

С.Н. Степаненко, д.ф.-м.н., В.Г.Волошин, к.г.н., Е.В.Иванова, к.г.н.

Одесский государственный экологический университет

ВЛИЯНИЕ РЕЛЬЕФА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЫБРОСАМИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Предлагается математически простой, но физически обоснованный алгоритм векторизации рельефа местности и воздушного потока, обтекающего элементы рельефа. Алгоритм реализуется как в двумерном так и в трехмерном поле рельефа и ветра и не требует больших затрат машинного времени. Приведены результаты оценки влияния рельефа на уровень загрязнения атмосферного воздуха промышленными источниками.

***Ключевые слова:** качество атмосферного воздуха, влияние рельефа местности, загрязнение атмосферы.*

Введение. Проблема загрязнения воздуха тесно связана с развитием промышленности, энергетики и транспорта. Практически во всех странах существуют управления по контролю состояния окружающей среды, в том числе и атмосферы. Эффективность контроля состояния окружающей среды определяется двумя составляющими, а именно: прямыми измерениями качества воздуха, с помощью специальных средств, которые объединяются в систему мониторинга и косвенным контролем с помощью математического моделирования загрязнения атмосферного воздуха, позволяющие восстанавливать поля концентраций вредных веществ в районах, где не проводятся прямые измерения. Таким образом, возникает необходимость использования математического моделирования как элемента системы мониторинга [4, 6, 7, 9, 10].

Математическое моделирование загрязнения атмосферы становится все более эффективным инструментом для исследования состояния атмосферы, что обусловлено совершенствованием математических методов описания процессов переноса и рассеяния газообразных, жидких и твердых дисперсных компонентов загрязнения.

Особенностью моделей дальних переносов вредных веществ в атмосфере является упрощенное представление о процессах диффузии примесей в пограничном слое, что позволяет практически полностью исключить влияние особенностей рельефа местности на изменение полей приземных концентраций [5]. Модели дальних переносов определяют, в основном, изменение фоновых уровней загрязнения воздуха.

В локальных моделях, при решении задач переноса и рассеивания примеси непосредственно в пограничном слое атмосферы такой подход неприемлем, так как контроль качества атмосферного воздуха выполняется, в основном, в районах жилой застройки и возникает необходимость учитывать особенности рельефа местности [1, 4, 10].

Сложный рельеф, элементы которого имеют характерный пространственный масштаб от нескольких метров до нескольких сотен метров, ведет к образованию неоднородностей в поле ветра, что, в свою очередь, приводит и к изменению поля концентрации вредных веществ, так как турбулентный режим, определяющий интенсивность рассеивания примеси, существенно зависит от структуры потока [2, 5].

Основная проблема при решении задач о влиянии рельефа на поля концентраций, заключается в сложности учета различных физических эффектов, возникающих при

обтекании препятствий воздушным потоком и играющих ключевую роль в процессах турбулентного перемешивания примеси [3, 8, 9].

Цель работы заключается в построении схемы расчета концентраций вредных веществ, содержащихся в выбросах промышленных предприятий, в условиях пространственно неоднородного поля ветра, при вынужденном обтекании воздушным потоком элементов рельефа. Обтекание рельефа ведет не только к образованию вертикальных движений, но и к изменению горизонтальных составляющих вектора скорости ветра. Поэтому, одним из направлений развития локальных моделей является подключение к ним моделей пространственного распределения скорости ветра в условиях местности, элементы рельефа которой имеют масштабы от 10 и более метров.

Объект исследования – прикладные уравнения эйлеровой модели загрязнения атмосферы, полученные в [6], и названные уравнениями SVT. В расчетные формулы SVT включены не только все составляющие вектора скорости ветра, но и составляющие коэффициента турбулентной вязкости. Использование формул SVT при решении задач о влиянии рельефа на изменения поля концентраций, оказывается предпочтительнее, чем применения иных моделей, не содержащих компонент потока [7].

Постановка задачи. Местность с неоднородным полем высот будем называть “рельефной поверхностью” в отличие от горизонтальной или наклонной плоской поверхности. Рельефная поверхность, в заданной расчетной сеточной области, может быть воспроизведена с помощью множества “элементов рельефа”, каждый из которых представлен в виде плоскости, имеющей свою азимутальную ориентацию и наклон относительно горизонтальной поверхности.

