МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА И ДИФФУЗИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРЕ С УЧЕТОМ ЭРОЗИИ ПОЧВЫ

Н. Равшанов[1], *д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией*
Д.А. Каршиев[2], *доцент, заведующий кафедрой*
Б.Э. Юлдашев[1,2], *доцент*
[1]**Научно-инновационный центр информационно-коммуникационных технологий при Ташкентском университете информационных технологий**
[2]**Ташкентский педиатрический медицинский институт**
(Узбекистан, г. Ташкент)

Аннотация. *В работе рассматривается решение актуальной задачи по прогнозированию экологического состояния окружающей среды, на примере Приаральского региона, где за счет эрозии почвы осушенной части Аральского моря в атмосферу выбрасывается большое количество соли и мелкодисперсных вредных частиц. Приведены математическая модель, ее информационное обеспечение и результаты проведенных вычислительных экспериментов на ЭВМ. Разработанная модель, предназначена для исследования, мониторинга и прогнозирования процесса распространения загрязняющих веществ в атмосфере, и описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и краевыми условиями. Указаны основные параметры, которые играют существенную роль в процессе переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере: скорость ветра и его направления; рельеф местности; объем выброса солевых частиц в атмосферу, который зависит от скорости ветра и влажности почвы и т.д. На основе анализа проведенных численных экспериментов сформулированы выводы, служащие основанием для принятия управленческих решения по данной проблеме.*

Ключевые слова: *математическая модель, численный эксперимент, экология, эрозия почвы, вредные вещества, скорость ветра, мониторинг, прогнозирование.*

Введение

Растительный покров на поверхности земли, объекты производства, гражданская застройка, рельеф местности и прочие орографические элементы существенным образом влияют на изменение направления и скорости ветра, приводят к турбулентному перемещению ветра в пограничном слое атмосферы. В зависимости от указанных объектов, толщина действия турбулентного перемещения может достигать сотен метров. Зачастую турбулентное перемещение воздушной массы влечет эрозию почвы с выносом мелкодисперсных частиц в атмосферу. Из данного обстоятельства следует, что помимо стационарных и нестационарных источников вредных веществ в атмосфере, поверхность земли, при определенных условиях, также является генератором выброса вредных частиц.

Исследование рассеивания примесей в атмосфере стало одной из актуальных задач в проблеме охраны окружающей природной среды. Решение этой задачи связано с учетом многих факторов, влияющих на рассеивание примесей в атмосфере. К ним относятся метеорологические условия, тип источника, свойства примесей и т.д.

Значительный интерес представляет также изучение выноса в атмосферу и рассеивание легких и тяжёлых (имеющих собственную скорость осаждения) частиц естественного и промышленного происхождения. Существует множество источников загрязнения такого рода, в том числе, породные отвалы, промплощадки, осушенные части Аральского моря, солончаки Барса-кельмес, которые являются основным источником рассеивания примесей от наземных источников.

Проведенные исследования процесса миграции мелкодисперсных частиц от поверхности земли показали, что их количество, в основном, зависит от гори-

зонтальной составляющей скорости ветра над поверхностью земли, состава и физико-механических свойств почвы, а также ее влажности [1]. Эта все дает дополнительную нагрузку на санитарное состояние атмосферы рассматриваемого региона. Решение данной задачи в контексте мониторинга и прогнозирования экологического состояния промышленных регионов является актуальной проблемой.

Нужно подчеркнуть, что развитие информационных технологий дало импульс для проведения комплексных исследований экологически значимых задач с привлечением конструктивных методов математического моделирования и вычислительного эксперимента на ЭВМ с целью принятия управленческих решений.

В настоящее время имеется огромное количество работ по моделированию процессов переноса и диффузии мелкодисперсных частиц.

Подробный анализ этих работ показал, что основными источниками выброса вредных веществ в окружающую среду авторами рассматриваются стационарные и нестационарные объекты: заводы, фабрики по производства сырья и продуктов питания, горноперерабатывающие предприятия, нефте- и газоперерабатывающие объекты, транспортные системы и т.д. Между тем, анализ состояния атмосферы мегаполисов и промышленных регионов показывает, что дополнительным источником загрязнения регионов является подстилающая поверхность земли, где со временем скапливается большое количество выпавших вредных частиц. Поверхность земли, покрытая осевшими вредными частицами, при определенных изменениях погодно-климатических факторов становится источником вредных веществ в атмосферу.

Примером подобного источника выброса вредных веществ в атмосферу для Средней Азии служит осушенная часть Аральского моря, где за счет эрозии почвы в атмосферу выбрасывается большое количество соли и других аэрозольные частиц.

Для решения задач мониторинга и прогнозирования экологического состояния регионов и принятия управленческих решений разработано математическое и программное обеспечение, в котором при моделировании объекта исследования учитываются погодно-климатические условия, эрозия почвы, физико-механические свойства аэрозольные частицы и другие факторы.

Постановка задачи

Для прогноза распространения аэрозолей в окружающей среде, нахождения количества аэрозолей в рассматриваемой области D и количества выпавших аэрозолей на подстилающую поверхность, воспользуемся математической моделью [22, 24-27]:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}+u\cdot\frac{\partial\theta}{\partial x}+v\cdot\frac{\partial\theta}{\partial y}+\left(w-w_g\right)\cdot\frac{\partial\theta}{\partial z}+\sigma\cdot\theta=\mu\cdot\Delta\theta+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\cdot\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)+Q\cdot\delta\left(x,y,z\right); \quad (1)$$

$$\theta\left(x,y,z,0\right)=\overset{0}{\theta}\left(x,y,z\right); \quad (2)$$

$$\mu\cdot\left.\frac{\partial\theta}{\partial x}\right|_{x=0}=\left(\theta-\theta_a\right);\ \mu\cdot\left.\frac{\partial\theta}{\partial x}\right|_{x=L_x}=\left(\theta-\theta_a\right); \quad (3)$$

$$\mu\cdot\left.\frac{\partial\theta}{\partial y}\right|_{y=0}=\left(\theta-\theta_a\right);\ \mu\cdot\left.\frac{\partial\theta}{\partial y}\right|_{y=L_y}=\left(\theta-\theta_a\right); \quad (4)$$

