left\{ \begin{aligned} & w^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) - (w^n_{i,j,k-1} - w^n_{g i,j,k-1})}{\Delta z}, & \text{если } w^n_{i,j,k} > 0 \\ & w^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i,j,k+1} - w^n_{g i,j,k+1}) - (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k})}{\Delta z}, & \text{если } w^n_{i,j,k} < 0 \end{aligned} \right\} + \\
 + v & \left[\begin{aligned} & \frac{(w^n_{i+1,j,k} - w^n_{g i+1,j,k}) - 2(w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) + (w^n_{i-1,j,k} - w^n_{g i-1,j,k})}{\Delta x^2} + \\ & \frac{(w^n_{i,j+1,k} - w^n_{g i,j+1,k}) - 2(w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) + (w^n_{i,j-1,k} - w^n_{g i,j-1,k})}{\Delta y^2} + \\ & \frac{(w^n_{i,j,k+1} - w^n_{g i,j,k+1}) - 2(w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) + (w^n_{i,j,k-1} - w^n_{g i,j,k-1})}{\Delta z^2} \end{aligned} \right]; \\
 & w'_{i,j,k} = (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) - \\
 & - \Delta t \left\{ \begin{aligned} & u^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k}) - (w^n_{i-1,j,k} - w^n_{g i-1,j,k})}{\Delta x}, & \text{если } u^n_{i,j,k} > 0 \\ & u^n_{i,j,k} \frac{(w^n_{i+1,j,k} - w^n_{g i+1,j,k}) - (w^n_{i,j,k} - w^n_{g i,j,k})}{\Delta x}, & \text{если } u^n_{i,j,k} < 0 \end{aligned} \right\} -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\Delta t \left\{ \begin{aligned} & v_{i,j,k}^n \frac{(w_{i,j,k}^n - w_{gi,j,k}^n) - (w_{i,j-1,k}^n - w_{gi,j-1,k}^n)}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n > 0 \\ & v_{i,j,k}^n \frac{(w_{i,j+1,k}^n - w_{gi,j+1,k}^n) - (w_{i,j,k}^n - w_{gi,j,k}^n)}{\Delta y}, \quad \text{если } v_{i,j,k}^n < 0 \end{aligned} \right\} - \\
& -\Delta t \left\{ \begin{aligned} & w_{i,j,k}^n \frac{(v_{i,j,k}^n - v_{gi,j,k}^n) - (v_{i,j,k-1}^n - v_{gi,j,k-1}^n)}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n > 0 \\ & w_{i,j,k}^n \frac{(v_{i,j,k+1}^n - v_{gi,j,k+1}^n) - (v_{i,j,k}^n - v_{gi,j,k}^n)}{\Delta z}, \quad \text{если } w_{i,j,k}^n < 0 \end{aligned} \right\} + \\
& +v\Delta t \left(\begin{aligned} & \frac{(w_{i+1,j,k}^n - w_{gi+1,j,k}^n) - 2(w_{i,j,k}^n - w_{gi,j,k}^n) + (w_{i-1,j,k}^n - w_{gi-1,j,k}^n)}{\Delta x^2} + \\ & \frac{(w_{i,j+1,k}^n - w_{gi,j+1,k}^n) - 2(w_{i,j,k}^n - w_{gi,j,k}^n) + (w_{i,j-1,k}^n - w_{gi,j-1,k}^n)}{\Delta y^2} + \\ & \frac{(w_{i,j,k+1}^n - w_{gi,j,k+1}^n) - 2(w_{i,j,k}^n - w_{gi,j,k}^n) + (w_{i,j,k-1}^n - w_{gi,j,k-1}^n)}{\Delta z^2} \end{aligned} \right).
\end{aligned}$$

3.1 Граничные условия для скорости

Граничные условия для скорости задают значения компонент скорости на границах расчетной области, таких как поверхности твёрдых тел, зданий или земной поверхности. В расчетах применяются следующие типы граничных условий:

$$u'_{0,j,k} = u'_{1,j,k}, \quad u'_{i,j,k} = u'_{i-1,j,k}, \quad u'_{i,0,k} = u'_{i,1,k}, \quad u'_{i,j,k} = u'_{i,j-1,k}, \quad u'_{i,j,0} = u'_{i,j,1}, \quad u'_{i,j,K} = u'_{i,j,K-1}.$$

Указанные граничные условия обеспечивают физически корректное поведение потока на границах расчетной области, в частности, непрерывность и согласованность полей скорости. Например, на твёрдой неподвижной поверхности (стенке) накладывается условие прилипания, предполагающее нулевое значение скорости, в то время как на открытых границах могут задаваться условия входа или выхода потока, отражающие взаимодействие с внешней средой.

