

УДК 551.510.42

**ПОТЕНЦИАЛ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ И ВОЗМОЖНОСТИ  
ЕГО ПАРАМЕТРИЗАЦИИ**

Доктор геогр. наук В.Г. Сальников

Н.У. Бултеков

*Приведены результаты исследований по количественному определению характеристик вихря скорости и дивергенции, которые в дальнейшем предполагается использовать для установления градаций и оценки уровня потенциала загрязнения атмосферы.*

Охрана чистоты атмосферы в период бурного развития промышленности и автотранспорта стала одной из наиболее важных задач устойчивого развития.

Радикальной мерой по поддержанию воздуха в чистоте является сокращение выбросов вредных веществ в атмосферу до установленных нормативов, при которых в приземном слое атмосферы обеспечиваются санитарно обоснованные предельно допустимые концентрации [5].

Однако, современный уровень развития науки и техники не позволит в ближайшем будущем полностью ликвидировать вредные выбросы в атмосферу, несмотря на огромные достижения в области охраны окружающей среды. Это обстоятельство заставило все страны подойти к проблеме охраны атмосферного воздуха со всей серьезностью, что дало значительный импульс в развитии исследований в области метеорологических аспектов загрязнения атмосферы, в частности в изучении количественных характеристик уровня загрязнения воздуха, особенностей и причин, обуславливающих скопление вредных веществ в атмосфере, и т.д. Много проводилось исследований в этой области, как в ближнем, так и дальнем зарубежье. Эти исследования получили обобщение в монографиях Берлянда М.Е. и Безуглой Э.Ю. [2, 3].

Разработки в плане метеорологических аспектов загрязнения атмосферы связаны, прежде всего, с изучением атмосферной диффузии, закономерностей распространения примесей и особенностей их пространственно-временного распространения, а также их прогноза. Они являются основой для объективной оценки состояния загрязнения атмосферы и разработки методик по обеспечению чистоты атмосферы. В настоящее время

существует несколько полуэмпирических способов оценки способности атмосферы накапливать или рассеивать примеси. Эту способность всё чаще называют потенциалом загрязнения атмосферы (ПЗА).

Понятие ПЗА было введено в США для описания общих условий рассеивания примесей. В настоящее время предрасположенность атмосферного воздуха к загрязнению характеризуется потенциалом загрязнения атмосферы, который понимается как сочетание метеорологических факторов, обуславливающих уровень возможного загрязнения атмосферы от источников в данном географическом районе [1].

Для параметризации ПЗА используются самые разные подходы. Под ПЗА нередко подразумевают комплексные характеристики значений вертикального распределения температуры воздуха и скорости ветра, а иногда и другие метеоэлементы. Так, в ряде американских работ для характеристики ПЗА предлагается оценивать сочетание скорости ветра в приземном слое и на уровне 3 км. При этом, под высоким ПЗА понимают сочетание скорости ветра в приземном слое до 4 м/с, а на уровне 3 км до 12 м/с с нисходящими движениями в слое атмосферы до 2,5 км. Продолжительность таких условий должны быть не менее 36 часов.

Часто для характеристики устойчивости атмосферы используется понятие высоты слоя перемешивания (ВСП)  $L_0$ , определяемого как часть атмосферы, в которой рассеиваются основные выбросы от приземных источников. Обычно принимается, что зона перемешивания заканчивается на уровне, где неустойчивая или равновесная стратификация сменяется устойчивой. При уменьшении  $L_0$  увеличивается загрязнение воздуха (без учёта высоких выбросов). Обычно высоту слоя перемешивания определяют для дневного времени и антициклональной погоды, в предположении, что она приблизительно равна высоте приземной инверсии к концу предшествующей ночи.

Влияние ВСП на уровень загрязнения не однозначно. Оно зависит от скорости ветра в слое перемешивания. В связи с этим Холцфорт Ж.С. предложил использовать комбинированную характеристику, равную произведению ВСП на среднюю скорость ветра  $\overline{U}_0$  в слое перемешивания. Эта характеристика представляет собой скорость рассеивания примеси в объеме высотой  $H$  (высота слоя перемешивания), шириной 1 км и длиной, равной расстоянию, на которое переносится примесь за единицу времени под влиянием средней скорости ветра в слое. Высокий ПЗА ожидается в случае, когда в день прогноза и на следующий день утром  $L_0 < 500$  м,  $\overline{U}_0 \leq 4$  м/с.