$$k\cdot\frac{\partial\theta}{\partial z}=\beta\cdot\theta-F_0 \text{ при } z=0; \quad (5)$$

$$k\cdot\frac{\partial\theta}{\partial z}=0 \text{ при } z=H. \quad (6)$$

Здесь $\theta(x,y,z)$ – концентрация примеси; Q – мощность стационарного источника выброса вредных веществ в атмосферу; u,v,w – составляющие скорости ветра; k – коэффициент турбулентности; w_g – скорость осаждения; μ – горизонтальный коэффициент турбулентности; σ – коэффициент поглощения; β – коэффициент взаимодействия с подстилающей поверхностью. При $H=0$ имеем приподнятый источник на уровне $z=H$ $(F_0=0)$. При наземных источниках $F_0\neq 0$ $(Q=0)$.

Задачу (1)-(6) рассмотрим в области $D=(0<x<a,\ 0<y<b,\ 0<z<H)$, когда источник расположен в приземном слое (рис. 1). На рис. 1 «крестиками» обозначены надземные источники загрязнения атмосферы.

Величина F_0 является функцией от x,y,z,t и должна определяться по экспериментальным данным в зависимости от метеорологических условий, свойств подстилающей поверхности, размера и плотности пылевых частиц. В силу линейности дифференциального уравнения (1) мощности источников могут быть нормированы таким образом, чтобы максимальному значению F_0 соответствовала единица. Тогда, умножая на нормирующий множитель, получим искомые значения концентраций примесей. Соответственно коэффициент турбулентности также зависит от метеорологических условий.

Рассмотрим для определения k следующие модели:

1. $k=const,\ u,v,w$ - $const$;

2. $$k=\begin{cases} \nu+k_1\cdot\dfrac{z}{z_1}, & z\le h,\\ \nu+k_1\cdot\dfrac{h}{z_1}, & z>h, \end{cases} \qquad \nu=|v|\cdot z^n;$$

3. $k=k(z),\ \nu=\nu(z),\ w=w(z)$,

где h – высота приземного слоя, ν – турбулентная вязкость.

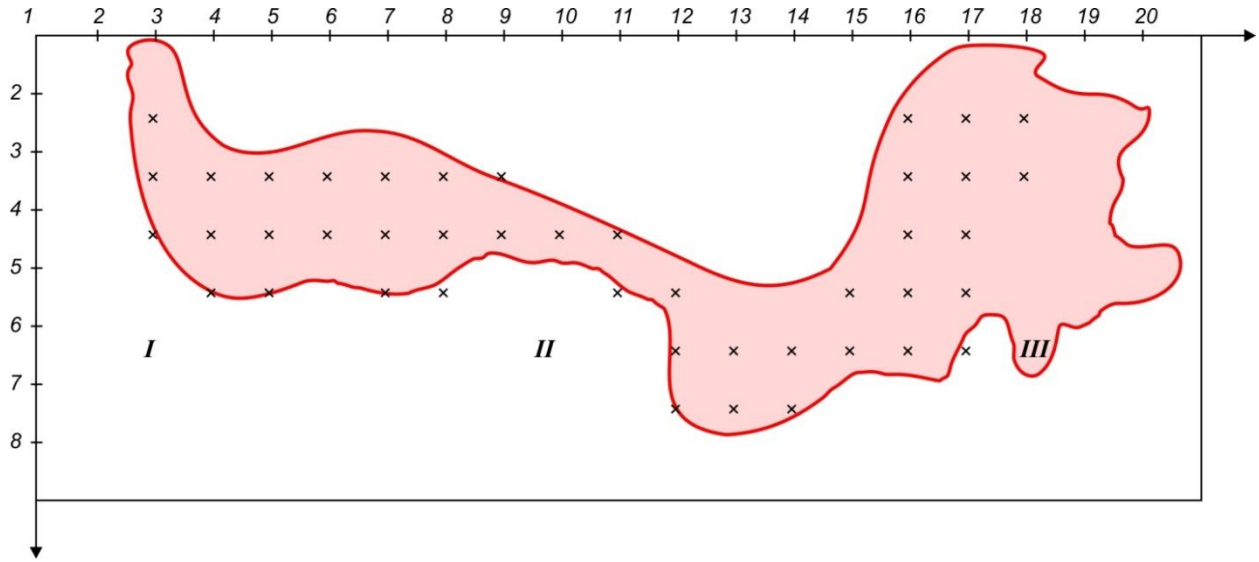

Рис. 1. Расположение источников на наземном слое в осушенной части Приаралья

Статическая обработка данных по влиянию различных погодно-климатические условий на унос частиц с поверхности земли показывает, что основным фактором, вызывающим эрозию почвы, является величина скорости набегающего потока, а главным фактором – влажность почвы. Остальные параметры хотя и играют определенную роль в развитии или предотвращении эрозии, но их влияние носит неоднозначных характер. Поэтому, при математическом моделировании процесса распространения вредных частиц и изменения их концентрации со временем, необходимо учитывать эти параметры, а

физико-химические свойства почвы можно считать постоянными, входящими в расчетную формулу.

Скорость ветра и влажность почвы по-разному влияют на процесс распространения вредных частиц в атмосфере и развитие эрозии почвы. Если увеличение скорости набегающего потока ветра усиливает процесс эрозии, то повышение влажности почвы подавляет его.

Как было рассмотрено в [1] общую зависимость можно записать в виде:

$$F_0 = f(u, w). \tag{7}$$

Здесь F_0 – объемный расход уносимых частиц атмосферным фронтом, $м^3/с$.

Для определения вида функции (7) переходим к анализу действующих сил, обуславливающих разрушение почвы и сопротивляющихся этому разрушению. Разрушающие силы обозначим через F. Им всегда противостоят силы сопротивления R, в состав которых входят влажность и другие физико-механические свойства почвы.

