

УДК 551.509.328

## О методике определения метеорологического потенциала загрязнения атмосферы

Т.С. Селегей, Н.Н. Филоненко, Т.Н. Ленковская\*

Сибирский научно-исследовательский гидрометеорологический институт  
630099, г. Новосибирск, ул. Советская, 30

Поступила в редакцию 14.04.2015 г.

Излагается усовершенствованная методика определения метеорологического потенциала загрязнения атмосферы (МПЗА), основанная на использовании приземных метеорологических данных, имеющих на любой метеостанции Российской Федерации. Апробация методики проведена на данных 196 метеостанций Западной Сибири за период с 1986 по 2010 г. Уточнены граничные условия для выделения территорий с различными метеорологическими ресурсами для рассеивания примесей. Проведен анализ межгодовой и территориальной изменчивости МПЗА. Найдены коэффициенты корреляции между значениями МПЗА и уровнем загрязнения атмосферного воздуха как отдельными ингредиентами, так и индексами загрязнения в целом, рассчитанными по четырем основным примесям (взвешенным веществам, оксиду углерода, диоксиду азота и диоксиду серы) (ИЗА<sub>4</sub>).

*Ключевые слова:* метеорологический потенциал загрязнения атмосферы, рассеивающая способность атмосферы, метеоэлементы, концентрации загрязняющих веществ, инверсии, приземный слой атмосферы, индекс загрязнения атмосферы; meteorological air pollution potential, diffusing capacity of the atmosphere, meteorological parameters, air pollutant concentration, inversions, atmospheric surface layer, air pollution index.

В настоящее время имеется целый ряд показателей, рассчитывающих метеорологический потенциал загрязнения атмосферы, которые учитывают различные сочетания метеоэлементов [1–3]. В Российской Федерации (РФ) в качестве такого показателя используется климатический показатель ПЗА, разработанный Э.Ю. Безуглой в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова [4]. Показатель рассчитывается через математический функционал с использованием данных по повторяемости: скоростей ветра 0–1 м/с, приземных инверсий, застойных ситуаций и количества часов за год с туманом. По сочетанию этих факторов выделено 5 классов опасных значений ПЗА, ведущих к определенному уровню загрязнения атмосферы – низкому, умеренному, повышенному, высокому и очень высокому. Районирование территории РФ (СССР) по этому показателю до сих пор используется для описания климатических условий местности с точки зрения ее способности к самоочищению. Этот показатель фигурирует во всех климатических атласах и методических документах. Однако малочисленность станций аэрологического зондирования в РФ, сложность математических расчетов делают этот показатель непригодным для оперативной и детальной оценки загрязнения атмосферы при промышленном освоении новых территорий. На эти же причины накладывается потепление климата, которое могло привести к изменению климатических рамок, заложенных для выделения границ тех или иных классов ПЗА.

Метеорологический потенциал загрязнения атмосферы (МПЗА), в первой редакции МПА, предложенный Селегей [5], учитывает ряд недостатков, присущих ПЗА. Для его расчета не требуются данные аэрологического зондирования, а используется простая метеорологическая информация, имеющаяся на любой метеостанции. Суть этого метода заключается в следующем.

Известно, что одним из основных метеорологических параметров, способствующих накоплению вредных примесей в приземном слое воздуха, является повторяемость малых скоростей ветра 0–1 м/с. Эффект накопления загрязняющих примесей в атмосфере усиливают туманы, в некоторых случаях при этом увеличивается и токсичность примесей. Именно эти параметры и были взяты как факторы, способствующие загрязнению атмосферы.

Для характеристики факторов, способствующих самоочищению атмосферного воздуха (АВ), предлагалось считать повторяемость числа дней с сильным ветром, способным вынести вредные примеси из очага загрязнения, а также повторяемость дней с осадками, которые путем вымывания очищают АВ. Установлено [6], что скорость ветра, способная вынести вредные вещества из города, должна быть не менее 6 м/с. Это обусловлено тем, что в промышленном городе обычно существуют два максимума роста концентраций загрязняющих веществ: один при ветрах 0–1 м/с за счет выбросов многочисленных низких источников, другой при ветрах 4–6 м/с за счет выбросов высоких источников. Для количества осадков, способных осадить придорожную пыль и другие аэрозоли, предлагалась величина 0,5 мм и более в сутки. Метеорологический

\* Тамара Семёновна Селегей (selegey@sibnigmi.ru); Надежда Никифоровна Филоненко; Татьяна Николаевна Ленковская.