В [6] для оценки метеорологических условий распространения примесей рассчитывался комплекс метеорологических условий, способствующих как загрязнению, так и очищению атмосферы. Для этого был предложен коэффициент самоочищения атмосферы  $K_m$ :

$$K_m = \frac{P_m + P_t}{P_0 + P_6}, \quad (1)$$

где  $P_m$  – повторяемость скоростей ветра 0...1 м/с, %;  $P_t$  – повторяемость туманов, %;  $P_0$  – повторяемость числа дней с осадками более 1,0 мм, %;  $P_6$  – повторяемость скорости ветра более 6 м/с, %. Таким образом, в числителе располагаются метеорологические параметры, способствующие загрязнению атмосферы примесями, в знаменателе – к самоочищению атмосферы.

В СССР в 80-х годах для оценки ПЗА также были предложены два метода. Это метод ГГО и физико-статистический методы. Согласно первому из них, ПЗА выражается в виде отношения средних концентраций примесей в конкретном ( $\bar{q}_i$ ) и условном ( $\bar{q}_0$ ) районах:

$$n = \frac{\bar{q}_i}{\bar{q}_0}. \quad (2)$$

За условный принимается район с минимальными условиями для накопления примесей. Рассчитанный таким образом показатель ПЗА указывает, во сколько раз средний уровень загрязнения воздуха в конкретном районе, обусловленный реальной повторяемостью метеоусловий, будет выше, чем в условном.

Согласно физико-статистическому способу оценки ПЗА предложенному Безуглой, учёт влияния метеоусловий на содержание примесей в атмосфере осуществляется путём расчёта следующей формулы [1]:

$$ПЗА = 2,3 \exp \left[ \frac{0,04}{(z_2 - z_1)^2} - \frac{0,4z_1}{z_2 - z_1} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $z_1$  и  $z_2$  являются аргументами интеграла вероятности. Уровень ПЗА определяется в соответствии с установленными градациями.

Таким образом, анализ существующих способов параметризации ПЗА показывает, что в настоящее время не существует единого для этого подхода. Это обусловлено отсутствием универсального количественного параметра ПЗА, позволяющего не только оценивать возможности атмосферы накапливать или рассеивать примеси в климатическом плане, но и разрабатывать схемы прогноза ПЗА с различной заблаговременностью.

Кроме того, параметры, входящие в формулы для расчета ПЗА в большинстве случаев обладают значительной пространственно-временной неоднородностью. Это не всегда позволяет проводить экологические мероприятия с достаточной степенью эффективности. Еще одним фактором, ограничивающим использование ПЗА классическими методами, является редкая сеть аэрологических станций и современная частота зондирования атмосферы. В настоящее время производится один - два выпуска радиозондов в сутки. Это обуславливает значительные погрешности в определении повторяемости инверсий и застойных явлений.

Таким образом, представляется целесообразным разработать более универсальный подход в определении ПЗА для Казахстана.

В данной статье приводятся результаты исследований по количественному определению характеристик вихря, дивергенции и циркуляции скорости, которые отражают процессы цикло-, антициклогенеза, особенности вертикальных движений и другие процессы атмосферы, способствующие перераспределению примесей в воздушной среде. Это позволит в дальнейшем, после установления соответствующих градаций, не только уточнить районирование территории республики по этому параметру, но и судить в оперативном режиме с необходимой достоверностью о способности атмосферы накапливать или рассеивать примеси, а также предложить схемы его прогноза с различной заблаговременностью.

Вихрь скорости является вектором  $rot V = \Omega$ , проекции которого на оси координат равны:

$$\Omega_x = \frac{\partial W}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial z}, \quad \Omega_y = \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \Omega_z = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}, \quad (4)$$

где  $U, V, W$  – проекции вектора скорости  $\vec{V}(U, V, W)$  на координатные оси  $x, y, z$ .

Численно вихрь скорости равен удвоенной угловой скорости вращения частицы и направлен параллельно оси вращения в ту сторону, откуда вращение кажется совершающимся против часовой стрелки.

