

Л.М.Фетисова, Н.В. Короткова, Н.А.Фетисова

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Учебное пособие

УДК 551.510.42

Аннотация

В учебном пособии рассматривается состояние и перспективы мониторинга загрязнения атмосферы в городах России. Представлены методы комплексной и модельной оценки загрязнения воздуха в городе промышленными предприятиями и автотранспортом.

Представлены методы прогноза загрязнения воздуха.

Может быть использовано при подготовке специалистов по метеорологии, экологии и географии.

Рекомендовано к печати кафедрой метеорологии и климатологии географического факультета СГУ

СОДЕРЖАНИЕ

	Л
Введение	3
1 Мониторинг загрязнения атмосферы в городах	4
2 Обобщенные показатели загрязнения воздуха в городе	8
3 Метеорологические условия загрязнения воздуха	12
4 Расчет концентраций примесей в воздухе	19
4.1 Расчет опасной скорости ветра и максимальных концентраций	21
4.2. Расчет средних многолетних концентраций примесей	27
4.3. Расчет загрязнения воздуха выбросами автотранспорта	30
5. Методы прогноза загрязнения воздуха	33
5.1 Прогноз загрязнения воздуха методом последовательной графической регрессии	37
5.2 Прогноз загрязнения воздуха методом распознавания образов	43
Заключение	47
Список использованных источников	48

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее внимание уделяется вопросам изучения загрязнения воздуха и законов распространения примесей в атмосфере. Для России проблемы, связанные с загрязнением атмосферного воздуха, актуальны и в значительной степени согласуются с национальным интересом в оздоровлении экологической обстановки в стране.

Атмосферный воздух является важнейшим объектом окружающей природной среды, средой обитания растительного и животного мира, достоянием всего человечества и охраняется в Российской Федерации как основа жизни и деятельности народов, проживающих на ее территории.

Важным инструментом при принятии решений и разработке стратегий по снижению загрязнения воздуха являются модели расчета загрязнения атмосферы.

В настоящем учебном пособии представлены некоторые современные методики комплексной и модельной оценки загрязнения воздуха в городе промышленными предприятиями и автотранспортом, а также методы прогноза загрязнения воздуха на примере Саратова.

1 МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ГОРОДАХ

Атмосферный воздух, кроме таких важнейших компонентов, как азот, кислород, углекислый газ, водяной пар, содержит много других веществ, которые его загрязняют. Атмосферным загрязнением считается присутствие в воздухе различных газообразных и твердых веществ, которые оказывают негативное влияние на живые организмы, в том числе на человека, ухудшают их жизненные условия или наносят материальный ущерб. В соответствии с ГОСТом 17.21.04.77 Российской Федерации, загрязнение атмосферы означает «изменение состава атмосферы в результате наличия в ней примесей» [1].

Загрязнение атмосферы может быть связано с естественными процессами (лесные пожары, извержения вулканов, пыльные бури и т.д.) и деятельностью человека. Производственная деятельность человека создает так называемое антропогенное загрязнение. Основным источником этого загрязнения является сжигание ископаемого топлива (90%).

Процессы сжигания топлива обуславливают поступление в атмосферу в больших количествах основных примесей, к которым относятся пыль, оксид углерода, оксид и диоксид серы и азота. Глобальные выбросы основных примесей превышают 1 млрд. т/год. Среди них на первом месте оксид углерода - 700 млн. т, пыль и диоксид серы - около 200 млн. т каждый, диоксид азота - 55 млн. т. Вклад России по выбросу основных примесей составляет по диоксиду серы - 12%, оксидам азота - 4%, оксиду углерода - 10%, пыли 0 7% [2].

Потоки загрязнителей на единицу площади и на одного жителя в России существенно ниже, чем в США и Западной Европе, но выше на единицу валового национального продукта.

Для городов России характерно загрязнение воздуха не столько перечисленными выше основными примесями, сколько специфическими веществами, которые попадают в атмосферу в результате аварийных или

залповых выбросов от промышленных предприятий. В крупных городах России средние за год концентрации диоксида серы ниже, чем в городах стран Европы из-за использования газового топлива, ниже и концентрации оксида углерода вследствие меньшего количества автомобилей. Средние концентрации взвешенных веществ в 203 раза выше, а диоксида азота примерно такие же, как в городах других стран.

На Европейскую часть России приходится основная часть выбросов (65%). Источники загрязнения сосредоточены в основном в пределах бассейна реки Волги. Вследствие падения производства уровень загрязнения в России снижается. Однако во многих городах России средние за год концентрации очень опасных для здоровья человека бенз(а)пирена и формальдегида остаются выше ПДК.

Не вызывает сомнения тот факт, что загрязнение атмосферы оказывает влияние на здоровье человека. По оценкам различных специалистов состояние здоровья на 30-40% зависит от состояния окружающей среды. Эти оценки весьма приблизительны, поскольку в конкретных районах и для отдельных болезней они могут существенно различаться. Как показывают исследования, особенно чувствительны к изменениям окружающей среды пожилые люди с хроническими болезнями сердца и легких. В течение эпизодов высокого загрязнения воздуха в Доноре (Пенсильвания, США, 1948 г.) и Лондоне (Англия, 1952 г.) увеличивалась в первую очередь смертность пожилых людей и больных хроническими респираторными заболеваниями.

По рекомендации Всемирной организации здравоохранения (1987 г.) в странах Европы и Америки определены количественные оценки влияния загрязнения атмосферы на здоровье населения. Установлено, что общая смертность увеличивается на 0,3 - 0,9% при повышении концентраций общих взвешенных частиц, диоксида серы или других веществ на 10 мкг/куб.м и на

0,6% при таком же увеличении концентрации мелких взвешенных частиц диаметром менее 10 мкм (PM-10).

Загрязнение воздуха в городах России многими специфическими веществами определяет более сильное влияние их на здоровье населения, чем в городах Западной Европы. Установлено, например, что в городах России более 36% заболеваемости злокачественными новообразованиями вызвано загрязнением атмосферы. При увеличении уровня загрязнения на каждые 100 мкг/куб. м происходит увеличение случаев заболеваемости злокачественными новообразованиями на 20%, болезнями органов дыхания у взрослых на 14%, у детей на 12%. При этом последствия высокого загрязнения воздуха в городах будут проявляться заболеваемостью и смертностью в течение многих последующих лет [3].