потенциал загрязнения атмосферы рассчитывается по формуле

$$\text{МПЗА} = (P_{0-1} + P_{\tau}) / (P_{\text{ос}} + P_{\geq 6}), \quad (1)$$

где  $P$  – повторяемость, %:  $P_{0-1}$  – скоростей ветра 0–1 м/с,  $P_{\tau}$  – дней с туманом,  $P_{\text{ос}}$  – дней с осадками  $\geq 0,5$  мм,  $P_{\geq 6}$  – скоростей ветра  $\geq 6$  м/с.

Чем больше по абсолютной величине МПЗА, тем хуже условия для рассеивания примесей в атмосфере. Если МПЗА меньше единицы, то в рассматриваемый отрезок времени повторяемость процессов, способствующих самоочищению атмосферы, преобладает над повторяемостью процессов, способствующих накоплению в ней вредных примесей, и наоборот.

Описание метода впервые было опубликовано в 1990 г. и получило достаточно широкое одобрение у специалистов-экологов. Критика метода сводилась в основном к трем аспектам: несоответствие прежнего названия показателя (МПА) его смыслу, недостаточная проработка вопроса граничных условий для районирования территорий, а также неучет повторяемости дней с инверсиями.

Цель данной статьи – усовершенствование методики определения метеорологического потенциала атмосферы с учетом вышесказанных замечаний.

Прежнее название показателя трактовалось как метеорологический потенциал рассеивающей способности атмосферы (МПА) и действительно не соответствовало физическому смыслу получаемых величин. В новой версии методики вместо старого названия показателя МПА предлагается его новое звучание: МПЗА – метеорологический потенциал загрязнения атмосферы, с увеличением которого происходит усиление загрязнения АВ.

Уточнение граничных условий для районирования территорий по МПЗА было осуществлено для территории Западной Сибири по данным Западно-Сибирского и Обь-Иртышского УГМС Росгидромета по 196 метеостанциям за 1986–2010 гг. Для этих целей по формуле (1) были рассчитаны ежегодные, средние за 25 лет значения МПЗА, а также найдены его среднеквадратические отклонения и линейно-временные тренды.

Среднеквадратические отклонения  $\sigma$  для МПЗА = 1 составили  $\pm 0,2$ ; при МПЗА = 2  $\sigma$  возросли до  $\pm 0,3$ ; при МПЗА = 3  $\sigma = \pm 0,4$ . Картирование территории Западной Сибири по значениям среднеквадратических отклонений показало, что наиболее стабильной территорией с  $\sigma = \pm 0,0 \dots \pm 0,2$  является часть Западно-Сибирской низменности, протянувшаяся от арктических широт до южных районов Тюменской и Омской областей. Самыми нестабильными территориями оказались районы междуречья Оби и Иртыша, районы Северного Урала, предгорные и горные районы Алтайского края, Кемеровской области и Республики Алтай. Здесь среднеквадратические отклонения МПЗА колебались в пределах  $\pm 0,3 \dots \pm 0,4$ .

Исходя из полученных результатов межгодовой изменчивости МПЗА, предлагаются следующие граничные условия для выделения территорий по степени их предрасположенности к накоплению

или рассеиванию примесей: МПЗА < 0,8 – зона с благоприятными условиями для рассеивания примесей; МПЗА = 0,8 ... 1,2 – буферная зона или зона риска, в которой с одинаковой вероятностью могут наблюдаться процессы, способствующие как загрязнению АВ, так и его самоочищению; МПЗА = 1,2 ... 2,4 – зона с неблагоприятными условиями для рассеивания примесей и МПЗА > 2,4 – зона с крайне неблагоприятными условиями для рассеивания примесей.

Что касается учета повторяемости приземных инверсий, то методика определения МПЗА разрабатывалась в 80-е гг. XX в., когда происходило промышленное освоение новых территорий в Западной и Восточной Сибири путем создания территориально-промышленных комплексов. Требовалась детальная предварительная проработка метеорологических ресурсов местности для планирования и размещения новых производств. А это невозможно было сделать с помощью ПЗА из-за отсутствия аэрологических данных. Поэтому было необходимо разработать аналог ПЗА без учета повторяемости инверсий. Мы считали, что учет факторов термического вертикального перемешивания примесей в приземном слое атмосферы происходит априори через учет повторяемости скоростей ветра 0–1 м/с и числа дней с туманом, которые, как правило, на 75–90% сопровождаются инверсиями, особенно в условиях Западной Сибири [7]. Достаточность учета малых скоростей ветра (0–1 м/с) и туманов подтверждается очень тесной связью между МПЗА и ПЗА. По данным [8], коэффициент корреляции между этими величинами  $r = 0,98$ , а сама зависимость выражается уравнением регрессии:

$$\text{ПЗА} = 0,83\text{МПЗА} + 1,95.$$

Кроме того, утверждение о том, что инверсия температуры воздуха является одним из приоритетных и определяющих факторов в формировании высоких уровней загрязнения атмосферы, все чаще в специальной литературе встречает критику. Например, в [9] отмечается, что выявить какую-либо ощутимую закономерность появления высокого загрязнения атмосферного воздуха сернистым ангидридом в зависимости от температурной стратификации в условиях сибирских городов не удалось. Японские ученые, исследовавшие появление высоких концентраций взвешенных веществ в Цукубе и Токио, обнаружили, что оно слабо зависит от вертикального распределения температуры воздуха. Главенствующую роль в этом процессе они отдали скорости ветра. Для городов Монголии, находящихся в условиях резко континентального климата, выявлен эффект уменьшения концентраций примесей при формировании мощных и интенсивных инверсий [10]. И это происходит в результате того, что в более мощных инверсиях чаще всего наблюдаются небольшие градиенты температуры (менее 1 °С). Даже зимой в условиях Западной Сибири только четвертая часть, а летом лишь десятая часть всех мощных инверсий имеют градиенты выше 1 °С [7]. Но и для инверсионных слоев небольшой мощности с малым перепадом температур воздуха

в зимнее время выбросы вредных веществ в атмосферу могут легко пробивать инверсионные слои и не приводить к увеличению загрязнения атмосферного воздуха у Земли.

С учетом внесения поправок в методику определения МПЗА был произведен анализ его территориальных и временных колебаний на территории Западной Сибири в рассматриваемый 25-летний период времени.

Как выяснилось, средние за 25-летний период значения МПЗА на территории Западной Сибири колебались от 0,09 (Ныда, Ямало-Ненецкий автономный округ) до 4,05 (Кош-Агач, Республика Алтай), хотя в отдельные годы минимальные значения МПЗА опускались в Ныде до 0,06 (2002 г.), а максимальные в Кош-Агаче поднимались до 5,93 (2002 г.).

Районирование территории Западной Сибири по новым граничным условиям было произведено для его средних за 25-летний период значений, на начало периода (1986 г.) и его конец (2010 г.).

Средняя за 25-летний период картина распределения МПЗА показала, что большая часть региона имела хорошие условия для рассеивания примесей (МПЗА < 0,8). Неблагоприятные условия для рассеивания примесей (МПЗА > 1,2) складывались лишь на Северном Урале, а также на юго-восточных окраинах региона. Однако если сравнивать картину распределения МПЗА на начало периода (рис. 1, а) и его конец (рис. 1, б), то видно, что за прошедшие годы произошло существенное сокращение территорий региона, где отмечались благоприятные условия для рассеивания примесей. Эта территория сузилась как с западной, так и с восточной стороны на 300–500 км, оставив лишь неширокий продуваемый коридор, вытянутый с севера на юг вдоль Западно-Сибирской низменности, где условия для рассеивания примесей оставались благоприятными. Этот процесс наглядно виден по картированию изолиний пространственно-временных трендов МПЗА, выраженных в процентах (рис. 1, в), где зона с положительными трендами МПЗА накрывала большую территорию Западной Сибири. За прошедший промежуток времени улучшились условия для рассеивания примесей (отрицательные тренды) только на арктической территории Ямало-Ненецкого автономного округа, на междуречье Оби и Иртыша, а также отдельными очагами на южных окраинах региона.

Анализ причин такого явления показал, что ухудшение условий для рассеивания примесей произошло за счет сокращения повторяемости скоростей ветра  $\geq 6$  м/с ( $P_{\geq 6}$ ) с одновременным увеличением повторяемости слабых ветров 0–1 м/с ( $P_{0-1}$ ). По данным [11], уменьшение среднегодовых скоростей ветра и его градаций  $\geq 6$  м/с в последние десятилетия наблюдалось на территории не только Западной Сибири, но и всей России. Среди причин такого явления авторы отмечают уменьшение градиентов давления, что, на наш взгляд, могло быть следствием потепления климата. Кроме того, анализ паспортов метеостанций, у которых тренд МПЗА оказался неоправданно завышенным по сравнению с близлежащими станциями (Кулунда,

Ключи, Мошково), выявил у них наличие экранирования метеоплощадок за счет подросших деревьев или строительства высоких домов и прочих строений в непосредственной близости.