Метод, представляет собой процедуру оценки составляющих потока в каждой точке сеточной области по перепаду высот рельефа текущей точки и точки, которая размещается на любой из сторон сеточной области расчета. Эти изменения оцениваются в зависимости от направления потока в невозмущенном слое над рельефной местностью. Анализируется перераспределение составляющих воздушного потока, в предположении потенциальности течения.

На рис. 1 (а, б) представлен пример расположения элемента рельефа. Элемент рельефа находится на плоскости $R(1_r 2_r 3_r 4_r)$. Плоскость R имеет наклон относительно горизонтальной плоскости $G(1_g 2_g 3_g 4_g)$, заданный углами α_x и α_y , и ориентацию относительно сторон света, которая определяется азимутом проекции на горизонтальную плоскость нормали к элементу рельефа, т.о. выполнена векторизация поля рельефа.

На рис. 1а,б показаны два вектора: вектор скорости ветра V_r , лежащий в плоскости элемента рельефа и проекция этого вектора на горизонтальную плоскость – вектор горизонтальной скорости V_g . Точка 1, определяющая положение вектора V_r всегда совпадает с сеточной точкой, а остальные точки плоскости R могут не совпадать с ними.

Углы наклонов и составляющие векторов V_r и V_g определяются следующим образом:

$$u_r = V_r \sin dd, \quad v_r = V_r \cos dd, \quad (1)$$

$$u_g = u_r \cos \alpha_x, \quad v_g = v_r \cos \alpha_y, \quad (2)$$

$$w_{gx} = u_r \sin \alpha_x, \quad w_{gy} = v_r \sin \alpha_y, \quad (3)$$

$$\alpha_x = \operatorname{arctg} \frac{z_r(4r) - z_r(1)}{x(4g) - x(1)}, \quad \alpha_y = \operatorname{arctg} \frac{z_r(2r) - z_r(1)}{y(2g) - y(1)}, \quad (4)$$

где u_r, v_r – составляющие вектора скорости натекающего потока; u_g, v_g – составляющие горизонтальной скорости ветра; w_{gx}, w_{gy} – составляющие вертикальные скорости ветра; α_x, α_y – углы наклона элементов рельефа вдоль осей X и Y ; z_r – высоты соответствующих координатных точек x и y ; dd – угол между осью Y и вектором V_r .

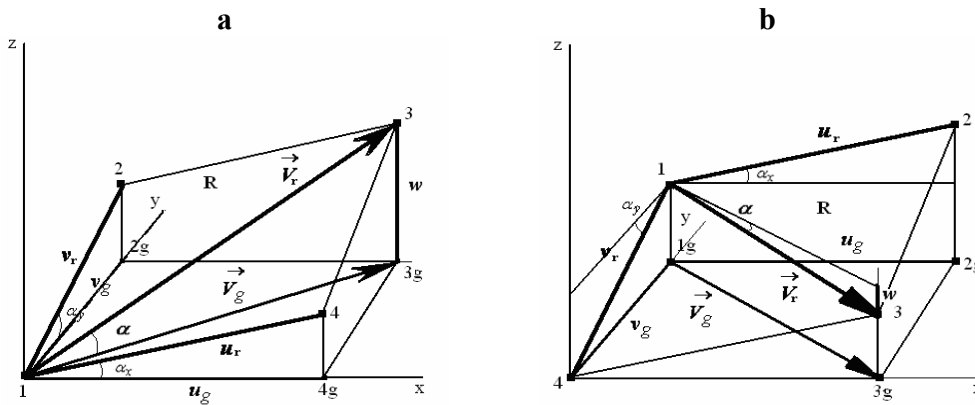


Рис. 1 – Схема, поясняющая расчет направления, вертикальной и горизонтальной скорости над рельефной поверхностью.