При превышении силы F над силой R начинается процесс эрозии почвы и уноса вредных частиц с поверхности земли. Сила разрушения F в основном определяется величиной касательного напряжения набегающего потока воздуха. При этом, чем больше твердых частиц в потоке, тем больше суммарное касательное напряжение разрушающее почву. Для получения теоретической зависимости будем рассматривать равновесный процесс. При динамическом равновесии разность сил F и R должна равняться нулю, т.е.

$$F - R = 0. \tag{8}$$

Составим выражение для этих сил. Связь между объемным расходом F_0 уносимых частиц и скоростью потока можно выразить в виде:

$$F = \frac{\partial F_0}{\partial u} \cdot \chi, \tag{9}$$

где χ - касательное напряжение, $кГ/м^2$.

Для силы сопротивления R, по аналогии с F возьмем выражение

$$R = c_0 \frac{\mu_c}{l} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta}, \tag{10}$$

где μ_c – вязкость смеси (воздух + почва), $кГ*с/м^2$; l – расстояние между отдельными частицами, м; c_0 - константа почвы.

Подставляя (9) и (10) в (8) имеем

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} \chi - c_0 \frac{\mu_c}{l} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0 \tag{11}$$

или

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} - c_0 \frac{\mu_c}{l\chi} \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0. \tag{12}$$

Рассмотрим отдельно взятое выражение $c_0\mu / (l\chi)$ в уравнении (12).

Если приближенно считать, что касательное напряжение определяется значением внешней скорости u_∞, т.е. $\chi = u_\infty$, то это выражение в уравнение (12) можно представить в виде

$$c_0\mu_c / (l\chi) = c_0\mu_c / (lu_\infty). \tag{13}$$

В полученном выражении переменной величиной остается динамическая вязкость смеси μ_c, которая, кроме физико-механических свойств почвы, в основном, определяется влажностью почвы, обеспечивающей увеличение сил сцепления между отдельными частицами.

На основании этого выражения (13) можем полагать зависящим от некоторой функции влажности, т.е.

$$c_0\mu_c / (lu_\infty) \cong c_0' f(\zeta). \tag{14}$$

В дальнейшем функцию $f(\zeta)$ заменим простой зависимостью

$$f(\zeta) \cong c_0 c_0' \zeta. \quad (15)$$

Окончательно зависимость (14) примем в виде

$$c_0 \mu_0 / (l u_\infty) \cong c_0 f(\zeta) \cong c_0 c_0' \zeta = k_p w, \quad (16)$$

где k_p – константа почвы, с/м.

Возвращаясь к выражению (12), будем иметь

$$\frac{\partial F_0}{\partial u} - k_p \zeta \frac{\partial F_0}{\partial \zeta} = 0. \quad (17)$$

Итак, получено уравнение для определения объема уносимых частиц с поверхности земли в зависимости от скорости ветра и влажности почвы. По результатам вычисленного значения F_0 – объемного расхода уносимых атмосферным фронтом частиц, можно решать задачу по процессу переноса и диффузии вредных веществ в атмосфере с помощью граничного условия (5).

Метод решения задачи

Таким образом, для рассматриваемой задачи имеем дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка для определения объемного расхода уносимых атмосферным фронтом частиц. Интегрирование этого уравнения дает две произвольные постоянные (C_1, C_2). С учетом константы почвы «k_p», мы должны определить три постоянные C_1, C_2, k_p. Поэтому граничные условия должны быть заданы для трех значений F_0. Чтобы использовать меньше аргументов, принимаем следующие граничные условия:

$$\left.\begin{aligned} F_0 = F_{01}: \quad \zeta = \zeta_1, \quad u = u_1; \\ F_0 = F_{02}: \quad \zeta = \zeta_2, \quad u = u_2; \\ F_0 = F_{03}: \quad \zeta = \zeta_3, \quad u = u_3. \end{aligned}\right\} \quad (18)$$

Решение (17) получено в виде

$$F_0 = c_1 \zeta^{c_2/k_p} e^{c_2 u}. \quad (19)$$

Причем, k_p – отрицательная величина. Постоянные имеют следующие размерности

$$[c_1] = м^3 \cdot c^{-1}, [c_2] = c \cdot м^{-1}, [k_p] = c \cdot м^{-1}.$$

Формула (19) справедлива для случая $u > 0$. Согласно граничным условиям получены следующие выражения для постоянных:

$$c_2 = \ln(F_{01} / F_2) / (u_1 - u_2), \quad (20)$$

$$k_p = c_2 \ln(\zeta_1 / \zeta_2) / \ln(F_{02} / F_{03}), \quad (21)$$

$$c_1 = \theta_1 w^{-c_2/k_p} e^{-c_2 u}. \quad (22)$$

Для сравнения теоретически полученной зависимости (19) с экспериментами были вычислены коэффициенты C_1, C_2, k_p для конкретного типа почвы, по данным К. Мирзажанова [3].

Например, для лугово-аллювиальной почвы, было получено:

$C_1 = 1,29;\ C_2 = 0,745;\ k_p = -0,515.$

Вычисленные значения уноса F_0 отличаются от экспериментальных в пределах 10-15%, что объясняется погрешностями эксперимента. Таким образом, на основании формул (20)-(22) по данным экспериментов можно вычислить значения C_1, C_2, k_p для различных типов почвы. Так как опыты К. Мирзажанова [3] были проведены в области ламинарного пограничного слоя аэродинамической трубы (в начальном участке), то вычисленные коэффициенты при подстановке в формулу (19) дают значения F_0 только для уноса в пределах ламинарного пограничного слоя. Для использования формулы (19) в области турбулентного пограничного слоя следует проводить опыты в аэродинамической трубе в области турбулентного пограничного слоя и отсюда определять

константы C_1, C_2, k_p. Для этого каретка с образцом почвы должна находится на расстоянии не менее 0,8-1,0 м. от начала рабочего участка Изменение интенсивности уноса частиц F_0 в зависимости от скорости потока u при различной степени увлажнения почвы ζ .

Итак, на основе полученного решения задачи (17)-(18) можно вычислить количество выброса мелкодисперсных частиц в атмосферу в зависимости от составляющей скорости ветра на поверхности земли, влажности почвы, коэффициента шероховатости и других физико-механических параметров почвы (рис. 2-7).

