

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 градициями.

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 Ω_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 Ω можно заменить вычислением лапласианов $\nabla^2 P$ или $\nabla^2 H$.

Дивергенция вектора скорости в пространстве определяется уравнением:

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

В горизонтальной плоскости

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

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:

$$D_{p_0} = mD_{850} - m_T \nabla p_0. \quad (16)$$

В связи с тем, что непосредственное вычисление горизонтальной дивергенции D_0 по полю ветра связано с большими трудностями, перспективными представляются исследования связи между горизонтальной дивергенцией D_0 и адвекцией температуры воздуха.

Таким образом, в результате проведённых исследований получены аналитические зависимости, позволяющие оценивать особенности дивергенции в приземном слое воздуха и, соответственно, потенциал загрязнения атмосферы. Эти результаты в дальнейшем предполагается использовать в Казахстане для установления градаций и оценки уровня ПЗА, включая прогноз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 184 с.
2. Безуглая Э.Ю., Берлянд М.Е. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Справочное пособие. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 328 с.
3. Берлянд М.Е. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоздат, 1991.– 260 с.
4. Лутфулин И.З. Новые методы предвычисления метеорологических полей. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 154 с.
5. Сальников В.Г. Эколого-климатический потенциал Казахстана. – Алматы: Қазақ университеті, 2006. – 263 с.
6. Свинухов В.Г. Экология атмосферы городов Приморского края. – Владивосток: Дальневосточный университет, 1997. – 140 с.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы
Казгидромет, г. Алматы

АТМОСФЕРАНЫҢ ЛАСТАНУ ПОТЕНЦИАЛЫ ЖӘНЕ ОНЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯЛАУ МҮМКІНДІКТЕРІ

Геогр. ғылымд. докторы В.Г. Сальников
 Н.У. Бултеков

Бұл мақалада дивергенция мен құйын жылдамдығының сипаттамаларының сандық анықтамасы бойынша зерттеу нәтижелері келтірілген, оларды болашақта атмосфераның ластану потенциалы деңгейін бағалауға және градацияны орнықтыру үшін қолдануға болады.