Таким образом, горизонтальная составляющая V_g вектора скорости ветра V_r , определяется следующим образом:

$$V_g = \sqrt{u_g^2 + v_g^2}, \quad (5)$$

а направление (азимут) dd_r горизонтальной скорости ветра находим из соотношения

$$dd_r = \operatorname{arctg} \left(\frac{v_g}{u_g} \right). \quad (6)$$

Так как $V_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2} = \sqrt{(u_g^2 + w_{gx}^2) + (v_g^2 + w_{gy}^2)}$, то величина и знак вертикальной составляющей зависит от угла наклона и ориентации элемента рельефа и, следовательно, третья составляющая трехмерного вектора V_r равна

$$w_g = \sqrt{w_{gx}^2 + w_{gy}^2}, \quad (7)$$

а α – угол наклона поверхности рельефа в направлении вектора скорости, окончательно определяется из соотношения

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{w_r}{V_r}\right) \quad (8)$$

и, тогда получаем равенство

$$V_r = \sqrt{V_g^2 + w_g^2}, \quad (9)$$

позволяющие держаться в рамках закона сохранения импульса.

Результаты исследования и их анализ. В качестве примера применения предлагаемой схемы, покажем расчет изменения направления ветра, вертикальной и горизонтальной скорости под влиянием рельефной поверхностью, которая представлена вершиной конусообразной формы высотой 2000 м и радиусом 500 м (рис. 2), расположенной в центре расчетной области.

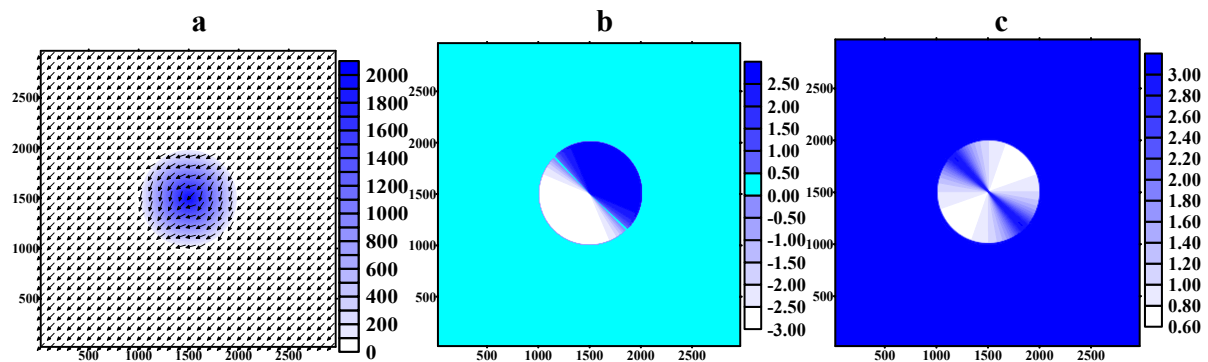


Рис. 2 – Пространственные поля вектора скорости и рельефа (а), вертикальной (b) и горизонтальной скорости (с).

На рис. 2а показано поле векторов, отображающих распределение искомых величин. Рельефная поверхность (темная зона) видна в виде окружности с затемнением в центре. Направление и величина модуля вектора скорости отображается направлением и длиной стрелок. В области рельефа направление стрелок и их величины изменяются, так как присутствует эффект обтекания потоком конусообразной формы рельефа. Вне области рельефа поле ветра восстанавливается и соответствует заданному направлению и скорости ветра.

На рис. 2b, 2с представлены поля w и V_g , отдельно друг от друга. На наветренной стороне горизонтальная скорость уменьшается в связи с резким увеличением высоты рельефа, а вертикальная скорость достигает максимальных значений (затененная область на рис. 2b). При обтекании горы горизонтальная скорость увеличивается, и максимальные значения скорости наблюдаются с двух сторон препятствия, перпендикулярно натекающему потоку (затененные области на рис.2с). Таким образом, метод адекватно отображает влияние рельефа на изменение поля вектора скорости ветра.

Практически любой рельеф местности, соответствующий реальной поверхности, можно промоделировать с помощью нескольких формул содержащих элементы рядов Фурье, представляющих разложения в ряд по ортогональным функциям.

Поле рельефа может быть получено с помощью следующей формулы

$$z_r(i,j) = (A - r_{xi}) + B(\sin(0,0175 \cdot C \cdot y_j) - \cos(0.0175 \cdot C \cdot y_j)), \quad (10)$$

где

$$r_{xi} = (A_1 + i^d) + B_1(\sin(0.0175 \cdot C_1 \cdot x_i) - \cos(0.0175 \cdot C_1 \cdot x_i)), \quad (11)$$

где i – номер сеточной точки по оси X; x_i, y_j - координаты i - той и j -той сеточных точек по оси X и Y.