Обсуждение результатов

Численные расчеты на ЭВМ были проведены при различных значениях влажности почвы (рис. 2-3). Как видно из рис. 2 и 3 – с ростом влажности почвы экспоненциально уменьшается объем выноса мелкодисперсных частиц в атмосферу. При стремлении влажности почвы к единице, уносимый объем частиц в атмосферу приравнивается нулю.

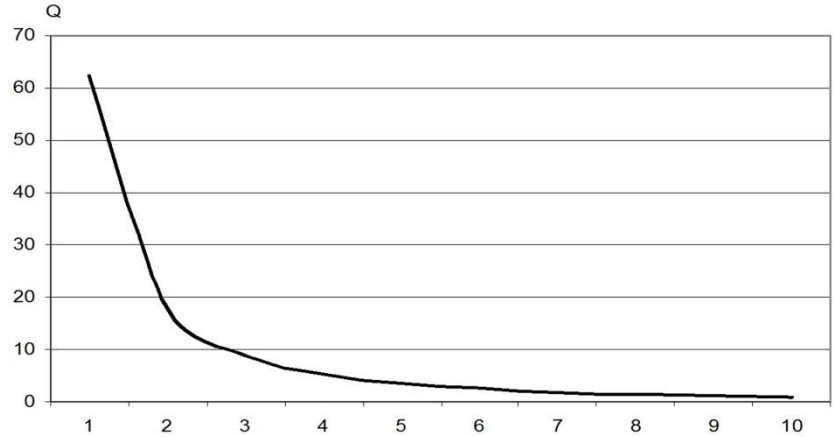

Рис. 2. Уменьшение уноса вредных частиц в атмосферу в зависимости от влажности почвы

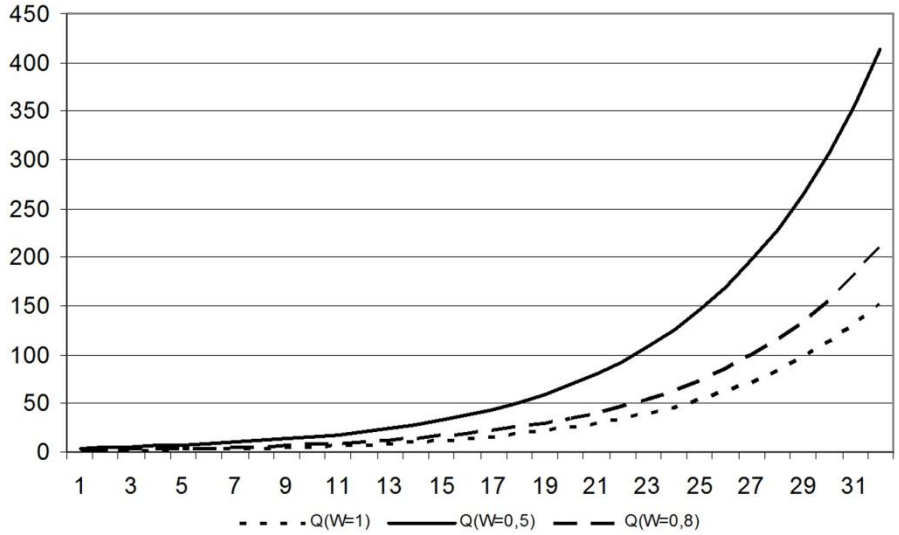

Рис. 3. Рост эрозии почвы при различных значениях влажности земной поверхности

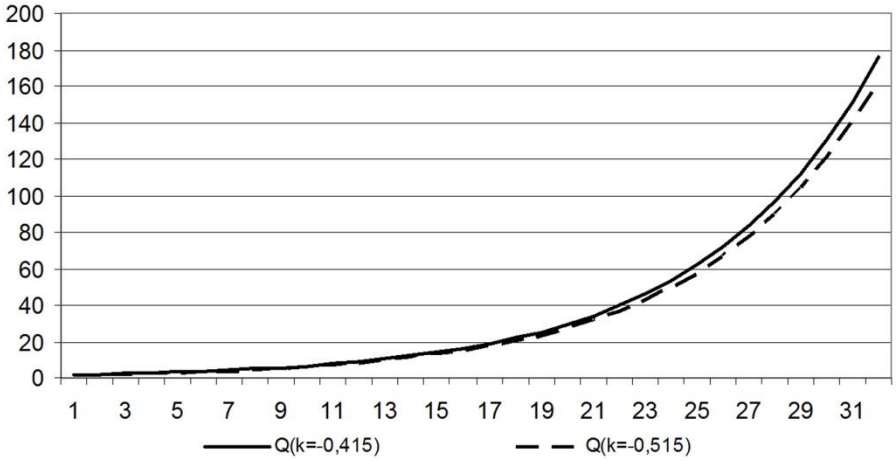

Рис. 4. Рост эрозии почвы при различных значениях константы почвы

Из кривых рис. 4 следует, что изменение значения константы почвы не приводит к существенному изменению эрозии. При умеренных изменениях скорости ветра они полностью совпадают, а с ростом горизонтальной составляющей скорости ветра они начинаются расходиться.

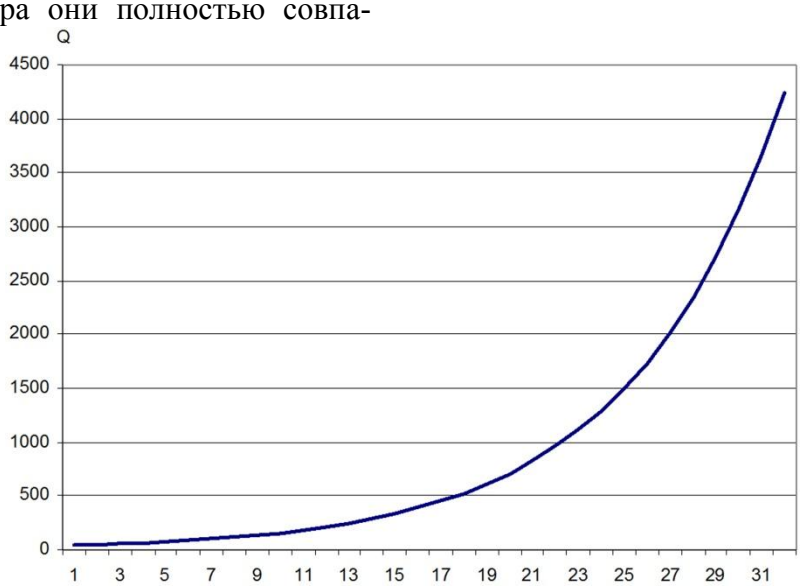

Рис. 5. Изменение объема уносимых в атмосферу мелкодисперсных аэрозольных частиц в зависимости от роста скорости ветра на поверхности земли