В настоящее время для оценки уровня загрязнения атмосферы в России создана Государственная сеть мониторинга загрязнения атмосферы (ГСМЗА), которая охватывает более 700 станций.

Основными задачами Федеральной системы мониторинга загрязнения атмосферы являются всесторонняя и полная оценка состояния загрязнения атмосферы в городах России для принятия решений по экологической безопасности, контроль за эффективностью выполнения мероприятий по снижению выбросов, выявление районов с опасно высоким уровнем загрязнения, создающим риск здоровью и жизни населения. Советом Европейского экономического сообщества еще в 1996 году рекомендован перечень веществ, концентрации которых необходимо контролировать во всех странах: диоксид серы, диоксид азота, взвешенные частицы диаметром менее 10 микрон (PM-10), общие взвешенные вещества, свинец, озон, бензол, оксид углерода, кадмий, мышьяк, никель, ртуть, ароматические углеводороды, включающие бенз(а)пирен. Из этого списка в России в настоящее время не определяются концентрации PM-10 и озона, эпизодически измеряются

концентрации кадмия и мышьяка. В большинстве городов имеется 2-5 стационарных постов (ПНЗ), в крупных городах с населением более 1 млн. жителей - более 10. Имеются также регулярные наблюдения на маршрутных постах с помощью оборудованных для этой цели автомашин.

Наблюдения на стационарных постах осуществляются по одной из трех программ: полной, неполной и сокращенной. Наблюдения по полной программе выполняются четыре раза в сутки: в 1, 7, 13, 19 часов по местному времени, по неполной программе 0 три раза в сутки: в 7, 13, 19 часов, по сокращенной - в 7 и 13 часов.

В каждом городе определяются концентрации основных и наиболее характерных для выбросов промышленных предприятий веществ. Например, в районе алюминиевого завода оценивают концентрации фторида водорода, в районе предприятий, производящих минеральные удобрения, определяют концентрации аммиака и оксидов азота и т.д. Правила выполнения работ, связанных с организацией и деятельностью сети мониторинга загрязнения атмосферы отражены в «Руководстве по контролю загрязнения атмосферы» [4].

2 ОБОБЩЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Для оценки степени загрязнения атмосферы города в целом используются различные обобщенные показатели. Одним из наиболее простых интегральных показателей загрязнения воздуха является нормированная (безразмерная) концентрация примесей (q), осредненная по всему городу и по всем срокам наблюдений [5]:

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{q_{cp.cез.}} \quad (1)$$

где q_i - средняя за день концентрация на i -том пункте, $q_{cp.cез.}$ – среднесезонная концентрация в том же пункте, N - число стационарных пунктов (ПНЗ) в городе.

Нормирование на среднесезонную концентрацию позволяет исключить влияние изменения общей концентрации от года к году, что дает возможность использовать её для анализа ряда наблюдений за несколько лет.

Для характеристики загрязнения воздуха по городу в целом в качестве обобщенного показателя по рекомендации ГГО [4, 6] используется параметр фонового загрязнения

$$P = \frac{m}{n}, \quad (2)$$

где n - общее количество наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных пунктах, m – количество наблюдений в течение того же дня с повышенной концентрацией q , которая превышает среднесезонное значение $q_{cp.cез.}$ более чем в 1,5 раза ($q > 1,5 q_{cp.cез.}$).

По материалам наблюдений за прошлые годы рассчитывается $q_{cp.сез.}$ за зиму, весну, лето и осень для каждого стационарного поста отдельно для каждого года.

При расчете параметра P с целью его использования в качестве характеристики фоновое загрязнение воздуха необходимо, чтобы количество стационарных постов в городе было не менее трех, а количество наблюдений за концентрацией примесей на всех пунктах в течение дня не менее 20.

Параметр P подсчитывается для каждого дня по отдельным примесям и по всем примесям вместе. Для многих городов параметр P рассчитывается по основным примесям (пыль, диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота).

Параметр P может изменяться от 1 (все измеренные концентрации превышают $1,5q_{cp.сез.}$) до нуля (ни одна из концентраций не превышает $1,5q_{cp.сез.}$).

Выделяют три уровня загрязнения воздуха в городе: высокий (I группа) $P > 0,35$; повышенный (II группа) $0,20 < P \leq 0,35$ и пониженный (III группа) $P \leq 0,20$. В случае малой повторяемости значений $P > 0,35$ за высокий уровень принимают $P > 0,30$, $P > 0,25$ или $P > 0,20$, а за пониженный – $P \leq 0,15$ или $P \leq 0,10$.

Параметры q и P являются относительными характеристиками и не зависят от среднего уровня загрязнения воздуха. Следовательно их значения в основном определяются метеорологическими условиями.

В настоящее время для характеристики качества воздуха в городах и выявления веществ, вносящих наибольший вклад в загрязнение атмосферы, а также для сравнительной оценки загрязнения атмосферного воздуха отдельных районов или городов принято использовать стандартный индекс (СИ) и комплексный индекс загрязнения атмосферы (КИЗА).

СИ – наибольшая измеренная за короткий период (20 минут) концентрация вещества, деленная на максимальную разовую предельно допустимую концентрацию ($ПДК_{м.р.}$). При СИ < 1 загрязнение воздуха не

оказывает заметного влияния на здоровье человека и окружающую среду. При $СИ > 10$ загрязнение воздуха характеризуется как высокое [7].

Комплексный индекс загрязнения атмосферы (КИЗА) позволяет выявить во сколько раз суммарный уровень загрязнения воздуха несколькими примесями превышает допустимое значение. Для этого уровни загрязнения различными веществами приводят к уровню загрязнения одним каким-либо веществом (обычно диоксидом серы). Это приведение осуществляется с помощью показателя степени C_i . Индекс загрязнения атмосферы для i -того вещества (ИЗА) рассчитывается по формуле:

$$I_i = \left(\frac{q_{cp.i}}{ПДК_{c.c.i}} \right)^{C_i} \quad (3)$$

где $q_{cp.i}$ - средняя за месяц, сезон, год концентрация отдельной примеси, $ПДК_{c.c.i}$ - среднесуточная предельно допустимая концентрация этой же примеси.