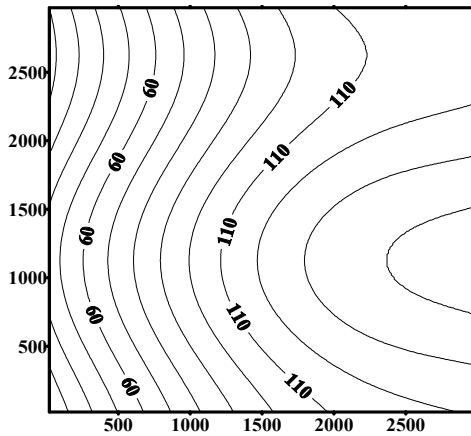


Рис. 3 – Рельефная поверхность, моделируемая формулами (10) и (11). Область расчета представляет площадь 300х300 точек с шагом 10м.

Числовые коэффициенты в формулах (10) и (11) приняты $A=20$; $A_1=18$; $B= B_1=10$; $C=0.12$; $C_1 =0.08$; $d=0.8$. Изменяя эти коэффициенты, можно создать различные формы рельефа.

Область расчета представляет собой квадрат со сторонами 3х3 км (рис.3). Видно, что с запада на восток перепад высот составляет всего 120 м на 3км расстояния между крайними точками. С юга на север высота изменяется волнообразно. Оси смена знака высот расположены в координатах $y = 1100$ м и $y = 2500$ м. Таким образом, поверхность представляет собой местность со слабо выраженной орографией, имеющей один максимум и минимум высоты.

Анализ влияния рельефа на изменение структуры потока показаны на рис.4. Поля составляющих вектора ветра определялись для различных направлений над рельефной поверхностью и скорости ветра равной 2,5 м/с.

На рисунках представлено поле орографических вертикальных скоростей и угла отклонения орографического ветра от основного потока с направлением 45^0 .

В условиях заданного рельефа при направлении потока 45^0 , образуются в основном нисходящие вертикальные движения (рис. 4а). Максимум величин нисходящих движений (-20 см/с) наблюдаются в юго-западной части расчетной области ($Y = 300$, $X = 100$), где происходит уменьшение высоты поверхности в направлении движения воздушного потока. Небольшая область восходящих движений присутствует на северных склонах холма ($y = 2000$, $X = 2750$), где восходящие движения достигают значений 2 см/с.

При обтекании потоком элементов рельефа (рис.4 б) происходит отклонение направления ветра на величину от 2 до 10 градусов. Интересно, что образуются две области обтекания препятствия, симметрично расположенные относительно его вершины

($Y = 1750$, $Y = 250$, $X = 2750$). При иных направлениях потока расположение этих зон практически не изменяется, но изменяется величина и знак угла отклонения ветра.

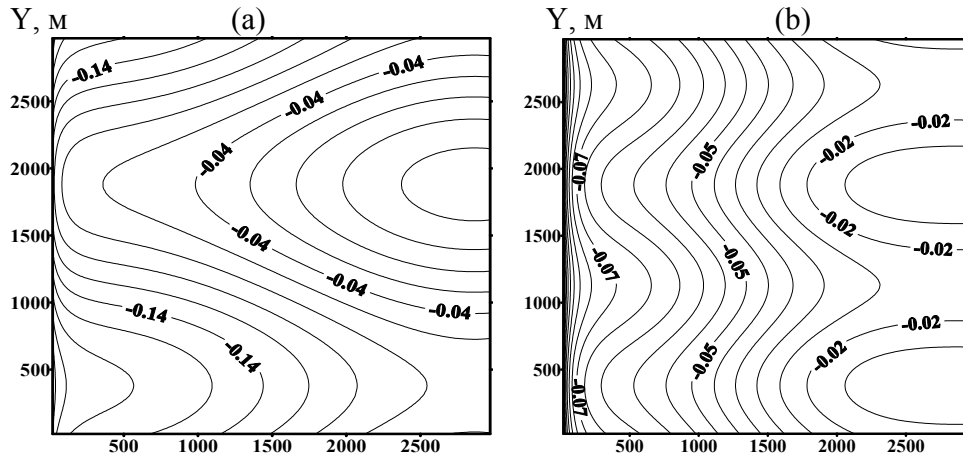


Рис. 4 – Пространственное поле орографической вертикальной скорости (а) и угла отклонения вектора ветра (б) от направления натекающего потока 45° .