В дальнейшем, для проведения практических расчетов, нас будет интересовать лишь вертикальная слагающая вихря  $\Omega_z$ , которая в изобарической системе координат выражается в виде:

$$\Omega_z = \frac{\partial V_p}{\partial x} - \frac{\partial U_p}{\partial y}. \quad (5)$$

Не следует полностью отождествлять вихрь скорости как метеорологическую величину с перемещением частиц воздуха по криволинейным

траекториям. Речь идет не столько о вращательном движении, сколько о тенденции возникновения такого движения.

Учитывая, что

$$\Omega = \frac{1}{\rho l} \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = \frac{1}{\rho l} \nabla^2 P \quad (6)$$

или

$$\Omega = \frac{g}{l} \left( \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) = \frac{g}{l} \nabla^2 H, \quad (7)$$

вычисление  $\Omega$  можно заменить вычислением лапласианов  $\nabla^2 P$  или  $\nabla^2 H$ .

Дивергенция вектора скорости в пространстве определяется уравнением:

$$\operatorname{div} V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \tau}{\partial p}. \quad (8)$$

В горизонтальной плоскости

$$\operatorname{div} V = D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (9)$$

При этом, горизонтальная дивергенция потока  $D_0$  вызывается двумя факторами:

- приземным трением  $D''_{p_0}$  ;
- изменением вертикальной скорости с высотой, на что указывает уравнение  $D = -\partial\tau/\partial p$ .

Если запишем это общее уравнение применительно к приземному слою атмосферы, то получим:

$$D'_{p_0} = - \left( \frac{\partial \tau}{\partial p} \right)_{p_0}, \quad (10)$$

где  $(\partial\tau/\partial p)_{p_0}$  – характеризует изменение вертикальной скорости с высотой.

Анализ показывает, что если восходящие токи усиливаются с высотой –  $(\partial\tau/\partial p)_{p_0} > 0$ , то в приземном слое происходит конвергенция потоков  $D'_{p_0} < 0$  и ПЗА уменьшается, а если усиливаются с высотой нисходящие токи –  $(\partial\tau/\partial p)_{p_0} < 0$ , то происходит растекание потоков  $D'_{p_0} > 0$  – ПЗА увеличивается. Таким образом, горизонтальную дивергенцию скорости можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$D_{p_0} = D'_{p_0} + D''_{p_0}, \quad (11)$$

где  $D''_{p_0}$  – дивергенция, обусловленная приземным трением.

Определение составляющей горизонтальной дивергенции в приземном слое представляет наибольшие трудности. Можно предложить следующий способ.

Естественно предположить, что горизонтальная дивергенция в приземном слое  $D'_{p_0}$  и дивергенция  $D_{850}$  на уровне 850 гПа тесно связаны между собой. Этот вывод основывается на том, что согласно уравнению неразрывности на любом уровне атмосферы выполняется условие:

$$D = -\frac{\partial \tau}{\partial p}. \quad (12)$$

Если принять, что вертикальная скорость обращается в нуль на поверхности Земли и на уровне тропопаузы, то согласно теоремы Роля в слое тропосферы существует уровень, где выполняется условие:

$$\frac{\partial \tau}{\partial p} = 0. \quad (13)$$

Такой уровень одновременно является бездивергентным уровнем атмосферы ( $D = 0$ ) и совпадает, как известно, в среднем с уровнем 600 гПа [4]. Ниже этого уровня  $-\partial \tau / \partial p$  имеет один и тот же знак на всех высотах. Таким образом можно принять, что между дивергенцией в приземном слое и дивергенцией на уровне 850 гПа существует связь:

$$D'_{p_0} = m D_{850}, \quad (14)$$

где  $m$  – коэффициент пропорциональности.

Кроме того, в приземном слое существует дивергенция трения, которую вычисляют с использованием лапласиана давления на уровне моря:

$$D_T = -m_T \nabla p_0, \quad (15)$$

где  $m_T$  – коэффициент пропорциональности,  $\nabla p_0 = \bar{p}_r - p_0$ . Здесь  $\bar{p}_r$  – среднее давление на окружности радиуса  $r$ ,  $p_0$  – давление в центре этой окружности.

Из уравнения (15) следует, что при  $\bar{p}_r > p_0$  наблюдается отрицательная горизонтальная дивергенция ( $D_T < 0$ ), а при  $\bar{p}_r < p_0$  положительная дивергенция ( $D_T > 0$ ).

Таким образом, суммарную горизонтальную дивергенцию в приземном слое атмосферы можно представить в виде:

