

## МЕТОДИКА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ВОРОНЕЖЕ

А. В. Назаренко, С. А. Дьяков

*Воронежский государственный университет  
Воронежское высшее военное авиационное инженерное училище*

Представлена методика краткосрочного прогноза концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и практические рекомендации потребителю по ее применению. Проведен корреляционный анализ взаимосвязи концентраций антропогенных примесей с метеорологическими величинами и параметрами атмосферы. На основе метода множественной регрессии составлены прогностические уравнения для теплого, холодного и переходного сезонов года по классам синоптических процессов.

Одной из важных задач по охране окружающей среды является защита воздушного бассейна от чрезмерного загрязнения в результате хозяйственной деятельности человека.

В проведенных ранее работах большое внимание уделялось диагнозу уровня загрязнения атмосферы, а именно, районированию территорий городов, регионов по степени экологической напряженности на воздушный бассейн. Прогнозу же уровня загрязнения атмосферы уделялось мало внимания. Вместе с тем, прогноз позволяет предвидеть изменения уровня загрязнения атмосферы и дать время для принятия мер по предотвращению неблагоприятных последствий [3].

Методика прогноза уровня загрязнения атмосферы разработана с учетом физико-географических условий, классов синоптических процессов, сезонов года, локальных особенностей. Она позволяет повысить качество оценки геоэкологического состояния воздушного бассейна и разработать эффективные мероприятия по охране чистоты атмосферы.

Разработанный физико-статистический метод прогноза загрязнения воздуха в г. Воронеже, основан на учете физических особенностей распространения примесей в атмосфере и связей между концентрациями примесей и метеорологическими параметрами.

При разработке прогностических алгоритмов использовались результаты наблюдений за загрязнением атмосферы и основных метеовеличин, измеренных на пяти постах города Воронежа за 10 лет в период с 1990 по 1999 гг., а также призем-

ные карты погоды, карты барической топографии, данные радиозондирования атмосферы.

Разработке прогностических схем предшествовал анализ связей между концентрациями примесей в воздухе и метеорологическими условиями.

Комплекс сочетания метеорологических величин и явлений погоды определяет конкретная синоптическая ситуация, являющаяся частью синоптического процесса. Поэтому все типы синоптических ситуаций были сгруппированы в пять классов синоптических процессов по условиям накопления и рассеяния антропогенных примесей в атмосфере [4].

Составление схемы прогноза загрязнения воздуха осуществлялось методом линейного регрессионного анализа.

При использовании метода множественной линейной регрессии предиктант (в нашем случае  $q_{kv}$ ) в зависимости от предикторов находился в следующем виде:

$$\bar{q}_{kv} = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i X_i, \quad (1)$$

где  $X_i$  – предикторы;  $a_i$  – весовые коэффициенты;  $a_0$  – свободный член;  $a_0$  и  $a_i$  находятся методом наименьших квадратов при обработке фактического материала наблюдений [1].

В качестве предиктанта рассматривались средние концентрации загрязняющих веществ по пяти постам г. Воронежа, которые находились по формуле:

$$\bar{q}_{kv} = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{m} \sum_i^n \sum_j^m q_{ij}, \quad (2)$$

где,  $\bar{q}_{kv}$  – средняя за  $k$ -ый день по всем постам концентрация  $v$ -го вещества;  $q_{ij}$  – концентрация вещества, измеренная на  $i$ -ом посту за  $j$ -ый замер в течение дня;  $n$  – число постов в городе;  $m$  – число замеров в течение дня.

В качестве предикторов были использованы следующие метеовеличины и параметры:

$q'$  – средняя концентрация данного вещества за предшествующий день;

$v_3$  – средняя за  $k$ -ый день скорость ветра у земли (м/с);

$T$  – средняя за  $k$ -ый день температура воздуха у земли ( $^{\circ}\text{C}$ );

$f$  – средняя за  $k$ -ый день относительная влажность воздуха у земли (%);

$v_{925}$  – скорость ветра на высоте 925 гПа за 03-04 ч.  $k$ -ых суток (м/с);

$v_{cp}$  – средняя скорость ветра в слое 100 ÷ 600 м за 03-04 ч.  $k$ -ых суток (м/с);