Обтекание элементов рельефа создает новую структуру потока, что, естественно, ведет и к постоянным изменениям концентрации в направлении траектории движения облака примеси.

Особенности орографических колебаний полей концентрации можно изучать с помощью формулы полученной авторами в работе [7], которая учитывает изменение составляющих вектора скорости и коэффициента турбулентной обмена

$$q(x, y, z) = \frac{Q \cdot e}{4\pi k_y \sqrt{k_z}} \times \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{x_i^2 + y_j^2 + (z_r - h_{re})^2}{k_y k_z}} \sqrt{\frac{u_g^2 + v_g^2 + w_g^2}{k_y k_z}} \frac{u_g x_i + v_g y_j + w_g (z_r - h_{re})}{2k_y} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{x_i^2 + y_j^2 + (z_r + h_{re} - 2z_0)^2}{k_y k_z}} \sqrt{\frac{u_g^2 + v_g^2 + w_g^2}{k_y k_z}} \frac{u_g x_i + v_g y_j + w_g (z_r + h_{re} - 2z_0)}{2k_y} \right) \quad (12)$$

где u_g, v_g, w_g – составляющие вектора скорости рассчитываемые по формулам (2) и (3); x_i, y_j – декартовы координаты расчетной ячейки с учетом координат источника (задаются при численном решении), $z_r = z_{rec} + \Delta z_{ij}$ – высота точки, в которой определяется концентрация, где Δz_{ij} – высота элемента рельефа; $h_{re} = h_e + \Delta z_{ij}$ – высота оси факела примеси относительно элемента рельефа.

В качестве источника примеси выбран точечный промышленный источник характеристики которого приведены в методике ОНД-86 [4]: геометрическая высота 35м, диаметр устья трубы 1,4м, скорость выхода газов 7 м/с, температура газов 398К, температура окружающего воздуха 298К. Эффективная высота источника определялась по формулам из моделей [9,10]. Опасная скорость ветра для этого источника равна 2,74 м/с.

Источник при каждом направлении ветра располагался в той части расчетной области, откуда дует ветер. В результате получены поля вектора скорости и приземные концентрации. Концентрации (мкг/м^3) в атмосферном воздухе вредных веществ рассчитывались по формуле (12).

На рис. 5 показаны подветренные концентрации вдоль оси факела на уровне рецептора $z_{rec} = 1\text{ м}$, а также орографическая изменчивость составляющих вектора скорости ветра. При направлении основного потока 45° или 225° , натекающего на рельефную поверхность, распределение высот рельефа по пути следования факела представлено линией 1 (рис.5а,б) соответственно.

На рис. 5а,б (линия 2а,б) показаны изменения величины и знака вертикальной скорости. При уменьшении высоты рельефа образуются нисходящие вертикальные движения, а при увеличении восходящие, величина которых зависит от градиента перепада высот. Если $w_g = 0$, то скорость ветра V_g равна скорости невозмущенного потока V_r . На этих же рисунках линии 3 показывают угол поворота ветра при обтекании препятствия, который зависит от разности углов наклона элемента рельефа. Орографические изменения направления ветра от направления основного потока, колеблется в пределах от 2 до 10 градусов.

Влияние рельефа местности на изменение поля концентраций примеси, исследовалось при двух режимах турбулентности, соответствующих примерно неустойчивой и слабо устойчивой стратификации. Величины k_z, k_y выбраны так, что бы при неустойчивой стратификации максимальная концентрация $q_{\max}(x)$ находилась вблизи источника $x_{\max} < 500\text{ м}$ ($k_z = 2,5\text{ м}^2/\text{с}$ и $k_y = 3,5\text{ м}^2/\text{с}$), а при устойчивой стратификации на удалениях от источника $1000 < x_{\max} < 2000\text{ м}$ ($k_z = 0,25\text{ м}^2/\text{с}$, $k_y = 1,7\text{ м}^2/\text{с}$), не выходящих за пределы расчетной области.

Приземные концентрации для равнинной поверхности имеют следующие значения: $q_{\max} \approx 200\text{ мкг/м}^3$, $x_{\max} \approx 0,4\text{ м}$ и $q_{\max} \approx 100\text{ мкг/м}^3$, $x_{\max} \approx 1,5\text{ м}$ для различных метеорологических условий соответственно.

Расчет концентраций для неустойчивой стратификации представлен на рис. 5с,д. Линия 2 показывает изменение концентрации $q(x, z_r)$ над рельефной поверхностью, а линией 3 над равнинной поверхностью. Когда источник расположен на возвышенности высотой 120м (рис.5с) и начальный перенос облака примеси происходит над поверхностью с малым перепадом высот, максимум концентрации расположен на расстояниях 300-400м от источника, а величина максимума $q_{\max}(x)$ близка к аналогичной при равнинных условиях. Линии 2 практически не отличается от распределения при равнинных условиях.

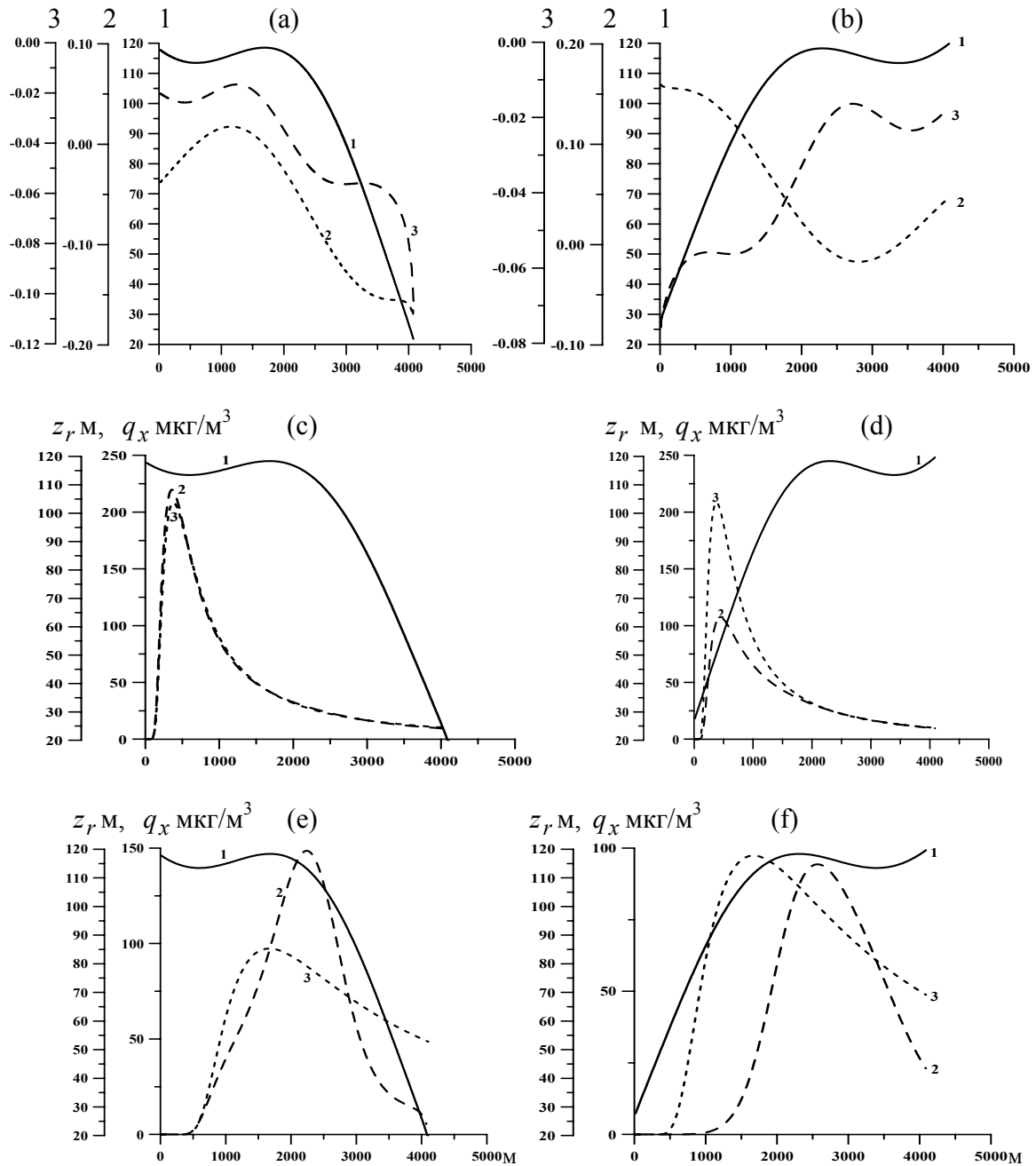


Рис. 5 – Высота рельефа z_r , м (линии 1 а, b, с, d, e, f), вертикальная скорость w м/с (линии 2а,б), угол поворота ветра в рельефе dd_r (линия 3а,б), концентраций $q(x)$ мкг/м³ над рельефом (линии 2 с,д,е,ф) и равнинной поверхностью (линии 3 с,д,е,ф).

В дальней зоне, за областью максимума, подветренные концентрации близки к аналогичному распределению при равнинных условиях. Когда источник расположен в низине (рис.5д) и перенос примеси происходит по поднимающемуся склону, над которым образуются восходящие движения, максимум концентрации уменьшается вдвое до

