

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 | -0,17 | 0,13 | 0,13 | 0,45 | 0,15 | -0,35 | 0,51 | -0,18 | -0,26 | 0,11 | 0,11 | 0,07 | 0,79 |
| SO ₂ | 0,10 | -0,12 | -0,13 | -0,22 | 0,16 | -0,30 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | -0,03 | -0,16 | -0,22 | 0,61 |
| CO | -0,04 | 0,06 | 0,14 | 0,13 | 0,06 | -0,26 | 0,15 | -0,26 | 0,12 | 0,10 | 0,57 | 0,47 | 0,29 |
| NO ₂ | 0,01 | 0,01 | -0,12 | 0,41 | 0,09 | -0,47 | 0,42 | -0,10 | -0,12 | 0,36 | 0,23 | 0,33 | 0,13 |
| NO | 0,32 | 0,11 | 0,15 | 0,23 | -0,46 | -0,20 | 0,00 | 0,27 | 0,48 | 0,09 | 0,16 | 0,15 | 0,85 |
| Фенол | -0,35 | -0,42 | -0,32 | -0,20 | 0,12 | 0,33 | 0,11 | 0,28 | -0,02 | -0,38 | -0,26 | -0,28 | 0,88 |
| NH ₃ | -0,01 | -0,01 | -0,02 | 0,03 | -0,34 | 0,39 | 0,09 | 0,37 | 0,44 | -0,44 | 0,06 | -0,01 | 0,48 |
| форм-гид | -0,01 | 0,06 | -0,01 | 0,04 | -0,21 | -0,08 | 0,34 | -0,25 | -0,31 | 0,26 | -0,09 | -0,05 | 0,21 |
| сажа | 0,28 | 0,70 | 0,72 | 0,63 | 0,15 | -0,35 | 0,16 | -0,08 | 0,07 | 0,51 | 0,19 | 0,30 | 0,20 |
| аэро-золь | 0,18 | 0,35 | 0,46 | 0,43 | 0,09 | 0,00 | -0,34 | 0,13 | 0,18 | 0,02 | -0,15 | -0,08 | 0,15 |

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

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 (NO₂), и аммиака (NH₃); в холодный период года – фенола (FE) и сажи (SA); в переходный период – диоксид серы (SO₂) и аэрозоль серной кислоты (H₂SO₃).

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_{сс} 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_{сс} (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_{с.с.} 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.