Для веществ различных классов опасности получены следующие значения C_i :

Класс опасности	1	2	3	4
C_i	1,7	1,3	1,0	0,9

Для приведения степени загрязнения всеми веществами к загрязнению веществом третьего класса опасности (диоксид серы) можно записать формулу КИЗА, учитывающего n веществ:

$$I_n = \sum_{i=1}^n I_i = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_{cp.i}}{ПДК_{c.c.i}} \right)^{C_i} \quad (4)$$

Таким образом, КИЗА представляет собой сумму деленных на ПДК_{с.с.i} средних за месяц, сезон, год концентраций $q_{ср.i}$ обычно пяти веществ, приведенных к величине концентрации диоксида серы в долях ПДК. В соответствии с существующими методами оценки уровень загрязнения считается низким, если КИЗА ниже 5, повышенным при КИЗА от 5 до 6, высоким при КИЗА от 7 до 13 и очень высоким при КИЗА равном или большим 14.

Для расчета СИ и КИЗА в таблице 1 приведены значения ПДК_{с.с.} (среднесуточные) и ПДК_{м.р.} (максимально разовые).

Таблица 1 - Значения ПДК и класс опасности для некоторых примесей, мг/м³

Характеристика	СО	SO ₂	NO ₂		HF	Формальдегид	H ₂ S	Фенол	Аммиак	HCl	NO	Пыль
				с 01.01 2006г								
ПДК _{с.с.}	3	0,05	0,04	0,04	0,005	0,003	0,008	0,003	0,04	0,20	0,06	0,15
ПДК _{м.р.}	5	0,5	0,085	0,20	0,02	0,035	0,008	0,01	0,2	0,20	0,40	0,5
Класс опасности	4	3	2	3	2	2	2	2	4	2	2	3

3 МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Известно, что уровень загрязнения воздуха в городе определяется количеством поступающих в атмосферу загрязняющих веществ и метеорологическими условиями.

В настоящее время установлено, что связи между уровнем концентраций и метеорологическими факторами во многих городах сходны. Поэтому можно выделять наиболее характерные зависимости загрязнения воздуха от метеорологических условий [6].

Направление и скорость ветра. Зависимость уровня загрязнения воздуха в городе от направления ветра является достаточно простой. Если предприятия располагаются на окраине или за пределами города, то концентрации в городских кварталах растут при переносе выбрасываемых примесей со стороны источников выбросов. Однако и в таких простых случаях влияние направления ветра на уровень загрязнения воздуха в городе следует специально изучать, поскольку нужно учитывать, что поток воздуха может быть искажен под влиянием сложного рельефа, водоемов, а также непосредственным тепловым воздействием крупных промышленных комплексов. Неблагоприятные направления ветра могут выявляться и при равномерном расположении источников на территории города за счет различных эффектов наложения выбросов.

В отдельных городах, имеющих форму, близкую к прямоугольнику или эллипсу, загрязнение воздуха повышено, когда ветер направлен вдоль этого прямоугольника или большой оси эллипса.

В зависимости от скорости ветра на уровне флюгера выявляется наличие двух максимумов загрязнения воздуха: при штиле и при скорости ветра около 4-6 м/с, что связано с действием двух классов источников - высоких и низких.

Максимум при штиле более четко проявляется при наличии приземной инверсии, максимум при умеренном ветре - при ее отсутствии.

С ситуацией, когда при штиле отсутствует приземная инверсия, связано относительно пониженное загрязнение воздуха по городу в целом. Например, среднее значение параметра P при наличии (числитель) и отсутствии (знаменатель) приземной инверсии зимой при штиле в ряде городов оказалось следующим:

Таблица 2 - Среднее значение параметра P при наличии и отсутствии приземной инверсии зимой при штиле

Город	С.-Петербург	Алма-Ата	Красноярск	Чита	Омск	Н. Новгород
Значение, P	<u>0,27</u>	<u>0,37</u>	<u>0,33</u>	<u>0,25</u>	<u>0,29</u>	<u>0,29</u>
	0,14	0,17	0,19	0,2	0,19	0,14

Для различных городов и сезонов характерными являются следующие закономерности:

- 1) при устойчивой стратификации загрязнение воздуха в городе уменьшается с усилением скорости ветра;
- 2) при неустойчивой стратификации максимум загрязнения отмечается при скоростях ветра, близких к опасным, для основных источников выбросов, расположенных в городе.

Скорость ветра на уровне примерно 500—1000 м может характеризовать интенсивность выноса за пределы города верхней части городской «шапки дыма». Обнаруживается, что с усилением ветра на этих высотах загрязнение воздуха в среднем несколько снижается. В то же время выявляется эффект снижения концентраций при установлении очень слабого ветра (1-2 м/с) на указанных уровнях. Это может быть связано с увеличением подъема перегретого над городом воздуха.

Термическая устойчивость атмосферы. Температура воздуха.

Термическая устойчивость характеризуется вертикальной разностью температуры воздуха ΔT . Обнаруживается зависимость параметра P от ΔT в слое от земли до уровня AT_{925} гПа или AT_{500} гПа. Связь между P и ΔT наиболее значительна при инверсионных условиях, при этом имеет место обратная линейная корреляция.

В среднем загрязнение воздуха повышено, когда штиль сопровождается приземной инверсией, т. е. в ситуации застоя воздуха. При застое практически отсутствует перенос воздуха и резко ослаблено его вертикальное перемешивание.

Вместе с тем в условиях застоя не всегда отмечается высокий уровень загрязнения воздуха. В таких условиях периоды с $P > 0,2$ наблюдаются только в 60 - 70 % случаев. Это означает, что наряду с процессом переноса и рассеивания примесей существуют другие факторы, определяющие уровень концентраций примесей в городе.

Одним из таких факторов является термическое состояние воздушной массы, характеризующееся температурой воздуха. В зимнее время чаще всего обнаруживается повышение уровня загрязнения при понижении температуры. Это в первую очередь характерно для антициклонической погоды, когда при низких температурах воздуха устанавливается устойчивая термическая стратификация. Кроме того, при понижении температуры увеличивается количество сжигаемого топлива и, следовательно, количество выбросов вредных веществ в атмосферу. Таким образом, рост загрязнения воздуха при понижении температуры связан не только с термическим состоянием воздушной массы, а и с сопутствующими факторами.