На рис. 5 приведены результаты проведенных численных расчетов, из которых следует, что на объем уносимых в атмосферу мелкодисперсных аэрозольных частиц существенно воздействует рост скорости ветра на поверхности земли. С ростом скорости ветра этот объем растет по экспоненциальному закону.

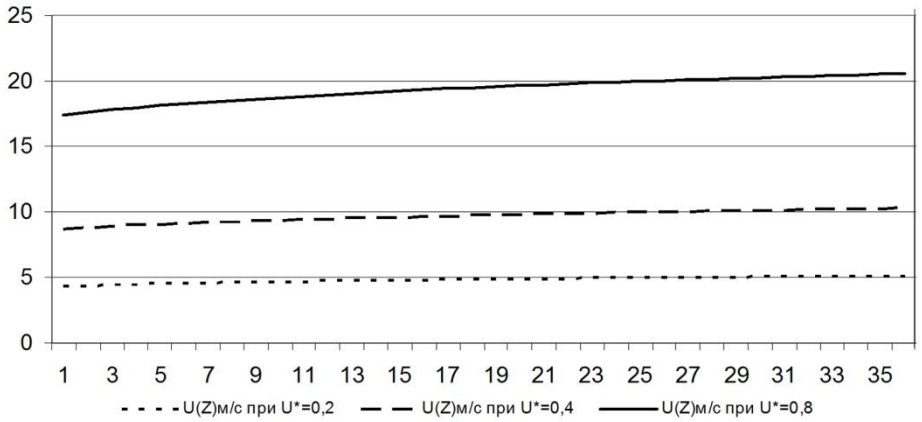

Рис. 6. Изменения скорости ветра по вертикали в зависимости от скорости трения

Из анализа проведенных численных расчетов видно, что скорость ветра по вертикали зависит от скорости динамического трения (рис. 6). С ростом скорости динамического трения пропорционально растет вертикальная скорость ветра на поверхности земли, а далее она остается неизменяемой по толщине слоя атмосферы.

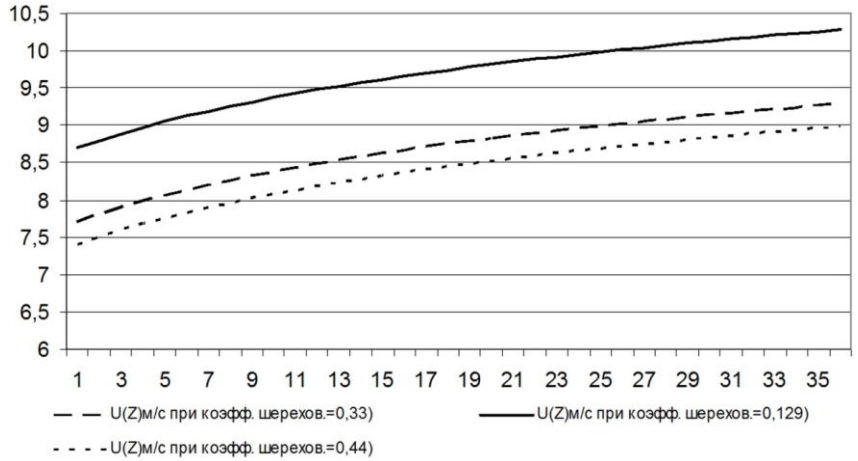

Рис. 7. Изменение горизонтальной скорости ветра в различных слоях атмосферы в зависимости от коэффициента шероховатости

Как видно из кривых рис. 7 с ростом коэффициента шероховатости земли, горизонтальная составляющая скорости ветра пропорционально уменьшается. Существенное воздействие этого коэффициента на скорость ветра по горизонтали заметно при изменении $0 < h < 10$ м., а при больших значениях коэффициента турбулентности область воздействия пропорционально нарастает по высоте.

Так как задача (1)-(6) описывается полным дифференциальным уравнением в частных производных с соответствующими краевыми и внутренними условиями, то выписать решение в явном аналитическом форме затруднительно. Для решения задачи разработан численный алгоритм, основанный на замене дифференциальных операторов на конечно-разностные отношения [2, 4-7].

Для мониторинга и прогнозирования концентрации вредных веществ в атмосфере в зависимости от выше перечисленных параметров, погодно-климатических факторов разработано программное средство, предназначенное для проведения вычислительных экспериментов (рис. 8-12).

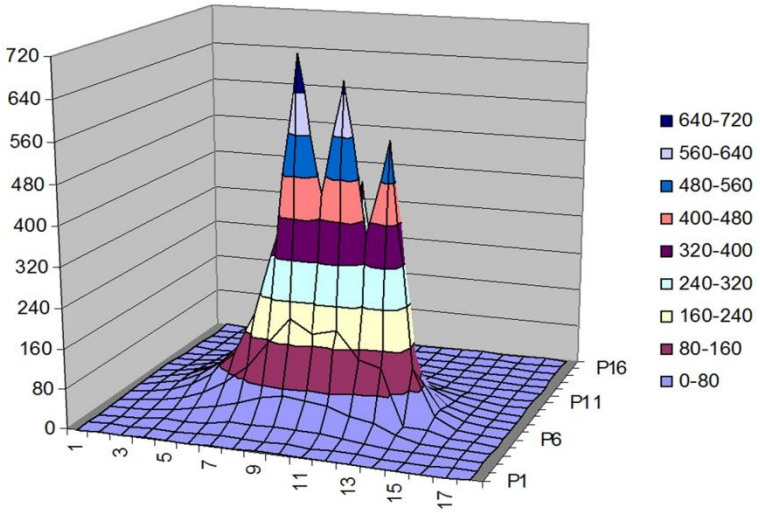

Рис. 8. Изменение концентрации вредных веществ в атмосфере при времени прогноза *t*=17,5 ч, *z*=300 м