$DT_{adv}$  – суточное изменение температуры между  $T$  за  $k$ -ый день и предшествующий день ( $k-1$ ) и равно:  $DT_{adv} = T_k - T_{k-1}$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$(T-T_{925})$  – разность температуры измеренной у земли и на высоте 925 гПа за 03-04 ч.  $k$ -ых суток;

$H_{md}$  – высота слоя термодинамического перемешивания на  $k$ -ый день (м);

$H_{инв}$  – высота слоя инверсии за 03-04 ч.  $k$ -ых суток (м);

$DH$  – мощность инверсии за 03-04 ч.  $k$ -ых (м);

$Dt$  – интенсивность инверсии за 03-04 ч.  $k$ -ых суток ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\mathcal{E}$  – коэффициент эффективности инверсии за 03-04 ч.  $k$ -ых суток, равный в упрощенном виде:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} DH \cdot Dt \quad [2].$$

Для выявления взаимосвязи между концентрациями загрязняющих веществ и метеопараметрами использовался корреляционный анализ. Корреляционный анализ проводился при различных классах синоптических процессов для того, чтобы учесть как можно больше факторов, влияющих на концентрацию загрязняющих веществ. В результате проведенного корреляционного анализа были получены корреляционные матрицы для различных сезонов года и классов синоптических процессов.

При анализе полученных корреляционных матриц были выделены предикторы, имеющие максимальные значения коэффициентов корреляции с предиктантами.

В теплый период года при 1 классе синоптических процессов концентрации большинства загрязняющих веществ зависимы от  $f, \mathcal{E}, Dt, T$  и  $(T-T_{925})$ ; при 2 классе – от  $f, T, v_3$  и  $v_{925}$ ; при 3 и 4 классах – от  $T, f, (T-T_{925})$ ; при 5 классе – от  $f, H_{md}, H_{инв}, DH$ , а также  $T$  и  $DT_{adv}$ .

Переходный период года при 1 классе синоптических процессов характеризуется наибольшими коэффициентами корреляции между концентрациями загрязняющих веществ и  $f, v_{cp}$ ; при 2 классе – с  $DH, Dt, \mathcal{E}, f, v_3$ ; при 3 классе – с  $DT_{adv}, v_3$  и  $T$ ; при 4 и 5 классе – с  $T, f$  и  $H_{md}$ .

В холодный период года данная зависимость наблюдается при 1 классе – с  $f$  и  $v_{925}$ ; при 2 классе – с  $f$  и  $DT_{adv}$ ; при 3 классе – с  $T, DT_{adv}$  и  $(T-T_{925})$ ; при 4 классе – с  $H_{инв}, (T-T_{925}), v_3$  и  $DT_{adv}$ ; при 5 классе – с  $DT_{adv}, f$  и  $(T-T_{925})$ .

В результате корреляционного анализа было установлено, что наибольшие физико-статистические зависимости между концентрацией антропогенных примесей и метеовеличинами, параметрами атмосферы прослеживаются во все сезоны года при 4 и 5 классах (особенно в теплый период года, таблица), а также при 2 и 3 классе в теплый и холодный периоды года.

Наиболее коррелируемыми метеовеличинами в течение года являются: относительная влажность, скорость ветра и температура воздуха у земли, а также разность температур воздуха в слое от земли до высоты 925-ой изобарической поверхности. Помимо вышеназванных метеовеличин, в холодный период наблюдаются максимальные коэффициенты корреляции концентрации загрязняющих веществ с адвективными изменениями температуры воздуха у земли за сутки.

Наибольшие значения коэффициентов корреляции между среднесуточными концентрациями примесей отмечаются при 1 и 5 классах.