При слабых ветрах загрязнение атмосферы в городе в ряде случаев повышается с увеличением температуры воздуха. Наиболее четко это обнаруживается зимой в условиях застоя воздуха, сохраняющегося в течение

всего дня. Таким образом, ситуация застоя воздуха в сочетании с относительно высокими температурами является неблагоприятной. Значительное загрязнение воздуха зимой обнаруживается также, когда сравнительно высокие температуры сопровождаются скоростью ветра не более 4–5 м/с. Такие условия отмечаются обычно в теплых секторах циклонов.

Осадки. Туманы. Осадки вымывают примеси из атмосферы. Восстановление исходного уровня загрязнения воздуха в городе происходит постепенно, примерно в течение 12 ч.

Воздух наиболее чист сразу после выпадения осадков. В первые 12 ч после их выпадения повторяемость высоких концентраций ниже, чем в последующие часы. Степень очищения воздуха зависит от количества осадков - чем больше их выпадает, тем чище воздух.

Указанные зависимости относятся к общегородскому загрязнению воздуха, к концентрациям, формирующимся вне прямого воздействия источников. При непосредственном переносе выбросов со стороны источников эффект вымывания примесей из воздуха проявляется в меньшей степени.

В туманах загрязнение воздуха повышается. Здесь происходит поглощение примесей каплями. Однако эти примеси вместе с каплями остаются в приземном слое воздуха. За счет создания значительных градиентов концентраций (вне капель) происходит перенос примесей из окружающего пространства в область тумана. В связи с этим суммарная концентрация примесей возрастает. Значительную опасность представляет наличие над зоной тумана факелов дыма, которые под воздействием указанного эффекта распространяются в приземный слой воздуха.

Инерционный фактор. Степень загрязнения воздуха по городу в целом связана с инерционным фактором. Загрязнение воздуха в городе P зависит от его значения в предшествующий день P' .

Если в предшествующий день значение параметра P (или другого обобщенного показателя загрязнения воздуха в городе) велико, то и в текущий день загрязнение воздуха, как правило, повышено. Обратная ситуация имеет место, когда значение обобщенного по городу показателя загрязнения в предшествующий день мало ($P' < 0,1$). В этом случае в последующие дни загрязнение воздуха чаще всего понижено, в том числе и в такой неблагоприятной ситуации, как застой воздуха. Коэффициент корреляции между значениями параметра P в соседние дни составляет 0,6-0,7.

Действие вышеназванного фактора в значительной степени определяется метеорологической инерцией, которая означает тенденцию к сохранению атмосферных процессов, определяющих уровень концентраций. Некоторые из метеорологических факторов, влияющих на концентрации примесей в воздухе, могут быть неизвестны, и при учете установившегося уровня загрязнения воздуха они в какой-то степени учитываются автоматически. Существенную роль может играть и инерция самого загрязнения воздуха.

Метеорологический потенциал самоочищения атмосферы

Влияние метеорологических факторов на уровень загрязнения атмосферы проявляется более четко, если рассматривается сочетание метеорологических величин. В последнее время наряду с такими комплексными характеристиками, как потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА) и рассеивающая способность атмосферы (РСА), используется коэффициент самоочищения атмосферы [8].

Потенциал загрязнения атмосферы представляет собой отношение средних уровней концентраций вредных примесей при заданных выбросах в конкретном $q_{cp.i}$ и условном $q_{cp.0}$ районе:

$$ПЗА = \frac{q_{cp.i}}{q_{cp.0}} \quad (5)$$

РСА – величина, обратная ПЗА.

Коэффициент самоочищения атмосферы K определяется как отношение повторяемости условий, способствующих накоплению примесей, к повторяемости условий, способствующих удалению примесей из атмосферы:

$$K = \frac{P_{u1} + P_m}{P_{\geq 6} + P_o} \quad (6)$$

где P_{u1} - повторяемость скоростей ветра 0-1 м/с, P_m - повторяемость туманов, $P_{\geq 6}$ - повторяемость скорости ветра ≥ 6 м/с, P_o – повторяемость осадков $\geq 0,5$ мм.

Однако в таком виде K характеризует условия накопления, а не рассеивания. Поэтому коэффициентом самоочищения атмосферы лучше считать величину K' , обратную K .

$$K' = \frac{1}{K} \quad (7)$$

Для тех районов, в которых повторяемость туманов мала, но значительна повторяемость приземных задерживающих слоев (ПЗС), как, например, в Саратове, имеет смысл при расчете K' учитывать вместо повторяемости туманов (P_m) повторяемость ПЗС ($P_{ин}$). Тогда

$$K' = \frac{P_{\geq 6} + P_o}{P_{u1} + P_{ин}} \quad (8)$$

При $K' \leq 0,25$ складываются условия крайне неблагоприятные для рассеивания, при $0,25 < K' \leq 0,4$ - неблагоприятные, при $0,4 < K' \leq 0,8$ -

относительно неблагоприятные, при $0,8 < K' \leq 1,25$ - относительно благоприятные и при $K' > 1,25$ - благоприятные условия.

Коэффициент самоочищения атмосферы позволяет оценить вклад метеорологических величин и явлений в формирование уровня загрязнения воздуха.

4 РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПРИМЕСЕЙ В ВОЗДУХЕ

В настоящее время внимание метеорологов привлечено к исследованиям атмосферных загрязнений, их распределению и диффузии. Эти исследования являются основой для нормирования количества вредных выбросов в атмосферу и разработки защитных мероприятий еще при проектировании промышленных предприятий, так как нормирование выбросов в атмосферу зависит от учета условий рассеивания их в атмосфере.

Для описания переноса примесей ветром нужно знать кинематику воздушных течений, иметь данные о распределении скорости ветра с высотой при различных метеорологических условиях, иметь представление о характере турбулентных движений в атмосфере.

Теоретическая разработка этой проблемы велась в двух направлениях: а) чисто статистический подход, развитый О. Сеттоном, и б) метод, исходящий из решения уравнения турбулентной диффузии с постоянными коэффициентами, основанный на работах А. Робертса. Оба эти направления обладают и достоинствами и недостатками. Лучшие результаты дает совместное применение этих двух методов к решению проблемы.