100 мкг/м³, сохраняя практически свое положение относительно источника, но смещаясь влево от направления основного потока.

В условиях устойчивой стратификации при слабой турбулентности (рис.5 е,с) зона максимальных концентраций образуется на больших расстояниях от источника $1,5 \leq x_{\max} \leq 2$ км. При данном рельефе максимальные концентрации $q_{\max}(x)$, в зависимости от положения источника, находятся в области восходящих или нисходящих движений. Если источник расположен на вершине холма (рис.5е), а примесь переносится в зону нисходящих движений, то $q_{\max}(x)$ растет. Если же источник расположен у подножья холма (рис.5f) и факел направлен в область восходящих движений, то $q_{\max}(x)$ уменьшается. В обоих случаях x_{\max} увеличивается по сравнению с равнинными условиями.

Пространственное распределение концентрации при устойчивой стратификации проиллюстрировано на примере поля концентраций в плоскости ХУ (рис. 6а,б).

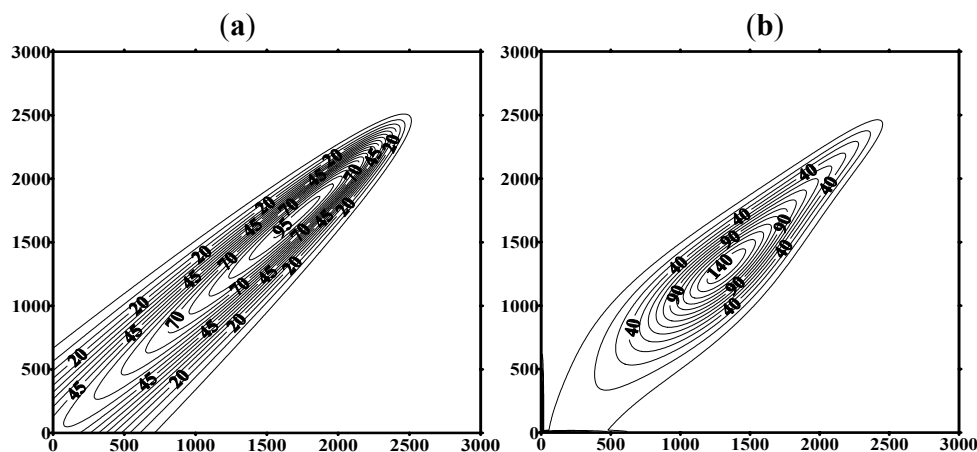


Рис.6– Поле концентраций примеси от источника, расположенного в верхнем правом углу расчетной области при устойчивой стратификации: (а) - без учета и (б)- с учетом рельефа.

На рис.6а показано поле $q(x, y, z) = 1$ м над равнинной местностью. Максимум равняется примерно 100 мкг/м³ и находится на расстоянии 1,6-1,8 км от источника. Ось факела направлена по вектору ветра основного потока. Ширина факела на расстоянии 2 км от источника составляет ~ 1 км ($0,1 q_{\max}$).