Для подтверждения того факта, что ухудшение метеорологической обстановки для рассеивания примесей на территории Западной Сибири привело к ухудшению качества АВ в городах региона, необходимо было показать связь трендов МПЗА с реальными трендами загрязняющих веществ в них.

По логике рассуждений МПЗА должен сравниваться с неким обобщенным показателем качества воздуха, в роли которого в РФ используется так называемый индекс загрязнения атмосферы (ИЗА<sub>5</sub>), который рассчитывается по пяти самым высоким значениям среднегодовых концентраций с помощью формулы

$$\text{ИЗА}_m = \sum_1^m (Q_{срi} / \text{ПДК}_{срi})^{k_i}, \quad (2)$$

где  $m$  – количество учитываемых примесей (в нашем случае  $m = 5$ );  $Q_{срi}$  – среднегодовая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>;  $\text{ПДК}_{срi}$  – среднесуточная предельно допустимая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>;  $k_i$  – безразмерная константа приведения степени вредности  $i$ -го загрязняющего вещества к веществам третьего класса опасности. Для веществ 4, 3, 2 и 1-го класса опасности  $k_i$  соответственно равны 0,9; 1,0; 1,3 и 1,5 [12].

Основным недостатком ИЗА<sub>5</sub> является то обстоятельство, что набор пяти примесей с самыми высокими среднегодовыми концентрациями в каждом городе будет разным, поэтому сравнивать уровень загрязнения атмосферы городов с помощью ИЗА<sub>5</sub> не совсем корректно. Нами для такого сравнения были рассчитаны индексы загрязнения атмосферы по четырем основным примесям (взвешенным веществам, сернистому ангидриду, диоксиду азота и оксиду углерода), наблюдения за которыми велись почти во всех городах Западной Сибири. Эти вещества присутствуют в атмосфере каждого города в результате сжигания любых видов топлива и составляют по массе 80–90% городского вала выбросов.

Для периода 2000–2010 гг., когда эмиссии вредных веществ несколько стабилизировались после резкого спада в 90-е гг., для городов Западной Сибири, где осуществлялся контроль за состоянием АВ, были найдены линейные тренды МПЗА и ИЗА<sub>4</sub> (таблица).

Как видно, в подавляющем большинстве городов региона отмечалась тенденция увеличения индекса загрязнения атмосферы (ИЗА<sub>4</sub>) при возрастании показателя МПЗА. Из этой закономерности выпадают лишь три города: Ханты-Мансийск, Тобольск и Барнаул. Очевидно, формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в первых двух городах подвержено влиянию адвекции воздушных потоков со стороны северных газонефтедобывающих районов, на которых в большом количестве выделяются оксиды азота и углерода при сжигании попутного газа в факелах. Причина отрицательного тренда ИЗА<sub>4</sub> в Барнауле не выявлена. В Новокузнецке ухудшение рассеивающей