Отечественными исследователями в основном избирался путь решения уравнения турбулентной диффузии, но коэффициенты обмена, входящие в уравнения, предполагались не постоянными, а переменными (М. Е. Берлянд, Д. Л. Лайхтман, П.Н. Белов и др.) [9].

Экспериментальная проверка полученных формул показала, что они отражают лишь приближенно некоторые особенности распространения примесей в атмосфере. Количественные же оценки, полученные по формулам и экспериментально, значительно расходятся. Поэтому в расчетные формулы стали вводить поправочные коэффициенты, разрабатывать другие эмпирические и теоретические соотношения.

В настоящее время предложено большое количество формул для расчета концентраций примеси, но практически используются очень немногие. Причем и в применяемых формулах для согласования с действительностью приходится уменьшать полученные значения в 3 - 5 и даже 10 - 15 раз. Поэтому формулы приобрели полуэмпирический характер.

В данном пособии приводятся методы расчета многолетних средних концентраций примеси и расчета концентраций загрязняющих веществ, поступающих от автомобилей, предложенные Д. Л. Лайхтманом [9].

Все расчетные формулы исходят из основного уравнения турбулентной диффузии примесей:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + \omega \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q \quad (9)$$

В этом уравнении оси x и y расположены горизонтально, ось z – по вертикали; t - время; u, v, w - составляющие скорости перемещения примесей по осям x, y, z ; k_x, k_y, k_z - составляющие коэффициента обмена по тем же осям, α - коэффициент, определяющий изменения концентрации за счет превращения примеси, q - среднее значение концентрации.

При решении конкретных задач общий вид уравнения значительно упрощается.

Для расчета концентраций примесей необходимо знать изменение скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена с высотой вблизи подстилающей поверхности. При $z=0$ коэффициент турбулентного обмена k_z можно считать равным коэффициенту молекулярной диффузии - v . В приземном слое воздуха до уровня $z = h$ ($h \cong 50\text{м}$) коэффициент обмена возрастает примерно пропорционально высоте z

$$\left(k_z \approx k_1 \frac{z}{z_1} \right)$$

где k_1 , коэффициент турбулентности на высоте z_1 , обычно равной 1 м.

В слое $z > h$ коэффициент турбулентного обмена можно считать постоянным

$$\left(k_z \approx k_1 \frac{h}{z_1} \right)$$

Таким образом, для расчета концентрации примесей принимают следующие законы изменения скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена с высотой:

$$u = u_1 \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}$$

$$k_z = k_1 \frac{z}{z_1} + \nu \text{ при } z \leq h,$$

$$k_z = k_1 \frac{h}{z_1} + \nu \text{ при } z > h. \quad (10)$$

z_0 - уровень шероховатости подстилающей поверхности.

4.1 Расчет опасной скорости ветра и максимальной концентрации примеси

Для характеристики состояния атмосферы, при котором могут отмечаться большие концентрации примесей, выделяются нормальные и аномальные метеорологические условия.

При нормальных условиях в случае высоких источников неблагоприятным является наличие сверхadiaбатического градиента температуры, когда вследствие развитого турбулентного обмена имеет место интенсивный перенос примесей от источников к земной поверхности, при этом могут создаваться их значительные концентрации. Степень загрязнения воздуха существенно зависит от скорости ветра. Влияние скорости ветра на загрязнение приземного слоя атмосферы имеет сложный характер, и для каждого источника существует некоторая опасная скорость ветра u_m , при которой наблюдаются максимальные концентрации примесей.

При определении u_m в первую очередь следует установить, являются выбросы горячими или холодными. При перегреве усиливается эффективный подъем выбросов. Поэтому чем больше перегрев, тем больше должна быть скорость ветра, при которой у земли формируется максимальная концентрация примеси. Отнесение выбросов к нагретым или к холодным проводится на основе оценки параметра f .

$$f = 10^3 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T} \quad (11)$$

где ω_0 - скорость выхода дымовых газов из устья источника выброса, м/с;
 D - диаметр устья источника (трубы), м; H - высота источника над уровнем земли, м; ΔT - разность между температурой выбрасываемой смеси и температурой окружающего воздуха, °С.

Параметр f характеризует влияние перегрева на начальный подъем факела дыма и на рассеивание примесей. При $f \leq 100$ выбросы относятся к нагретым, при $f > 100$ (или при $\Delta T \cong 0$) - к холодным.

После расчета f и установления характера выбросов опасная скорость ветра u_m (м/с) определяется через параметр v_m для источников с холодными выбросами:

$$v_m = 0,653 \sqrt{\frac{V \Delta T}{H}} \quad (12)$$

$$v'_m = 1,3 \frac{w_0 D}{H} \quad (13)$$

где V - объем выбрасываемой газовой смеси, m^3 ; v_m и v'_m , как и u_m , выражены в м/с.

Для источников точечного типа:

в случае горячих выбросов ориентировочно принимается, что при $v_m \leq 0,5$ м/с $u_m = 0,5$ м/с; при $0,5 < v_m \leq 2$ м/с $u_m = v_m$; при $v_m > 2$ м/с $u_m = v_m(1 + 0,12 \sqrt{f})$;

в случае холодных выбросов при $v'_m \leq 0,5$ $u_m = 0,5$; при $0,5 < v'_m < 2$ м/с $u_m = v'_m$, а при $v'_m > 2$ м/с $u_m = 2,2 v'_m$.

Для линейного источника (типа аэрационного фонаря) опасная скорость ветра u_m (м/с) вычисляется по формуле $u_m = u'_m$, где u'_m относится к точечному источнику с круглым устьем, эквивалентному данному линейному источнику, и рассчитывается по приведенным выше формулам для u_m с использованием эквивалентных значений диаметра источника $D = D_3$ (м) и объема выходящих газов $V = V_3$ (m^3/c), которые определяются по формулам:

$$D_3 = \frac{2LV}{L^2 \omega_0 + V}; \quad (14)$$

$$V_3 = \frac{\pi D_3^2}{4} \omega_0, \quad (15)$$

где L - длина линейного источника.