3.2 Коррекция давления

Для коррекции поля давления используется дискретная форма уравнения Пуассона, основанная на применении оператора Лапласа. Это позволяет обеспечить выполнение условия несжимаемости потока:

$$\nabla^2 p_{i,j,k} \approx \frac{p_{i+1,j,k}^n - 2p_{i,j,k}^n + p_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{p_{i,j+1,k}^n - 2p_{i,j,k}^n + p_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{p_{i,j,k+1}^n - 2p_{i,j,k}^n + p_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}.$$

Дискретизация дивергенции поля скорости осуществляется по конечно-разностной схеме, что позволяет выразить локальное изменение объёма в ячейке через значения скоростей на её границах:

$$\begin{aligned}
RHS = & \left(\frac{u'_{i+1,j,k} - u'_{i-1,j,k}}{2\Delta x} \right)^2 + \left(\frac{u'_{i,j+1,k} - u'_{i,j-1,k}}{2\Delta y} \right) \left(\frac{v'_{i+1,j,k} - v'_{i-1,j,k}}{2\Delta x} \right) + \\
& + \left(\frac{v'_{i,j+1,k} - v'_{i,j-1,k}}{2\Delta y} \right)^2 + 2 \left(\frac{u'_{i,j,k+1} - u'_{i,j,k-1}}{2\Delta z} \right) \left(\frac{w'_{i+1,j,k} - w'_{i-1,j,k}}{2\Delta x} \right) + \\
& + 2 \left(\frac{v'_{i,j,k+1} - v'_{i,j,k-1}}{2\Delta z} \right) \left(\frac{w'_{i,j+1,k} - w'_{i,j-1,k}}{2\Delta y} \right) + \left(\frac{w'_{i,j,k+1} - w'_{i,j,k-1}}{2\Delta z} \right)^2.
\end{aligned}$$

Полученное давление используется для обновления компонент скорости с целью устранения несогласованностей и соблюдения дивергентного условия:

$$P_{i,j,k} = \frac{-\rho \cdot RHS - \left(\frac{P_{i+1,j,k}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right)}{\left(-\frac{2}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta y^2} - \frac{2}{\Delta z^2} \right)}$$

Граничные условия для давления:

$$P_{0,j,k} = P_{1,j,k}, P_{I,j,k} = P_{I-1,j,k}, P_{i,0,k} = P_{i,1,k}, P_{i,J,k} = P_{i,J-1,k}, P_{i,j,0} = P_{i,j,1}, P_{i,j,K} = P_{i,j,K-1}$$

Обновление давления:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^n + \alpha_p (p'_{i,j,k} - P_{i,j,k}^n)$$

После решения уравнения для давления выполняется коррекция поля скоростей с учётом полученного градиента давления. Это обеспечивает соблюдение условия несжимаемости потока (нулевого дивергенция скорости). Компоненты скорости обновляются по следующему правилу:

$$u_{i,j,k}^{n+1} = u_{i,j,k}^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i-1,j,k}^{n+1}}{2\Delta x}, \quad v_{i,j,k}^{n+1} = v_{i,j,k}^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j-1,k}^{n+1}}{2\Delta y},$$

$$w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g i,j,k}^{n+1} = w_{i,j,k}^n - w_{g i,j,k}^n - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k-1}^{n+1}}{2\Delta z}$$

3.3 Распространение вещества

Уравнение переноса примеси, температуры или другого скалярного вещества дискретизируется с использованием конечно-разностной схемы. Эта дискретизация учитывает конвективный перенос за счёт движения среды, диффузионное распределение, а также возможные источники и стоки. Общая форма уравнения имеет следующий вид:

$$\frac{\theta_{i,j,k}^{n+1} - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta t} = - \left\{ \begin{array}{l} u_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i,j,k}^n - \theta_{i-1,j,k}^n}{\Delta x}, \text{ если } u_{i,j,k}^{n+1} > 0 \\ u_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i+1,j,k}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta x}, \text{ если } u_{i,j,k}^{n+1} < 0 \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} v_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i,j,k}^n - \theta_{i,j-1,k}^n}{\Delta y}, \text{ если } v_{i,j,k}^{n+1} > 0 \\ v_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i,j+1,k}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta y}, \text{ если } v_{i,j,k}^{n+1} < 0 \end{array} \right\} -$$