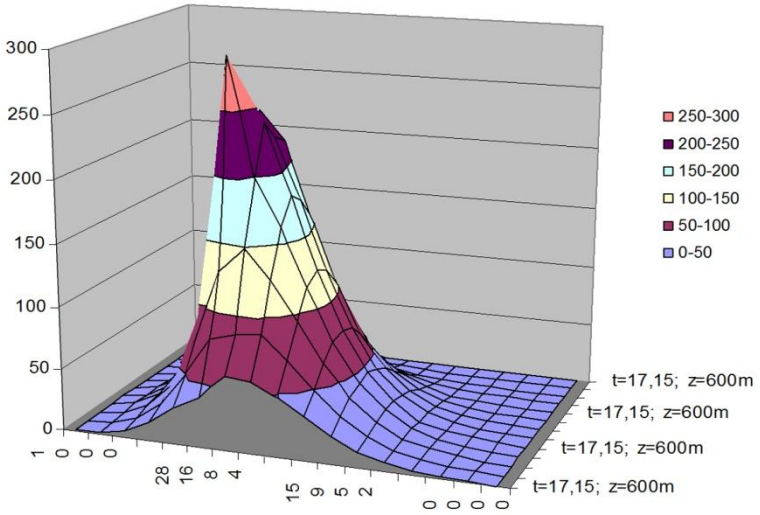

Рис. 9. Изменение концентрации вредных веществ в атмосфере при времени прогноза *t*=17,5 ч, *z*=600 м

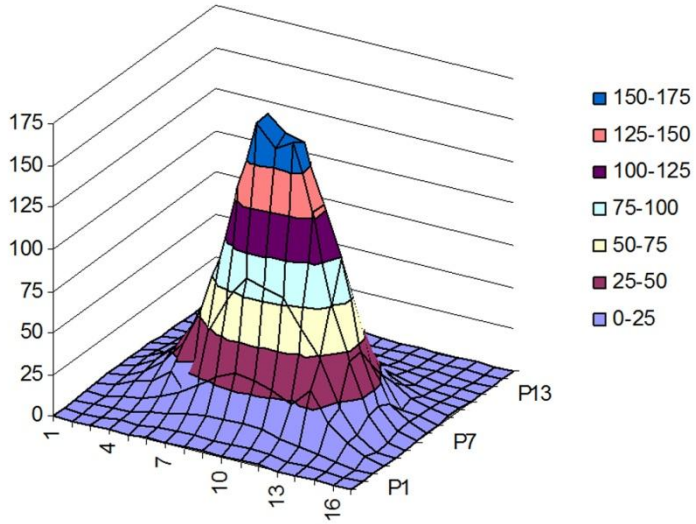

Рис. 10. Изменение концентрации вредных веществ в атмосфере при времени прогноза *t*=17,5 ч, *z*=1000 м

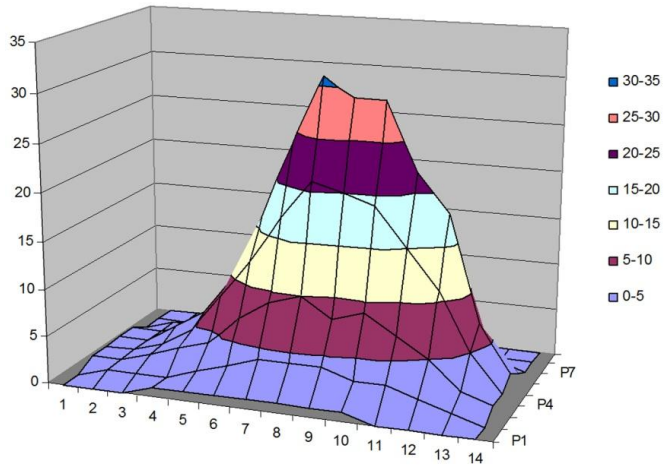

Рис. 11. Изменение концентрации вредных веществ в атмосфере при времени прогноза *t*=6,30 ч, *z*=1800 м

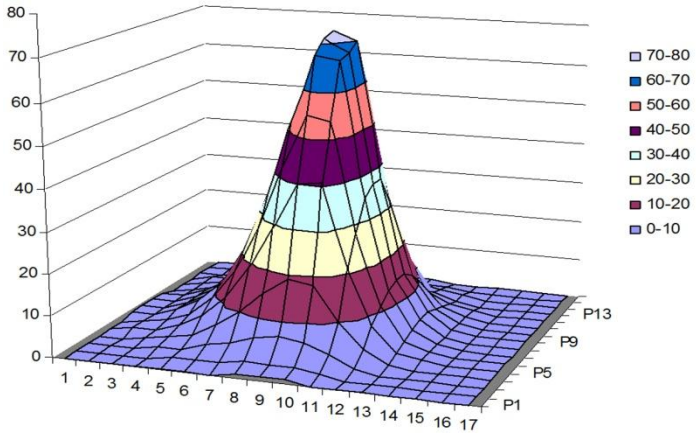

Рис. 12. Изменение концентрации вредных веществ в атмосфере при времени прогноза t=17,5 ч, z=1800 м

Численные эксперименты проводились при различных значениях коэффициента турбулентности, шероховатости земли, горизонтальной и вертикальной скоростей ветра, различных значениях влажности почвы и т.д.

При использовании модели 1 перенос осуществлялся равномерно во всех уровнях в зависимости от направления скорости ветра. А из теории пограничного слоя известно, что при неустойчивой стратификации значения $k(z)$ растет до уровня 200-400 м и быстро падает с высотой, стремясь к нулю на верхней границе пограничного слоя (высота пограничного слоя при неустойчивой стратификации достигает 1000-1600 м), а при устойчивой стратификации $k(z)$ растет незначительно в приземном слое и падает с высотой (высота пограничного слоя – 400-600 м). Поэтому считаем целесообразным воспользоваться моделью 3.

На рис. 13 и 14 приведены концентрации $\theta(x, y_{11}, z, t_{10})$ в момент временим $t = t_0$, где источник расположен в точке $A(x, y_{11}, z_1)$. Счеты проводились для области $D(0 < x, y > 22 * 4000 \text{ м},\ 0 < z < 1000 \text{ м})$ с шагом сетки $h_x = h_y = 4000$ м, L_z: 100, 200, 300, 400, 500 м, шаг по времени $\Delta t = 3600$ сек, при различных значениях коэффициента турбулентности $k(z)$ и скорости осаждения w_g. Численные расчеты (рис. 13-14) показывают, что перенос и диффузия осуществляются в зависимости от метеорологических условий, от свойств частиц и существенно зависят от распределения коэффициента турбулентности по вертикали.

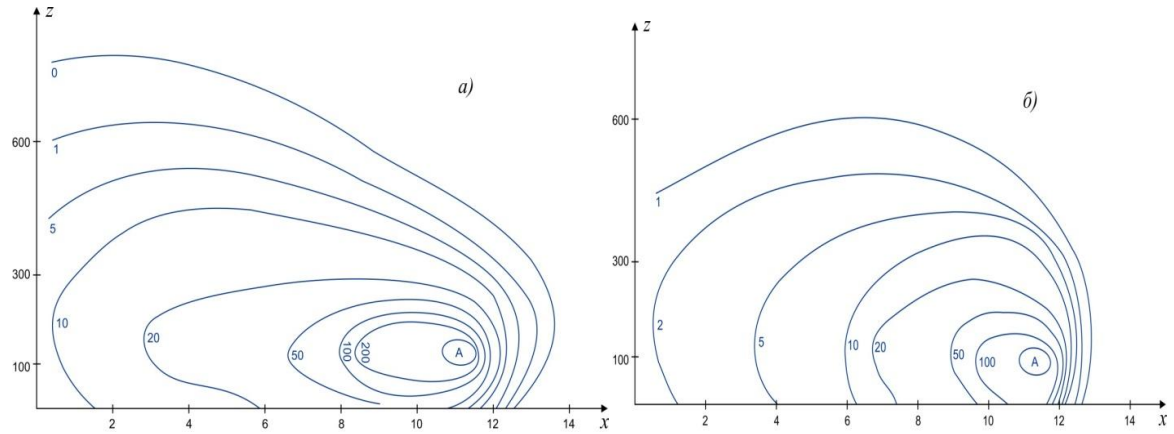

Рис. 13. Вертикальные профили $\theta\left(x, y_{11}, z, t_{10}\right)$: а) при $w_g = 0{,}06$ $k = k_2\left(z\right)$; б) при $w_g = 0{,}2$, $k = k_2\left(z\right)$

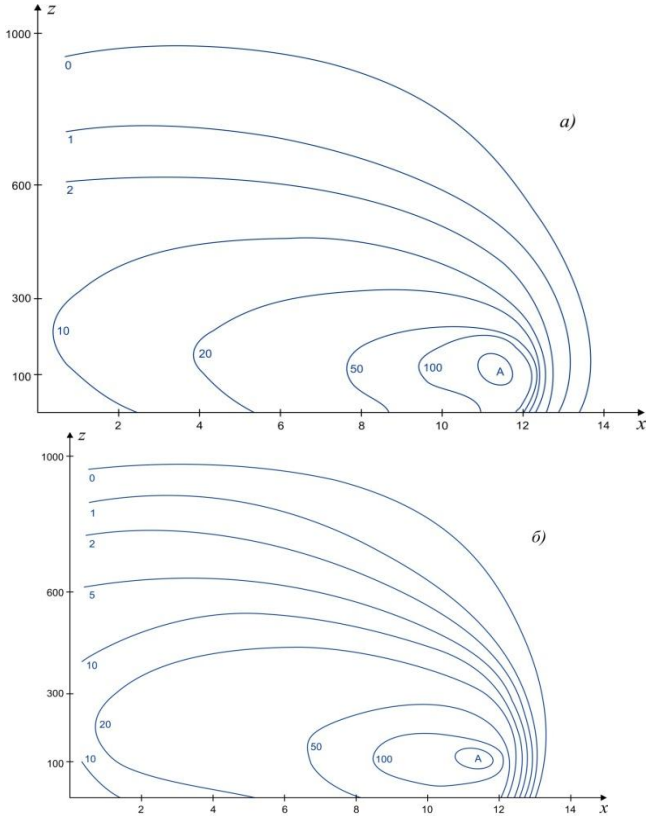

Рис. 14. Вертикальные профили $\theta\left(x, y_{11}, z, t_{10}\right)$:
а) при $w_g = 0{,}06$, $k = k_2\left(z\right)$; б) при $w_g = 0{,}003$, $k = k_2\left(z\right)$

Для прогноза распространения пыли и соли над осушенной частью Аральского моря воспользуемся моделью 3. Для $k\left(z\right)$ используется характерное значение при слабой неустойчивой стратификации, а для скорости ветра – степенной закон изменения. Область представляется как

$$D = \left(0 < x, y < 22 \times h_x,\ 0 < z < 1500 \text{ м},\ h_x = h_y = 1500 \text{ м}, h_z = 100, 200, 300, 400, 500 \text{ м}\right).$$

Площадные источники расположены в северо-восточной части (рис. 1) осушенной части южного Приаралья. За период времени $\left[0, t_5\right]$ ветер направлен на юг, $\left[t_5, t_{10}\right]$ на юго-запад, шаг по времени $\Delta t = 3600$ сек $\left(t_5 = 5 \times \Delta t, t_{10} = 10 \times \Delta t\right)$.

Итак, вычисляя концентрацию вредных веществ в атмосфере на сеточной области, можно определить требуемый

функционал, имеющий различные физические интерпретации.