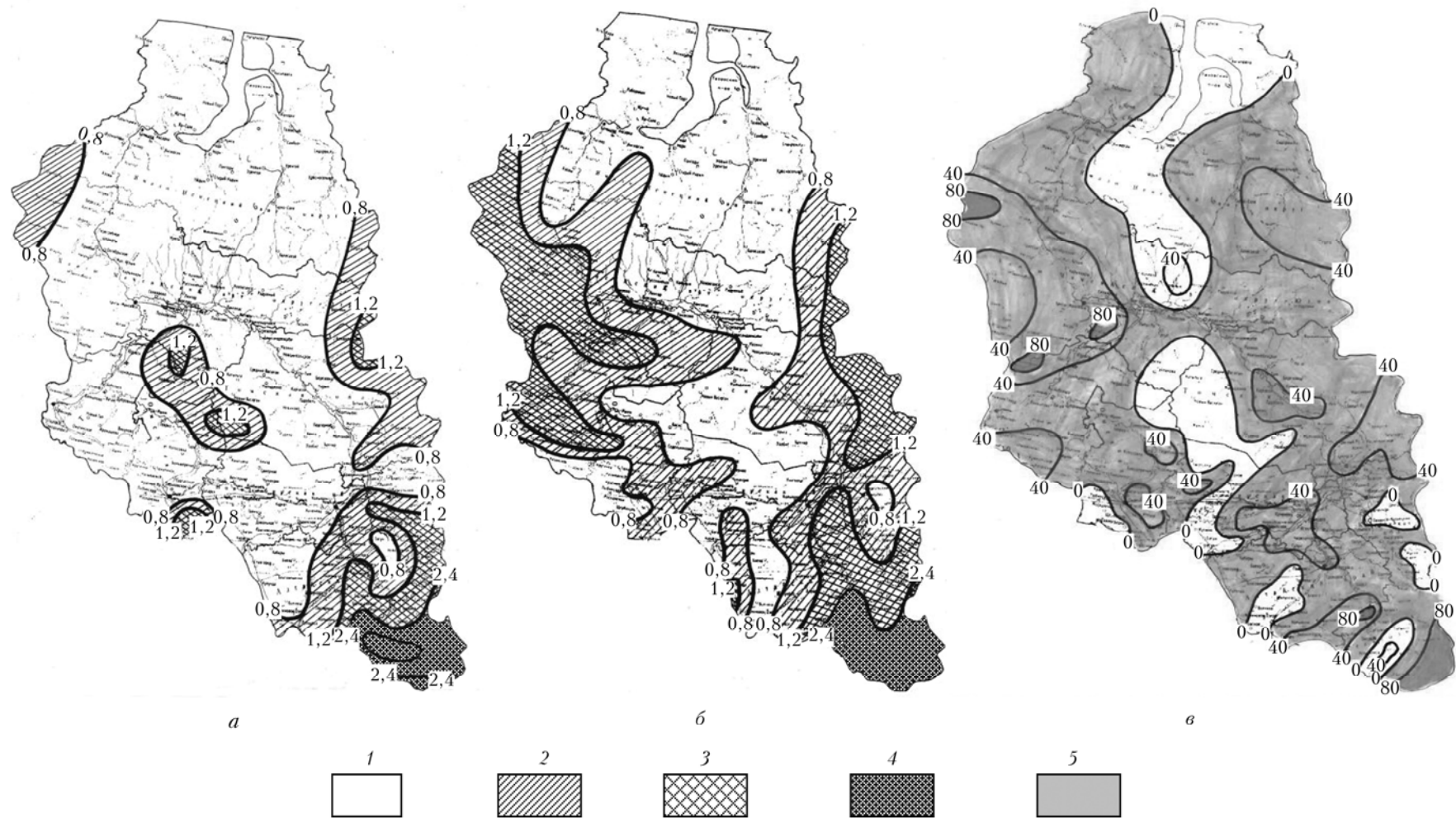


Рис. 1. Метеорологический потенциал загрязнения атмосферы территории Западной Сибири по состоянию на 1986 г. (*а*), 2010 г. (*б*) и его тренды за 1986–2010 гг. (*в*). 1 – благоприятные условия для рассеивания примесей; 2 – буферные зоны, где с одинаковой вероятностью могут наблюдаться как благоприятные, так и неблагоприятные условия; 3 – неблагоприятные условия; 4 – крайне неблагоприятные условия; 5 – положительный тренд МПЗА

Линейные тренды МПЗА и ИЗА<sub>4</sub> по городам Западной Сибири за период 2000–2010 гг.

Линейные тренды	Новосибирск	Искитим	Бердск	Томск	Кемерово	Новокузнецк	Заринск	Барнаул	Бийск	Омск	Тюмень	Нижневартовск	Ханты-Мансийск	Салехард	Тобольск
МПЗА	0,25	0,34	0,25	0,54	0,14	0,16	0,00	0,67	0,48	0,35	0,29	0,00	0,59	0,18	0,57
ИЗА <sub>4</sub>	0,39	1,35	0,79	1,10	0,47	0,00	0,95	-0,50	0,45	0,20	0,20	0,30	-1,14	0,00	-0,59

способности атмосферы на фоне продолжающегося сокращения выбрасываемых в атмосферу загрязняющих веществ привело к нулевому тренду ИЗА<sub>4</sub>, т.е. уровень загрязнения атмосферы в городе за рассматриваемое десятилетие оставался неизменным.