$$- \left\{ \begin{array}{l} (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g i,j,k}^{n+1}) \frac{\theta_{i,j,k}^n - \theta_{i,j,k-1}^n}{\Delta z}, \text{ если } (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g i,j,k}^{n+1}) > 0 \\ (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g i,j,k}^{n+1}) \frac{\theta_{i,j,k+1}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta z}, \text{ если } (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g i,j,k}^{n+1}) < 0 \end{array} \right\} +$$

$$+ D \left(\frac{\theta_{i+1,j,k}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{\theta_{i,j+1,k}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{\theta_{i,j,k+1}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) + Q_{\theta,i,j,k}^{n+1},$$

$$\theta_{i,j,k}^{n+1} = \theta_{i,j,k}^n + \Delta t Q_{\theta,i,j,k}^{n+1} - \Delta t \left\{ \begin{array}{l} u_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i,j,k}^n - \theta_{i-1,j,k}^n}{\Delta x}, \text{ если } u_{i,j,k}^{n+1} > 0 \\ u_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i+1,j,k}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta x}, \text{ если } u_{i,j,k}^{n+1} < 0 \end{array} \right\} -$$

$$\begin{aligned}
& -\Delta t \left\{ \begin{array}{l} v_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i,j,k}^n - \theta_{i,j-1,k}^n}{\Delta y}, \text{ если } v_{i,j,k}^{n+1} > 0 \\ v_{i,j,k}^{n+1} \frac{\theta_{i,j+1,k}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta y}, \text{ если } v_{i,j,k}^{n+1} < 0 \end{array} \right\} - \\
& -\Delta t \left\{ \begin{array}{l} (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g,i,j,k}^{n+1}) \frac{\theta_{i,j,k}^n - \theta_{i,j,k-1}^n}{\Delta z}, \text{ если } (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g,i,j,k}^{n+1}) > 0 \\ (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g,i,j,k}^{n+1}) \frac{\theta_{i,j,k+1}^n - \theta_{i,j,k}^n}{\Delta z}, \text{ если } (w_{i,j,k}^{n+1} - w_{g,i,j,k}^{n+1}) < 0 \end{array} \right\} + \\
& + D\Delta t \left(\begin{array}{l} \frac{\theta_{i+1,j,k}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ \frac{\theta_{i,j+1,k}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ \frac{\theta_{i,j,k+1}^n - 2\theta_{i,j,k}^n + \theta_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \end{array} \right).
\end{aligned}$$

Граничные условия для переноса вещества:

$$\begin{aligned}
\theta_{0,j,k}^{n+1} &= \frac{\theta_{0,j,k}^{n+1} + \theta_{1,j,k}^{n+1}}{2}, \quad \theta_{l,j,k}^{n+1} = \frac{\theta_{l,j,k}^{n+1} + \theta_{l-1,j,k}^{n+1}}{2}, \\
\theta_{i,0,k}^{n+1} &= \frac{\theta_{i,0,k}^{n+1} + \theta_{i,1,k}^{n+1}}{2}, \quad \theta_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\theta_{i,j,k}^{n+1} + \theta_{i,j-1,k}^{n+1}}{2}, \\
\theta_{i,j,0}^{n+1} &= \frac{\theta_{i,j,0}^{n+1} + \theta_{i,j,1}^{n+1}}{2}, \quad \theta_{i,j,k}^{n+1} = \frac{\theta_{i,j,k}^{n+1} + \theta_{i,j,k-1}^{n+1}}{2}.
\end{aligned}$$

Для оценки точности численного решения и контроля его сходимости вычисляются остатки уравнений. Остатки рассчитываются на каждом шаге итерационного процесса следующим образом:

$$\begin{aligned}
R_p &= \left| \frac{p^{n+1} - p^n}{p^{n+1}} \right|; \quad R_u = \left| \frac{u^{n+1} - u^n}{u^{n+1}} \right|; \quad R_v = \left| \frac{v^{n+1} - v^n}{v^{n+1}} \right|, \\
R_w &= \left| \frac{(w^{n+1} - w_g^{n+1}) - (w^n - w_g^n)}{(w^{n+1} - w_g^{n+1})} \right|; \quad R_C = \left| \frac{C^{n+1} - C^n}{C^{n+1}} \right|.
\end{aligned}$$

Если значения остатка по всем уравнениям становятся меньше заранее заданного порогового значения, считается, что сходимость достигнута, и итерации прекращаются. В противном случае вычисления продолжают до выполнения этого критерия.