Было получено 150 прогностических уравнений. В формулах 3-12 представлены лучшие уравнения для прогноза концентраций загрязняющих веществ в теплый период года:

$$PL = 5,24 + 0,46q' + 0,16DT_{adv} - 0,034f + 0,0004H_{md} + 0,012(T - T_{925}), \quad (3)$$

где  $R = 0,96, s = 0,5, h = 0,3$  (4 класс);

$$SO_2 = 1,39 + 0,35q' + 0,02v_{cp} - 0,04T + 0,05DT_{adv} - 0,006f - 0,0004H_{md}, \quad (4)$$

где  $R = 0,79, s = 0,2, h = 0,2$  (4 класс);

Коэффициенты корреляции между  $q_{kv}$  и метеопараметрами в теплый период года при 4 классе синоптических процессов

	$v_3$	$v_{925}$	$v_{cp}$	$T$	$DT_{adv}$	$f$	$H_{m0}$	$T-T_{925}$	$H_{инв}$	$DH$	$Dt$	$\mathcal{E}$	$q'$
пыль	<b>-0,17</b>	<b>0,13</b>	0,13	<b>0,45</b>	<b>0,15</b>	<b>-0,35</b>	<b>0,51</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,26</b>	0,11	0,11	0,07	<b>0,79</b>
SO <sub>2</sub>	0,10	-0,12	-0,13	<b>-0,22</b>	<b>0,16</b>	<b>-0,30</b>	0,06	0,06	0,04	-0,03	<b>-0,16</b>	<b>-0,22</b>	<b>0,61</b>
CO	-0,04	0,06	0,14	0,13	0,06	<b>-0,26</b>	<b>0,15</b>	<b>-0,26</b>	0,12	0,10	<b>0,57</b>	<b>0,47</b>	<b>0,29</b>
NO <sub>2</sub>	0,01	0,01	-0,12	<b>0,41</b>	0,09	<b>-0,47</b>	<b>0,42</b>	-0,10	-0,12	<b>0,36</b>	<b>0,23</b>	<b>0,33</b>	<b>0,13</b>
NO	<b>0,32</b>	0,11	<b>0,15</b>	<b>0,23</b>	<b>-0,46</b>	<b>-0,20</b>	0,00	<b>0,27</b>	<b>0,48</b>	0,09	<b>0,16</b>	<b>0,15</b>	<b>0,85</b>
фенол	<b>-0,35</b>	<b>-0,42</b>	<b>-0,32</b>	<b>-0,20</b>	0,12	<b>0,33</b>	0,11	<b>0,28</b>	-0,02	<b>-0,38</b>	<b>-0,26</b>	<b>-0,28</b>	<b>0,88</b>
NH <sub>3</sub>	-0,01	-0,01	-0,02	0,03	<b>-0,34</b>	<b>0,39</b>	0,09	<b>0,37</b>	<b>0,44</b>	<b>-0,44</b>	0,06	-0,01	<b>0,48</b>
форм-гид	-0,01	0,06	-0,01	0,04	<b>-0,21</b>	-0,08	<b>0,34</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,31</b>	<b>0,26</b>	-0,09	-0,05	<b>0,21</b>
сажа	<b>0,28</b>	<b>0,70</b>	<b>0,72</b>	<b>0,63</b>	<b>0,15</b>	<b>-0,35</b>	<b>0,16</b>	-0,08	0,07	<b>0,51</b>	<b>0,19</b>	<b>0,30</b>	<b>0,20</b>
аэро-золь	<b>0,18</b>	<b>0,35</b>	<b>0,46</b>	<b>0,43</b>	0,09	0,00	<b>-0,34</b>	0,13	<b>0,18</b>	0,02	<b>-0,15</b>	-0,08	<b>0,15</b>

$$CO = -0,005 + 0,61q' + 0,03T - 0,08DT_{adv} + 0,02(T - T_{925}) - 0,0009\mathcal{E}, \quad (5)$$

где  $R = 0,75$ ,  $s = 0,4$ ,  $h = 0,3$  (3 класс);

$$NO_2 = 5,64 + 0,53q' - 0,9v_3 - 0,1DT_{adv} - 0,05f + 0,002H_{m0} - 0,005H_{инв}, \quad (6)$$

где  $R = 0,88$ ,  $s = 1,7$ ,  $h = 1,4$  (2 класс);

$$NO = 4,76 + 0,4q' + 0,1v_3 + 0,04T - 0,18DT_{adv} - 0,06f + 0,0002\mathcal{E}, \quad (7)$$

где  $R = 0,97$ ,  $s = 0,3$ ,  $h = 0,2$  (4 класс);

$$FE = 4,24 + 0,96q' + 0,18v_{cp} - 0,09T - 0,03f + 0,02(T - T_{925}) - 0,005DH, \quad (8)$$