На рис.6б облако примеси движется в области нисходящих движений. Величина максимальных концентраций возрастает в 1,5 раза, до 150 мкг/м³, а область высоких концентраций удаляется от источника $x_{\max} \approx 2,2$ км. След факела сужается, и он начинает поворачивать влево относительно основного направления ветра, следуя за орографическими изменениями ветра.

Выводы. В локальные модели загрязнения атмосферы включают метеорологические модели, позволяющие построить трехмерные поля скорости ветра над неоднородными подстилающими поверхностями. Это необходимо для обеспечения процедур ассимиляции метеорологических данных при расчетах полей концентраций [3].

В статье предлагается математически простой, но физически обоснованный алгоритм векторизации рельефа местности и воздушного потока, обтекающего элементы рельефа. Сам алгоритм реализуется в трехмерном поле рельефа и ветра и не требует больших затрат машинного времени.

Дальнейшее совершенствование метода потребует учета термической и динамической неоднородности потока, что позволит окончательно создать действенный метод построения трехмерного поля ветра для моделей локальной атмосферной диффузии, работающих без поддержки численных мезометеорологических моделей.

Список литературы

1. *Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А.* Математическая модель локальных воздушных течений над поверхностью рельефа // Науковий вісник будівництва. Вип. 45. Харків: ХДТУБА, 2008. С. 132-139.
2. *Дородницын А.А.* Влияние рельефа земной поверхности на воздушные течения // Труды Центрального института прогнозов. Вып. 21. - М.: ЦИП, 1950. С. 3-25.
3. *Ковалец И.В.* Ассимиляция метеорологических данных в системах поддержки принятия решений // Математичні машини і системи, 2005, № 2. с. 154-167
4. ОНД-86. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеоздат, 1987.
5. *Перри С. Г.* Модель диффузии ЕРА для сложного рельефа: структура и характеристики // В сб. Международная конференция ВМО по моделированию загрязнения атмосферы и его применениям. Л.: Гидрометеоздат, 1986 С. 14-15.
6. *Степаненко С.Н.* Динамика турбулентно-циркуляционных и диффузионных процессов в нижнем слое атмосферы над Украиной. – Одесса: Маяк, 1998.
7. *Степаненко С.Н., Волошин В.Г., Тупцов С.В.* Решение уравнения турбулентной диффузии для стационарного точечного источника // Украинский гидрометеорологический журнал, 2008, № 3, с. 13-25.
8. *Zheleznyak M., Kovalets I., Sorokin Y., Dvorzhak A., Kushchan A., Bogorad S., Shlyahun N.* Implementation in Ukraine of the Rodos system // Proc. of International Symposium on “Off-site Nuclear Emergency Management – Capabilities and Challenges”. Austria. – 2003.
9. *Seaman N.* Meteorological modelling for air-quality assessments // Atmospheric Environment. – 2000. – Vol. 34. P. 2231 – 2259.
10. *Scire J.* A users guide for the CALMET meteorological model // Earth Tech, Inc. 2000. (<http://www.src.com/calpuff/calpuff1.htm>)

Вплив рельєфу земної поверхні на рівень забруднення атмосферного повітря викидами промислових джерел.

С.Н. Степаненко, В.Г. Волошин, Е.В. Іванова

Пропонується математично простий, але фізично обґрунтований алгоритм векторизації рельєфу місцевості і повітряного потоку. Алгоритм реалізується як в двовимірному так і тримірному полі рельєфу і вітру і не вимагає великих витрат машинного часу. Приведені результати оцінки впливу рельєфу на рівень забруднення атмосферного повітря промисловими джерелами.

Ключові слова: *якість атмосферного повітря, вплив рельєфу місцевості, забруднення атмосфери.*

Influence of relief of earthly surface on the level of contamination of atmospheric air the troop landings of industrial sources .

S. Stepanenko, V. Voloshin, E. Ivanova

Offered mathematically stand, but the physically grounded algorithm of vector field of relief and air currents. An algorithm will be realized in the two-dimensional and the three-dimensional field of relief and wind and does not require the machine time. The results of estimation of influencing of relief the level of contamination of atmospheric air industrial source.

Keywords: *quality of atmospheric air, influencing the relief of pollutions atmospheric.*