Обычно для мощных тепловых электростанций значения опасной скорости ветра u_m составляют 507 м/с, для металлургических предприятий – 2-4 м/с, для многих химических производств – 1-2 м/с, для линейных источников u_m также часто равна 1-2 м/с.

Для группы источников с различными параметрами выбросов опасная скорость ветра ($u_{m.c.}$) приближенно характеризуется средневзвешенной величиной

$$u_{m.c.} = \frac{\sum_{i=1}^N u_{m.i} q_{m.i}}{\sum_{i=1}^N q_{m.i}}, \quad (16)$$

где $u_{m.i}$ и $q_{m.i}$ – расчетные значения опасной скорости ветра и максимальной концентрации для i -того источника, N - количество источников.

Максимальные концентрации (q_m , мг/м³) от группы N близко расположенных источников, создающиеся при опасной скорости ветра и неблагоприятной температурной стратификации, рассчитывается следующим образом:

в случае горячих выбросов

$$q_m = \frac{AMFm\eta}{H^2} \sqrt[3]{\frac{N}{V\Delta T}} \quad (17)$$

в случае холодных выбросов

$$q_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{H}} \cdot \frac{DN}{8V}. \quad (18)$$

Здесь M - количество выбрасываемого вещества, г/с; A - коэффициент, учитывающий неблагоприятные условия вертикального и горизонтального перемешивания; F - безразмерный коэффициент, характеризующий скорость оседания вредных веществ в атмосфере; m и n - безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выбросов; η - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности.

Значение коэффициента A принимается равным:

а) 250 - для районов Средней Азии южнее 40° с.ш., Бурятии и Читинской области;

б) 200 - для Европейской территории Российской Федерации южнее 50° с.ш. и остальных районов Нижнего Поволжья, для Молдовы, Кавказа, Казахстана, Дальнего Востока и остальной территории Сибири и Средней Азии;

в) 180 - для Европейской территории Российской Федерации, Беларуси и Урала от 50° до 52° с.ш. за исключением попадающих в эту зону перечисленных выше районов;

г) 160 - для Европейской территории Российской Федерации, Беларуси и Урала севернее 52° с.ш. для Европейской территории (за исключением центра России), а также для Украины (для расположенных на Украине источников высотой менее 200 м в зоне от 50° до 52° с.ш. - 180, а южнее 50° с.ш. - 200);

д) 140 - для Московской, Тульской, Рязанской, Владимирской, Калужской, Ивановской областей.

Коэффициент F принимается равным 1 для газообразных веществ и мелкодисперсных аэрозолей, скорость упорядоченного оседания которых близка к 0, равным 2; 2,5 и 3 для пыли (золы), если средний эксплуатационный коэффициент очистки составляет соответственно не менее 90%, 75-90%, менее 75 % и при отсутствии очистки.

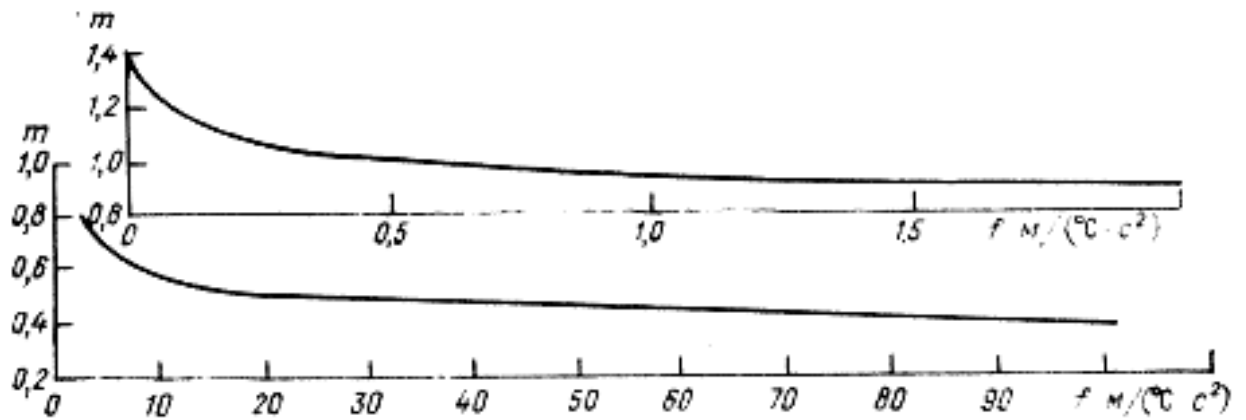


Рисунок 1 - Зависимость параметра m от f .

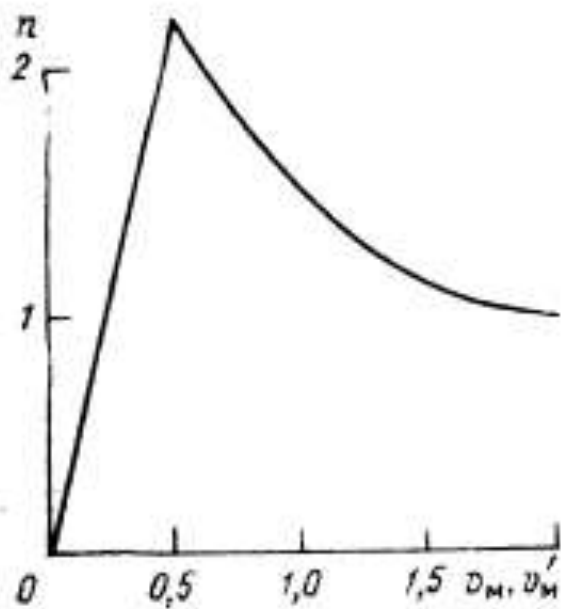


Рисунок 2 - Зависимость параметра n от v_M и v'_M .

Безразмерный коэффициент m определяется по графику исходя из значения параметра f (11) (рисунок 1). Объем V и скорость w_0 связаны соотношением (15).

Безразмерный коэффициент n исходя из значений v_M и v'_M (рисунок 2). При $v_M > 2 \text{ м/с}$ $n=1$ [6].

4.2 Расчет средних многолетних концентраций примесей

Для расчета значений средних многолетних концентраций в воздухе учитываются некоторые метеорологические факторы: скорость ветра, коэффициент турбулентности, стратификация атмосферы.