где  $R = 0,93$ ,  $s = 0,3$ ,  $h = 0,2$  (4 класс);

$$NH_3 = -13,71 + 0,45q' + 0,15f + 0,004H_{m0} + 0,002H_{инв} + 0,0008DH, \quad (9)$$

где  $R = 0,95$ ,  $s = 0,6$ ,  $h = 0,4$  (4 класс);

$$FO = -40,32 - 2,1DT_{adv} + 0,4f - 0,02H_{m0} - 0,97(T - T_{925}) - 0,009H_{инв} + 0,02DH, \quad (10)$$

где  $R = 0,95$ ,  $s = 2,1$ ,  $h = 1,6$  (4 класс);

$$SA = 0,13 + 0,5q' + 0,19DT_{adv} + 0,0008H_{m0} + 0,18(T - T_{925}) + 0,0002DH, \quad (11)$$

где  $R = 0,89$ ,  $s = 0,5$ ,  $h = 0,4$  (5 класс);

$$H_2SO_3 = 0,32 + 0,14q' + 0,05v_{cp} + 0,007DT_{adv} - 0,0004H_{m0} + 0,0004H_{инв} - 0,1Dt, \quad (12)$$

где  $R = 0,94$ ,  $s = 0,1$ ,  $h = 0,1$  (4 класс).

Здесь  $R$  – множественный коэффициент корреляции уравнений регрессии;  $s$  – среднеквадратическая ошибка прогноза,  $h$  – средняя абсолют-

ная ошибка прогноза, полученные по исходному материалу.

Разработанные уравнения оценивались на независимом материале с помощью основных критериев оценки количественных прогнозов:  $r$  – коэффициент корреляции между прогностическим и фактическим значениями концентрации,  $s$  – среднеквадратическая ошибка прогноза,  $h$  – средняя абсолютная ошибка прогноза и качественного критерия  $U$  – общая оправдываемость прогноза (%) [6].

Оценка методики прогноза концентраций загрязняющих веществ дала следующие результаты. Прогностические уравнения, полученные для 3, 4 и 5 классов синоптических процессов имеют лучшие оценочные критерии ( $r = 0,70 \div 0,95$ ), чем для 1 и 2 классов ( $0,45 \div 0,80$ ). В целом же прогностические уравнения достаточно эффективны.

Оправдываемость разработанных уравнений для прогноза концентрации загрязняющих веществ колеблется от 70 до 91%, имея максимальные значения по большинству примесей в теплый период года, минимальные – в переходный период года. При этом в теплый период года наибольшую успешность имеют уравнения для прогноза пыли (PL), оксида азота (NO), сажи (SA), оксида углерода (CO), формальдегида (FO), двуокиси азота (NO<sub>2</sub>), и аммиака (NH<sub>3</sub>); в холодный период года – фенола (FE) и сажи (SA); в переходный период – диоксид серы (SO<sub>2</sub>) и аэрозоль серной кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>).

Проведен сравнительный анализ разработанной методики с методиками прогноза на сутки параметра  $P$  с учетом допустимых градаций. При этом рассматривались прогностические уравнения

для г. Москвы, представленные в РД 52.04.306-92 [4] и прогностические правила, разработанные УГМС ЦЧО для г. Воронежа. Сравнительный анализ показал, что для г. Воронежа разработанный метод прогноза концентраций имеет общую оправданность больше на  $8 \div 12 \%$ , чем прогнозы параметра  $P$  указанных выше способов.

На основе результатов исследования разработаны практические рекомендации по применению разработанной методики, представленные в виде блок-схемы на рис.

Сущность комплексного анализа состоит в изучении с помощью карт погоды и других материалов состояния атмосферы над рассматриваемой географической территорией.

На основе комплексного анализа синоптических процессов протекающих в атмосфере при использовании правила ведущего потока, экстраполяционных методов разрабатывается прогноз синоптического положения на сутки.

Сущность прогноза синоптического положения состоит в решении вопросов, касающихся положения и интенсивности развития основных синоптических объектов и определения тех из них, которые будут обуславливать погоду данного района [6].

Разработанный прогноз синоптического положения на сутки позволяет определить синоптическую ситуацию, которая будет наблюдаться над районом г. Воронежа и класс синоптических процессов, благоприятный для накопления или рассеяния примесей в атмосфере.