1. Полное количество аэрозоля в области D за время $[0,T]$

$$J = \int_0^T \int_D \theta(x,y,z,t)\, dDdt.$$

2. Среднее значение количества аэрозоля в области D или $D_i \in D$ за период T

$$J_{cp} = \frac{1}{T}\int_0^T \int_D \theta(x,y,z,t)\, dDdt,\ J_{i,cp} = \frac{1}{T}\int_0^T \int_{D_i} \theta(x,y,z,t)\, dD_i dt.$$

3. Количество аэрозоля, выпавшего на подстилающую поверхность

$$J_0 = (w_g + \beta)\int_0^T \int_{\Sigma_0} \theta(x,y,z_0,t)\, dxdydt,$$

$$J_{i,0} = (w_g + \beta)\int_0^T \int_{\Sigma_{i,0}} \theta(x,y,z_0,t)\, dxdydt.$$

4. Количество аэрозоля, выпавшего на подстилающую поверхность в момент времени t_n в точке $r_k \in \Sigma_0$.

$$J = (w_g + \beta)\cdot\theta(x_k, y_k, z_0, t_n).$$

5. Количество аэрозоля, выпавшего на подстилающую поверхность за $[0,T]$ времени в точке $r_k \in \Sigma_0$.

$$J = (w_g + \beta)\cdot\int_0^T \theta(x_k, y_k, z_0, t)\, dt.$$

6. Распределение количество аэрозоля, выпавшего на подстилающую поверхность

$$J(x,y) = (w_g + \beta)\cdot\int_0^T \theta(x,y,z,t)\, dt,$$

$$r(x,y,z_0) \in \Sigma_0.$$

Заключение

Анализ проведенных вычислительных экспериментов показал, что на объем уноса мелкодисперсных частиц с поверхности почвы существенно воздействуют:

а) составляющие скорости ветра на поверхности земли, с ростом этого параметра экспоненциально растет объем уносимых аэрозольных частиц в атмосферу;

б) влажность почвы, с ростом этого показателя резко уменьшается количество выброса вредных веществ в атмосферу;

с) коэффициент шероховатости земли.

Проведенными численными расчетами установлено, что с ростом скорости динамического трения пропорционально растет скорость ветра по вертикали, а с ростом коэффициента шероховатости земли горизонтальная составляющая скорость ветра пропорционально уменьшается.

Численные расчеты показывают, что перенос и диффузия существенно зависят от распределения коэффициента турбулентности по вертикали. Проведенными численными расчетами установлено, что в рассеивании вредных веществ в атмосфере по горизонтали существенную роль играет направление ветра в рассматриваемом регионе.

Библиографический список

1. *Разработка эффективных* вычислительных алгоритмов и программного средства для мониторинга и прогнозирования экологического состояния промышленных регионов : отчёт о НИР (заключительный) / Центр РППиАПК при ТУИТ ; Руководитель Х.А. Примова ; № ГР ЕА7-001. – Т., 2015. – 52 с.: ил. – Отв. исполн. Д.К. Шарипов [и др.]. – Библиогр.: с. 48-52.

2. *Ravshanov, N. A* Mathematical Model for the Study and Forecast of the Concentration of Harmful Substances in the Atmosphere / N. Ravshanov, M. Shertaev, N. Toshtemirova // American Journal of Modeling and Optimization. – 2015. – Vol. 3, No. 2. – P. 35-39.

3. *Мирзажанов, К.М.* Ветровая эрозия орошаемых почв Узбекистана и борьба с ней / К.М. Мирзажанов. – Т.: Фан, 1973. – 234 с.

4. *Равшанов, Н.* Моделирования процесса загрязнения окружающей среды с учетом рельефа местности погодно-климатических факторов / Н. Равшанов, Д.К.

Шарипов, Д. Ахмедов // Информационные технологии моделирования и управления. – Воронеж, 2015. – №3. – С. 222-235.

5. *Ravshanov, N.* Advanced model of transfer process and diffusion of harmful substances in the atmospheric boundary layer / N. Ravshanov, N. Tashtemirova // Theoretical & Applied Science. – 2017. – № 2(46). – Pp. 129-138.

6. *Равшанов, Н.* Исследование существования и единственности решения задачи переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере / Н. Равшанов, Н. Таштемирова, Ф. Мурадов // Проблемы вычислительной и прикладной математики. – Ташкент, 2017. – №1(7). – С. 54-67.

7. *Равшанов, Н.* Процесс переноса и диффузии аэрозольных частиц в атмосфере : методология компьютерного моделирования / Н. Равшанов, Н. Таштемирова. – Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. – 136 с. – ISBN 978-3-330-00279-1.

MODELING OF THE PROCESS OF TRANSFER AND DIFFUSION OF ELKODISPERSE PARTICLES IN THE ATMOSPHERE WITH THE ACCOUNT OF EARTH EROSION

N. Ravshanov[1], *doctor of technical sciences, professor, head of laboratory*
D.A. Karshiev[1,2], *associate professor, head of the department*
B.E. Yuldashev[2], *associate professor*
[1]**Scientific and innovation center of information and communication technologies at the Tashkent university of information technologies**
[2]**Tashkent pediatric medical institute**
(Uzbekistan, Tashkent)

Abstract. *The paper considers the solution of the actual task of forecasting the ecological state of the environment, for example, in the Aral Sea region, where a large amount of salt and fine-dispersed harmful particles are emitted into the atmosphere due to soil erosion of the drained part of the Aral Sea. The mathematical model, its information support and the results of computer experiments carried out on a computer are presented. The developed model is designed for research, monitoring and forecasting of the process of distribution of pollutants in the atmosphere, and is described by a system of partial differential equations with corresponding initial and boundary conditions. The main parameters that play an important role in the process of transport and diffusion of harmful substances in the atmosphere are indicated: wind speed and its direction; terrain relief; the amount of release of salt particles into the atmosphere, which depends on the speed of wind and soil moisture, etc. Based on the analysis of the numerical experiments carried out, conclusions are formulated that serve as the basis for making management decisions on this issue.*

Keywords: *mathematical model, numerical experiment, ecology, soil erosion, harmful substances, wind speed, monitoring, forecasting.*