Для определения наземной концентрации примеси на оси струи дыма (при $y = 0$ и $z = 0$) предложена формула:

$$q = \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi\bar{y}^2}} \cdot \frac{z_1^{1-\varepsilon}}{\Gamma\left(1 - \frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}\right)} \cdot \frac{u_1 H_{\text{эф}}^{1+m+\varepsilon}}{k_1 z_1^{m+\varepsilon-1}} \cdot \left[\frac{u_1' z_1^{1-m-\varepsilon}}{k_1 z_1} \right]^{\frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}} \cdot e^{-\frac{u_1 H_{\text{эф}}^{1+m+\varepsilon}}{k_1 z_1^{m+\varepsilon-1}}} \quad (19)$$

Здесь \bar{y}^2 - дисперсия в направлении оси Oy, равная $(0,2x^{0,9})^2$;

γ - мощность источника;

u - скорость ветра на фиксированной высоте z_1 ;

k_1 - вертикальная составляющая коэффициента турбулентности на уровне z_1 ;

m - параметр, зависящий от стратификации атмосферы и шероховатости подстилающей поверхности;

ε - параметр устойчивости атмосферы;

$H_{\text{эф}}$ — эффективная высота трубы, равная геометрической высоте H плюс ΔH , которое зависит от перегрева дыма относительно окружающего воздуха и от начальной скорости выброса газов.

На расстоянии x_m от источника концентрация достигает максимального значения q_m . Зависимость этих величин от высоты трубы и метеорологических условий можно найти по формулам:

$$x_m = \frac{u_1 z_1^{1-m-\varepsilon} H_{\text{эф}}^{1+m+\varepsilon}}{k_1 (1+m+\varepsilon) \left(1,9 - \frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}\right)} \quad (20)$$

$$x_m = \frac{\gamma z_1^{1-\varepsilon} \left(1,9 - \frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}\right)^{1,9 - \frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}} \left[\frac{k (1+m+\varepsilon)^2}{u_1 z_1^{1-m-\varepsilon}}\right]^{1,9}}{0,2\sqrt{2\pi} (1+m+\varepsilon) k_1 H_{\text{эф}}^{(1+m+\varepsilon) \left(1,9 - \frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}\right)} \Gamma\left(1 - \frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}\right)} \times e^{-\left(1,9 - \frac{\varepsilon}{1+m+\varepsilon}\right)} \quad (21)$$

Для наиболее часто встречающейся поверхности с шероховатостью $Z_{00} = 0,1$ м и $\varepsilon = -0,1$ (средние летние условия) и $\varepsilon = 0,0$ (средние зимние условия) формулы для расчетов концентраций на оси струи q , максимальных концентраций q_m на расстояниях x_m принимают вид

при $\varepsilon = -0,1$:

$$q(x) = \frac{60\gamma}{u_{\text{фл}} x^2} e^{-\frac{16,6H_{\text{эф}}^{1,04}}{x}} \quad (22)$$

$$q_m = \frac{13 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma H_{\text{эф}}^{-2,08}}{u_{\text{фл}}} \quad (22a)$$

$$x_m = 8,3H_{\text{эф}}^{1,04} \quad (22b)$$

при $\varepsilon = 0,0$

$$q(x) = \frac{54\gamma}{u_{\text{фл}} x^{1,9}} e^{-\frac{14,5H_{\text{эф}}^{1,18}}{x}} \quad (23)$$

$$q_m = \frac{17 \cdot 10^{-2} \cdot \gamma}{u_{\text{фл}}} \cdot H_{\text{эф}}^{-2,24} \quad (23a)$$

$$x_m = 7,7H_{\text{эф}}^{1,18} \quad (23b)$$

здесь $u_{\text{фл}}$ - средняя многолетняя скорость ветра на высоте флюгера, γ - мощность источника (г/с).

Для получения поля средних многолетних концентраций необходимо учитывать средние многолетние розы ветров. Чтобы учесть ветер, предлагается формула

$$\bar{q}(x) = \frac{q_0}{9} n_0 + c_1 n_{-5} + n_5 + c_2 n_{-10} + n_{10} \quad (24)$$

где, $\bar{q}(x)$ - средняя многолетняя концентрация (г/м³) при ветре какого либо направления на расстоянии x от трубы (источника загрязнения);

n_0 — повторяемость ветра основного румба (в долях единицы);

$n_{-5}, n_5, n_{-10}, n_{10}$ - повторяемость ветра при отклонении его на углы $\pm 5^\circ$ и $\pm 10^\circ$ от основного направления;

$q_0(x)$ - концентрация на заданном расстоянии, рассчитываемая по формулам (22) или (23); C_1 и C_2 - коэффициенты, учитывающие приращение средней концентрации в данном направлении в момент отклонения направления ветра от основного на 5° и 10° соответственно

$$C_1 = e^{-\frac{(\rho \cdot \sin 5^\circ)^2}{2\bar{y}^2}} \quad (25)$$

$$C_2 = e^{-\frac{(\rho \cdot \sin 10^\circ)^2}{2\bar{y}^2}} \quad (26)$$

здесь $\rho \cong x$.

4.3 Расчет загрязнения воздуха выбросами автотранспорта

Большое значение имеет разработка вопроса, связанного с загрязнением воздушного бассейна города выхлопными газами автотранспорта.

Автомобили поставляют в среднем около 70% всех токсичных примесей, загрязняющих воздух индустриальных центров (в Саратове, по данным Ростехнадзора в 2007 году до 66,7%). В 2007 г. валовый выброс всех загрязняющих веществ в воздух города составил 140,9 тыс.т., в том числе от автотранспорта в городскую атмосферу поступило 119,5 тыс.т. [10]. Основными факторами, определяющими содержание загрязняющих веществ в выхлопных газах, а, следовательно, и уровень загрязнения атмосферы, можно считать состав топлива, вид двигателя и режим его работы, а также условия, в которых происходит движение транспорта. Основными вредными примесями, содержащимися в выхлопных газах бензиновых двигателей автомашин, являются: оксид углерода (до 94% от валового выброса), оксиды азота (порядка 82 %), углеводороды (до 24%), диоксид серы (до 30%) и некоторые другие вещества [10]. Одним из основных и очень токсичным загрязняющим атмосферу веществом является оксид углерода. Одиночный автомобиль выделяет в атмосферу сравнительно небольшое количество вредных веществ, которые к тому же быстро рассеиваются. Но скопление автомашин может привести к значительному общему загрязнению атмосферы. Для расчета концентраций загрязняющих веществ в городском воздухе, создаваемых

автотранспортом, можно получить формулу из основного уравнения турбулентной диффузии при некотором его упрощении.