Следующим шагом при разработке прогноза уровня загрязнения атмосферы является прогноз на сутки метеовеличин и параметров, использующихся в разработанных прогностических уравнениях, составленных в зависимости от ожидаемого класса синоптических процессов и сезонов года.

Прогностические значения метеовеличин и параметров задерживающих слоев подставляются в регрессионные уравнения и вычисляются концентрации десяти загрязняющих веществ.

После расчета значений концентраций примесей оценивается уровень загрязнения атмосферы, который характеризуется величинами концентраций примесей относительно ПДК<sub>сс</sub> и среднемесячного значения в г. Воронеже.

Если прогнозируемая величина концентрации меньше среднемесячного значения – пониженный уровень загрязнения, если больше – то говорят о повышенном уровне загрязнения; при значениях концентраций больше ПДК<sub>сс</sub> (среднесуточное



Рис. Алгоритм краткосрочного прогноза уровня загрязнения атмосферы

ПДК) одной либо двух примесей прогнозируется высокий уровень загрязнения с указанием превышающих загрязняющих веществ; если превышение ПДК<sub>с.с.</sub> происходит по более чем двум примесям, то говорят об опасном уровне загрязнения.

Согласно Руководства по прогнозу уровня загрязнения воздуха [5] при прогнозировании высокого уровня загрязнения составляются предупреждения трех степеней:

I. Степень – если предсказывается высокий уровень загрязнения одной или нескольких контролируемых веществ в интервале

$$\text{ПДК}_{\text{с.с.}} < q \leq 3\text{ПДК}_{\text{с.с.}}$$

II. Степень – если предсказывается высокий уровень загрязнения одной или нескольких контролируемых веществ в интервале

$3\text{ПДК}_{\text{с.с.}} < q \leq 5\text{ПДК}_{\text{с.с.}}$ ; если после передачи предупреждения I степени поступающая информация показывает, что принятые меры не обеспечивают необходимую чистоту атмосферы.

III. Степень – если предсказывается высокий уровень загрязнения одной или нескольких контролируемых веществ выше  $5\text{ПДК}_{\text{с.с.}}$ ; если после передачи предупреждения II степени сохраняется высокий уровень загрязнения атмосферы и ожидается сохранение неблагоприятных метеорологических условий.

После оценки предстоящего уровня загрязнения атмосферы выдаются предупреждения и рекомендации в органы управления по проведению мер, приводящих к сокращению выбросов загрязняющих веществ.

Выбросы загрязняющих веществ необходимо сокращать в зависимости от степени опасности переданного предупреждения: при I степени – на 15-20%, при II степени – на 30-40%, при III степе-

ни – на 50%. Комплекс мер по сокращению выбросов представлен в [5].

Современная экологическая обстановка в большинстве городов России в основном обусловлена постоянно усилившимся влиянием автотранспорта на атмосферу. В результате чего комплекс мер по сокращению выбросов должен быть направлен не только на предприятия, но и на автотранспорт. Для того, чтобы данные меры были эффективны, необходимо заранее знать не только фактическое, но и будущее геоэкологическое состояние атмосферы, т.е. прогнозировать содержание различных антропогенных примесей в воздушном бассейне города.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В.Е. Гмурман. – М: Высш. шк., 2003. – 386 с.
2. Назаренко А.В. Эффективность инверсий температуры и их влияние на загрязнение атмосферы / А.В. Назаренко // Тр. // Глав. геофизичес. обсерватории. – С-Пб., 1991. – Вып. 543. – С. 86-95.
3. Назаренко А.В. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха / А.В. Назаренко // Современная география и окружающая среда: тез. докладов Всероссийской научн. конф. – Казань: КГУ, 1996. – С. 23-26.
4. Назаренко А.В. Классификация синоптических процессов в целях геоэкологического мониторинга воздушного бассейна / А.В. Назаренко // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География, геоэкология. – 2006. – №1. – С. 39-46.
5. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха. – С-Пб.: Гидрометеиздат, 1993. – 104 с.
6. Скирда И.А. Авиационные прогнозы погоды / И.А. Скирда, В.И. Садковский, В.А. Мозиков. – М.: Воениздат, 1995. – 423 с.