Описанный итерационный алгоритм позволяет дискретизировать и последовательно решать систему уравнений Навье-Стокса и уравнение переноса вещества. На каждой итерации обновляются поля давления, скоростей и концентрации. Такой подход обеспечивает устойчивость и точность решения, что особенно важно при моделировании распространения загрязняющих веществ в условиях городской среды. Применение данной численной схемы позволяет надёжно прогнозировать динамику распределения примесей в атмосфере с учётом сложной геометрии и нестационарных процессов.

Начальные значения компонентов скорости ветра и давления, а также направления потока были получены из открытой геопространственной базы данных OpenStreetMap. Расчёты проведены с использованием специализированного программного обеспечения, разработанного на языке программирования Python с применением библиотек Requests, NumPy, SciPy, Matplotlib, Plotly и Numba.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании полученного численного решения уравнений (20) была проведена количественная оценка объема выброса мелкодисперсных частиц в атмосферу. Расчёты показали, что интенсив-

ность уноса частиц существенно зависит от горизонтальной составляющей скорости ветра у поверхности земли, уровня влажности почвы, коэффициента её шероховатости, а также ряда других физико-механических характеристик грунта. Важно отметить, что процесс ветрового уноса сам по себе является механизмом вторичного загрязнения атмосферы, при котором вредные вещества, изначально находящиеся в поверхностном слое почвы, переходят в аэрозольное состояние и распространяются воздушным потоком. Графические зависимости, представленные на рис. 1-6, наглядно иллюстрируют влияние указанных факторов на величину загрязнения атмосферы.

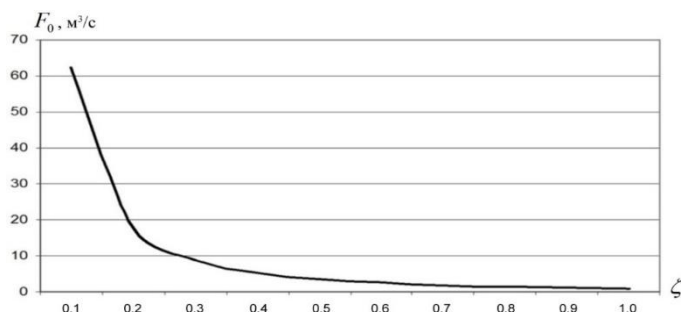


Рис. 1. Влияние влажности почвы на снижение объема уноса загрязняющих частиц в атмосферу

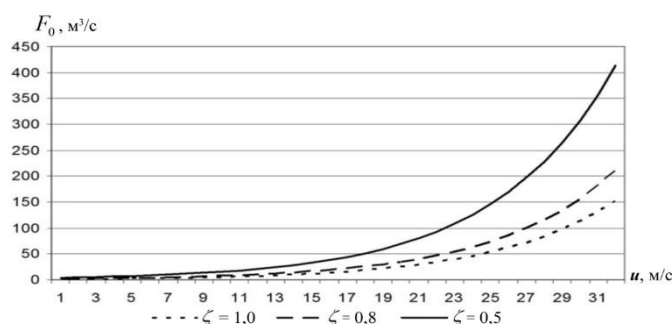


Рис. 2. Влияние влажности почвенного покрова на степень эрозионного разрушения

Анализ графиков, представленных на рис. 1 и 2, показывает, что объем уноса частиц в атмосферу экспоненциально снижается с ростом влажности почвы. При приближении влагосодержания к единичному значению интенсивность выноса загрязняющих частиц стремится к нулю, что свидетельствует о практически полном подавлении эрозионных процессов во влажной среде.

Анализ графика на рис. 3 показывает, что влияние значения почвенной константы на интенсивность эрозионных процессов в целом не является существенным. При умеренных значениях скорости ветра зависимости практически совпадают. Однако при увеличении горизонтальной составляющей скорости воздушного потока наблюдается расхождение кривых, что указывает на возрастающее влияние почвенной константы в условиях интенсивного аэродинамического воздействия.