В [13] приведены коэффициенты корреляции между МПЗА и среднегодовыми концентрациями отдельных примесей для городов Западной Сибири, которые, как правило, показывают прямой характер связи между этими величинами, т.е. с ухудшением метеорологических условий в атмосфере увеличивается ее загрязнение. Полученные результаты свидетельствуют, что такая зависимость гораздо сложнее, чем это трактуется в классическом представлении. Например, для твердых частиц связь носит отрицательный характер, так как уровень загрязнения АВ твердыми частицами в большинстве городов региона формируется не за счет эмиссий этой примеси, а за счет сдувания крупнодисперсной пыли в переходные периоды после схода снега (весной) и при оголении земли осенью при увеличении скоростей ветра.

Таким образом, предложенная методика определения МПЗА подтвердила свою жизнеспособность и может использоваться как для районирования территорий с точки зрения их метеорологических ресурсов при промышленном освоении новых районов, так и для обоснования изменения уровней загрязнения АВ по отдельным ингредиентам и в целом по ИЗА. В этом случае полученные связи, конечно, нестабильны. Они лишь показывают зависимость между МПЗА и средними концентрациями на каком-то этапе времени для конкретного города, где проводились наблюдения за гигиеническим состоянием атмосферного воздуха. При этом нужно помнить, что зависимости между МПЗА и среднегодовыми концентрациями получаются значимыми в условиях стабильного состояния выбросов вредных веществ в атмосферу и отсутствия адвекции из других регионов.

1. Крючков В.В. Природа и человек. М.: Наука, 1979. 127 с.
2. Сорокина Л.П. Климатические аспекты формирования экологических проблем в Восточной Сибири // Геогр. и природ. ресурсы. 1995. № 3. С. 51–58.

*T.S. Selegei, N.N. Filonenko, T.N. Lenkovskaya. On the method of determining meteorological air pollution potential.*

The paper presents the improved method of determining meteorological air pollution potential (MAPP) based on the use of surface meteorological data available for any weather station in Russia. Testing of the methods was performed on the data obtained from 196 weather stations in Western Siberia during the period 1986 to 2010. Boundary conditions to distinguish areas with different meteorological resources for dispersion of pollutants were specified. Interannual and territorial variability of MAPP was analyzed. Correlation coefficients were found between the MAPP values and the levels of air pollution with both separate ingredients and a pollution index as a whole (APS<sub>4</sub>).

3. Степаненко С.Н., Овчинникова Н.Б., Волошин В.Г., Гончаренко Н.Н. Метеорологический фактор разбавления примеси как показатель потенциала атмосферы // Украинский гидрометеорологический журнал. 2007. Вып. 2. С. 5–15.
4. Безуглая Э.Ю. Метеорологический потенциал и климатические особенности загрязнения воздуха городов. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 484 с.
5. Селегей Т.С., Юрченко И.П. Потенциал рассеивающей способности атмосферы // Геогр. и природ. ресурсы. 1990. № 2. С. 132–137.
6. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86: Общесоюзный нормативный документ. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 93 с.
7. Лебединский А.Б., Осокина В.Г. Некоторые особенности инверсий температуры воздуха на юго-востоке Западной Сибири // Труды ЗапСибРНИГМИ. 1975. Вып. 16. С. 108–113.
8. Степанова И.В., Шлычков А.П. Влияние комплекса метеорологических условий на загрязнение атмосферного воздуха города. Саратов: ООО «Итеос», 2008. С. 4–12.
9. Введенская Л.И., Володкевич Т.Г., Леонтович И.П., Шевчук И.А. Некоторые характеристики метеорологических и аэрологических условий для задымления в г. Новосибирске // Труды НИИАК. 1967. Вып. 48. С. 177–182.
10. Мажиг Ч., Сонькин Л.Р., Цэрэндэлэг Ж. Прогнозирование загрязнения воздуха в городах в условиях резко континентального климата // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы: Итог сотрудничества социалистических стран (вып. 3). Л.: Гидрометеониздат, 1988. С. 115–122.
11. Баранова А.А., Голод М.П., Меццарская А.В. Изменение градуированных скоростей ветра на территории России во второй половине XX века // Труды ГГО. 2007. № 556. С. 116–137.
12. РД 52.04.66-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. 52 с.
13. Селегей Т.С., Филоненко Н.Н., Ленковская Т.Н. Загрязнение атмосферного воздуха в зависимости от метеорологических факторов // Тезисы докл. 2-й Всерос. науч. конф. с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии». Барнаул, 25–29 августа 2014. Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2014. С. 307–314.