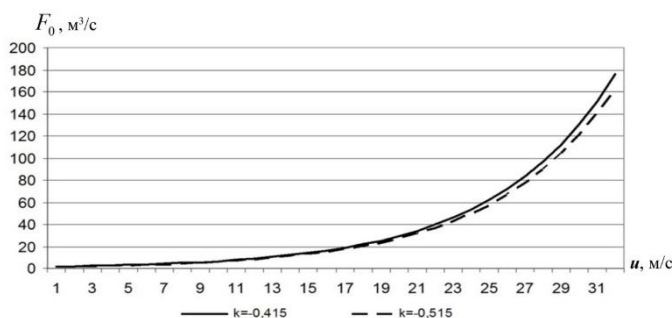


Рис. 3. Влияние значения почвенной константы на интенсивность эрозионных процессов

Из рис. 4 следует, что скорость ветра у поверхности земли оказывает существенное влияние на объем уноса аэрозольных частиц. С ростом скорости воздушного потока объем выброса возрастает по экспоненциальной зависимости, что указывает на высокую чувствительность процесса аэрозольного переноса к динамическим характеристикам приземного слоя атмосферы. Следовательно, ветер

не только транспортирует загрязняющие вещества, поступающие из промышленных и иных антропогенных источников, но и способствует высвобождению и дополнительному поступлению вредных компонентов из самой подстилающей поверхности.

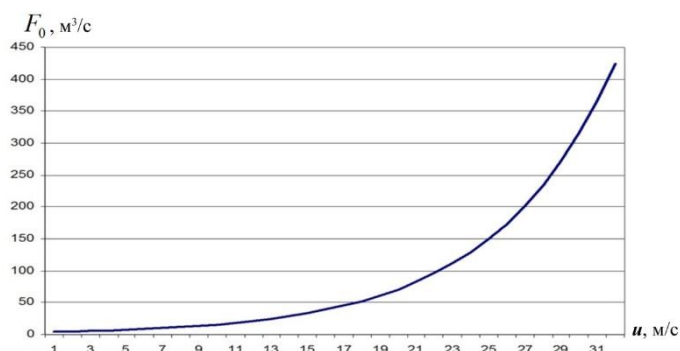


Рис. 4. Влияние скорости ветра у поверхности земли на объем выброса мелкодисперсных аэрозольных частиц в атмосферу

Анализ рис. 5 показывает, что вертикальное распределение скорости ветра прямо зависит от величины динамической скорости трения. С её увеличением наблюдается пропорциональный рост скорости ветра в приземном слое. Однако, начиная с определённой высоты, дальнейшее увеличение скорости трения перестаёт оказывать влияние, и вертикальный профиль скорости стабилизируется, достигая практически постоянного значения.

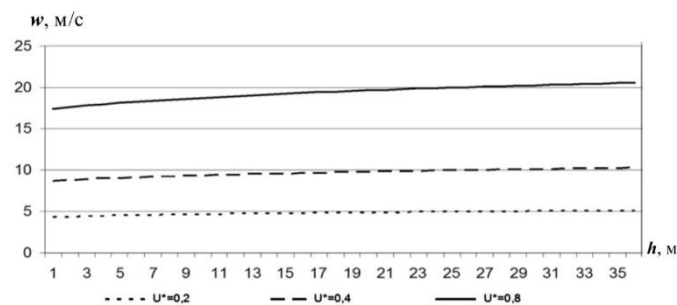


Рис. 5. Влияние скорости трения на вертикальное изменение скорости воздушного потока

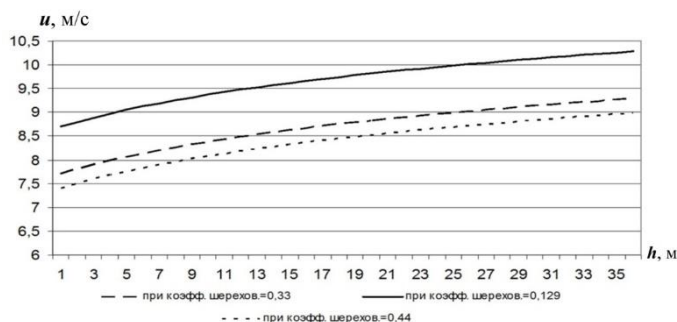


Рис. 6. Влияние коэффициента шероховатости подстилающей поверхности на горизонтальную скорость ветра в различных слоях атмосферы

Согласно данным, представленным на рис. 6, с увеличением коэффициента аэродинамической шероховатости поверхности наблюдается пропорциональное снижение горизонтальной составляющей скорости ветра. Этот эффект наиболее выражен при изменениях коэффициента в диапазоне малых значений (менее 0,1 м). При дальнейшем росте коэффициента шероховатости усиливается турбулентный обмен, и зона влияния шероховатости распространяется на большую высоту, приводя к более выраженному торможению воздушного потока в нижних слоях атмосферы.

Представленные выше результаты (рис. 1–6) наглядно демонстрируют, что интенсивность эрозионных процессов, вызванных ветровой активностью, существенно варьируется в зависимости от влажности почвы, скорости ветра, коэффициента шероховатости и других физико-механических

параметров подстилающей поверхности. Систематическое исследование этих параметров позволило определить доминирующую роль влажности и скорости ветра в формировании загрязнения атмосферы, подчеркивая высокую чувствительность атмосферного переноса к метеорологическим условиям и характеристикам поверхности.

Переходя к временному аспекту рассмотренных процессов, важно отметить, что аэрозольные выбросы и их концентрация в атмосфере зависят не только от стационарных условий среды, но и от изменяющихся во времени метеоусловий, в первую очередь, скорости воздушного потока. На рис. 7 представлена временная изменчивость интенсивности ветрового потока, отражающая влияние сложной геометрии орографических структур, таких как рельеф местности, здания и иные сооружения. Видно, что структурные особенности местности приводят к возникновению значительных колебаний скорости воздушных масс, что требует их обязательного учёта в моделировании процессов распространения загрязнений.

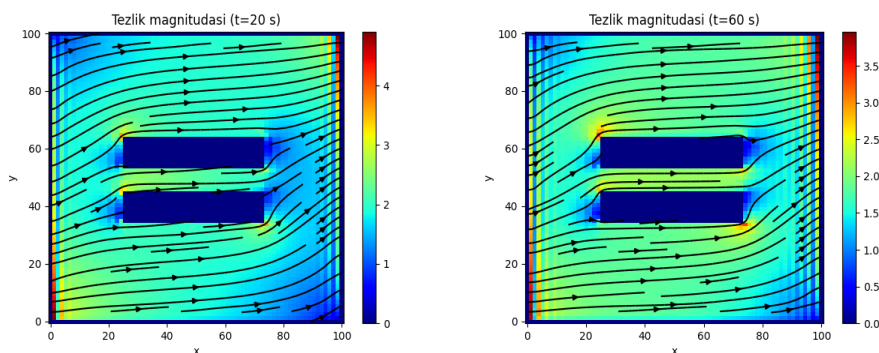


Рис. 7. Изменения интенсивности воздушного потока во времени с учетом сложной геометрии местности

Из графика рис.8 видно, что концентрация загрязняющих веществ тесно связана не только со скоростью воздушного потока, но и с геометрическими характеристиками местности. Сложная геометрия влияет на турбулентность и устойчивость воздушного потока, усиливая локальные зоны накопления и переноса загрязнителей, особенно вблизи препятствий и зон резких перепадов рельефа.

Таким образом, численное моделирование, проведенное в настоящем исследовании, подчеркивает необходимость учета временных колебаний ветровых потоков при прогнозировании концентраций загрязнителей, особенно в регионах с активной ветровой эрозией.

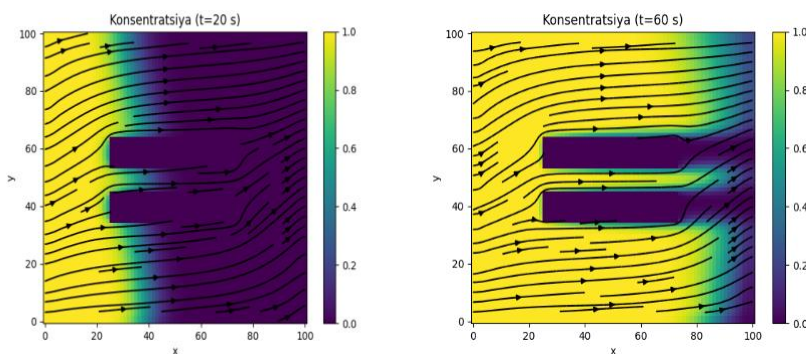


Рис. 8. Изменение концентрации вредных веществ с учетом скорости ветра и влияния сложной геометрии поверхности на процессы эрозии почвы

Полученные результаты подчёркивают необходимость учёта не только метеорологических факторов, таких как скорость ветра и влажность почвы, но и существенного влияния сложной геометрии местности на процессы ветровой эрозии и распространения загрязняющих веществ. Сложная геометрия приводит к неоднородному распределению ветровых потоков, возникновению зон повышенной турбулентности и соответственно, локальных участков с повышенной концентрацией загрязнителей.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что ветровая эрозия и связанный с ней выброс аэрозольных частиц в атмосферу зависят от совокупного воздействия множества факторов, среди которых особенно выделяются скорость и структура воздушных потоков, влажность почвы, орография местности, сложная геометрия объектов и физико-механические свойства подстилающей поверхности.

Разработанная математическая модель, основанная на интеграции уравнений движения и переноса вещества, позволяет количественно оценивать объем и пространственно-временное распределение загрязняющих компонентов в приземном слое атмосферы, учитывая влияние как естественных, так и антропогенных факторов. Численное моделирование продемонстрировало, что увеличение влажности почвы существенно подавляет эрозионные процессы, тогда как повышение скорости ветра экспоненциально увеличивает интенсивность выброса частиц. Также была выявлена значительная роль коэффициента аэродинамической шероховатости и структуры почвы в формировании зон загрязнения. Дополнительно установлено, что даже в отсутствие прямых источников загрязнения поверхность почвы может служить активным вторичным источником вредных веществ, вовлекаемых в атмосферу под воздействием ветровой нагрузки. Важным результатом стало установление значимого влияния сложной геометрии местности и наличия препятствий (зданий, рельефа) на формирование неоднородностей в распределении концентрации загрязняющих веществ и возникновение зон повышенной турбулентности.

Таким образом, перенос вредных веществ с поверхности земли необходимо рассматривать не просто как механический процесс перемещения частиц, но и как активный источник атмосферного загрязнения, который существенно модифицируется особенностями местной геометрии. Полученные результаты подчёркивают необходимость комплексного подхода к моделированию и прогнозированию загрязнения воздуха, включающего детальное изучение динамических характеристик воздушного потока, свойств подстилающей поверхности и особенностей сложной геометрии окружающей среды. Предложенная модель представляет собой эффективный инструмент для оценки экологических рисков и разработки стратегий защиты атмосферного воздуха в условиях усиливающегося климатического и антропогенного воздействия, особенно в регионах с выраженной эрозионной активностью и засушливым климатом.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Гартман, В.И.* (1938). Воздействие ветра на эрозию почвы. М., Издательство АН СССР.
- [2] *Циплиев, В.А.* (1981). Орографическое воздействие на процессы эрозии в засушливых районах. Издательство МГУ.
- [3] *Сидоров, В.П.* (1993). Метеорологические и орографические факторы в процессах эрозии почвы. Вестник географических наук, 3, 45-52.
- [4] *Шарипов, А.Ш.* (2010). Экологические последствия эрозии в Аральском регионе. Окружающая среда и здоровье, 4(2), 15-22.
- [5] *Барсегян, В.К.* (2013). Солончаки и пылевая эрозия в Аральском регионе. Экологическая безопасность, 6, 75-85.
- [6] *Смирнов, С.И., Лебедев, В.М.* (2016). Глобальные источники загрязнения атмосферы аэрозолями. Вестник международной экологии, 4(1), 19-27.
- [7] *Баранов, А.Н.* (2018). Современные методы моделирования аэрозольных частиц в атмосфере. Экологический мониторинг, 12, 142-155.
- [8] *Коробов, Д.П.* (2014). Математическое моделирование процессов эрозии и распространения аэрозолей. Математическое моделирование, 7(2), 89-98.
- [9] *Goudie, A.S.* (2014). Dust storms: health impacts and the environment. *Atmospheric Environment*, 92, 22-30.
- [10] *Prospero, J.M., et al.* (2002). The impact of mineral dust on the atmospheric environment in the Americas. *Atmospheric Environment*, 36(3), 417-429.
- [11] *Boroughani, S.H., et al.* (2022). Dust emissions from the Great Salt Desert, Iran: The role of soil texture and wind speed. *Journal of Arid Environments*, 189, 104510.
- [12] *Katra, I.* (2020). The impact of agriculture on dust emission in arid and semi-arid regions. *Environmental Geology*, 59(8), 1441-1452.
- [13] *Panagos, P., et al.* (2021). A global review of soil erosion models and their application to dust emission studies. *Science of the Total Environment*, 775, 145283.

- [14] Zender, C.S., et al. (2003). A new model for dust entrainment and deposition (DEAD): Application to dust storm prediction and climate modeling. *Journal of Geophysical Research*, 108(D1), 4011.
- [15] Shao, Y. (2008). *Physics and Modelling of Wind Erosion*. Springer, Berlin.
- [16] Wang, T., et al. (2023). Numerical modeling of dust emissions and transport: Impacts of meteorological conditions. *Environmental Modelling & Software*, 157, 105569.
- [17] Raza, M., et al. (2023). GIS-based dust emission modeling in semi-arid regions: A case study using remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 267, 112691.
- [18] Ravshanov N., Tashtemirova N.N., Ubaidullaev M.Sh.. Direct and connected problem of transport of harmful substances in the atmosphere, taken into account of the absorption and capture of particles by vegetation in the ground layer. // *Bulletin of TUIT: Management and Communication Technologies* 2(14)2024.
- [19] Хамдамов П.Х., Равшианов З.Н., Таштемирова Н.Н. Моделирование и исследование основных параметров в процессе распространения соле-пылевых частиц в атмосфере // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. – 2020. – №2(26). – С. 78-98.
- [20] Ravshanov, N., Tashtemirova, N., Ubaydullaev, Study of the influence of the deposition rate of dust and fine aerosol particles for monitoring and forecasting the state of the surface layer of the atmosphere in industrial regions // *IJRSS Vol. 8 No. 2 (2025)*
- [21] Ravshanov, N., Tashtemirova, N., Alimov, U., Ubaydullaev, M. Modelling the Spatial Distribution of Industrial Facilities and Green Areas to Reduce the Ecological Footprint // *E3S Web of Conferences-This link is disabled.*, 2024, 574, 04002
- [22] Таштемирова Н.Н. Математическая модель и численный алгоритм для исследования процесса распространения пылевых и мелкодисперсных аэрозольных частиц в атмосфере // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. – 2025. – № 1(63). – С. 56-75.
- [23] Мирзажанов К.М. Ветровая эрозия орошаемых почв Узбекистана и борьба с ней. – Ташкент: Фан, 1973. – 234 с.

Поступила в редакцию 19.06.2025

Цитирование: Равшианов Н., Таштемирова Н.Н., Камолитдинова Ф.К. (2025). Моделирование нелинейного переноса загрязняющих веществ в атмосфере с учетом эрозии почвы. *Международный журнал теоретических и прикладных вопросов цифровых технологий*, 8(4), –С. 7-21. <https://doi.org/10.62132/ijdt.v8i4.298>.

MODELING NONLINEAR TRANSPORT OF POLLUTANTS IN THE ATMOSPHERE CONSIDERING SOIL EROSION

+ Ravshanov N.¹, Tashtemirova N.N.¹, Kamoliddinova F.K.²

¹ Digital Technologies and Artificial Intelligence Development Research Institute, Tashkent, Uzbekistan

² UZINFOCOM – Single integrator for the creation and support of state information systems, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. This study introduces a nonlinear mathematical model and a numerical algorithm for simulating the emission and transport of aerosol and dust particles generated by wind erosion of soil in complex orographic terrain. The model accounts for meteorological parameters, physicochemical properties of particles, soil moisture, and surface roughness. The numerical implementation employs a finite-difference method on a structured grid with the integration of the Navier-Stokes equations and the pollutant transport equation. A series of numerical experiments was conducted to investigate the influence of wind, soil moisture, and other environmental factors on the intensity of erosion processes and atmospheric pollution. The results demonstrate the strong sensitivity of particle emission to near-surface meteorological conditions and landscape geometry, underscoring the importance of a comprehensive approach to forecasting environmental risks in arid and semi-arid regions.

Keywords: wind erosion, aerosol, mathematical modeling, Navier-Stokes equations, meteorological conditions, orography, air pollution, numerical methods.