Расчетная формула для оценки концентрации примеси внутри города имеет вид:

$$q = \frac{2Q_0}{k\sqrt{2\pi}} \cdot \sqrt{\frac{kx}{u}} + \frac{Q_0}{\chi V_*} \ln \frac{h}{\zeta} \quad (27)$$

где q — концентрация примеси внутри города, мг/м^3 , Q_0 — поток концентрации примеси, создаваемый автомашинами, $\text{мг/м}^2\text{с}$, k — коэффициент турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}$, x — расстояние от края города по направлению ветра, м , u — скорость ветра, м/с , V_* — динамическая скорость, м/с , κ — постоянная Кармана, h — высота домов, м , ζ — высота, на которой рассчитывается концентрация, м .

Эта формула позволяет оценить порядок величин концентрации примеси. Из нее следует, что максимальная концентрация вредных примесей обнаруживается на подветренной границе города. Запишем формулу (27) в виде

$$q = A\sqrt{x} + B \quad (28)$$

$$\text{где } A = \frac{2Q_0}{k\sqrt{2\pi\kappa u}}, \quad B = \frac{Q_0}{\chi V_*} \ln \frac{h}{\zeta}$$

По этой формуле можно провести расчеты концентраций примесей, выбрасываемых автомобилями.

Для определения возможных среднемесячных концентраций примесей в приземном слое необходимо знать розу ветров для данного месяца, среднемесячную скорость ветра (u), коэффициент турбулентности (k), значение параметра κV_* , поток концентрации примеси от автомобилей Q_0 . Для расчета необходимо также знать количество автомашин, ежедневно курсирующих по городу, и иметь данные о составе выхлопных газов. Таким образом, можно

рассчитать концентрацию оксида углерода или диоксида азота, поставляемых в воздух автомашинами.

По данным городского комитета по охране окружающей среды г. Саратова в 2007 году автомобильный парк города насчитывал 235140 единиц автотранспорта. Объем валовых выбросов загрязняющих веществ от этого количества автомобилей составил 140,896 тыс. т/год, 88,6 тыс. т/год из которого приходится на долю оксида углерода, а 24,0 тыс. т/год - на долю диоксида азота.

При площади улиц и дорог в городе равной 11,2 км² (по данным лаборатории урбоэкологии СГУ) поступление в воздух оксида углерода на единицу площади в единицу времени в Саратове получается равным 0,40 мг/м².с., а диоксида азота - 0,07 мг/м².с.

Необходимый для расчетов коэффициент турбулентности для Саратова можно принять за 0,1 - 0,2 м²/с. Произведение постоянной Кармана k на динамическую скорость V^* примерно равно 0,1 м/с, средняя высота зданий h около 15 м, а высота ζ , на которой рассчитывается концентрация, равна 1 м.

Концентрация примеси в каждой точке города складывается из количеств, переносимых ветром каждого направления и зависит от его повторяемости:

$$q = q_c n_c + q_{св} n_{св} + \dots + q_{сз} n_{сз} \quad (29)$$

где $q_c, q_{св}, \dots, q_{сз}$ - среднемесячная концентрация оксида углерода или диоксида азота, полученная по формуле (28), а $n_c, n_{св}, \dots, n_{сз}$ — повторяемость ветра по румбам (в долях единицы).

Концентрация примеси в каждой точке зависит от расстояния этой точки от края города и равна сумме концентраций, переносимых ветром каждого из восьми румбов. По величинам рассчитанных таким образом концентраций в точках на разных расстояниях от края города проводятся изолинии равных концентраций.

5 МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

С развитием промышленности и транспорта уровень загрязнения воздуха в городах и промышленных центрах значительно повысился. В отдельные неблагоприятные периоды содержание вредных веществ достигает очень высоких значений. Возникает вопрос о возможности сокращения выбросов в атмосферу для этих случаев. Этим обусловлена необходимость организации в системе гидрометеорологической службы прогнозирования загрязнения воздуха.

Анализ метеорологических условий в городе и разработка схем прогноза применительно к отдельным примесям представляет интерес в связи с различием особенностей распространения в атмосфере каждой из примесей. Это связано главным образом с условиями поступления различных ингредиентов в атмосферу. Так, диоксид серы в ряде случаев поступает в воздух с горячими газами через высокие трубы ТЭЦ и ГРЭС, а диоксид азота связан в основном с выхлопами автомобилей на малой высоте. Такое положение определяет разное влияние условий погоды на загрязнение воздуха различными примесями.

Задачей метеорологического обеспечения является своевременное обнаружение и оповещение о росте концентраций, а также выявление источников выбросов.

Основой для разработки методики прогнозирования загрязнения воздуха являются результаты теоретических и экспериментальных работ, в которых исследованы случаи значительного увеличения концентрации вредных веществ в приземном слое в зависимости от метеоусловий.

Сложность прогнозирования загрязнения воздуха определяется двумя обстоятельствами:

во-первых, в городе множество источников выбросов с существенно различающимися характеристиками и в районе каждого из них опасное

скопление примесей возникает при неодинаковых метеорологических ситуациях;

во-вторых, зависимость загрязнения воздуха по городу в целом от метеоусловий является сложной, уровень загрязнения определяется многими факторами.

Вследствие этого при разработке прогностических схем большое значение имеет выбор метода, который позволил бы максимально учесть реальный вид связи загрязнения воздуха и метеорологических факторов.

Методика предсказания уровня концентрации по городу в целом включает оценку метеорологических условий загрязнения воздуха и качественные правила прогноза его изменений в зависимости от развития атмосферных процессов, а также принципы составления прогностических схем по материалам наблюдений в конкретных городах и за отдельные сезоны года. Так учитывается изменение в течение года особенностей выбросов в атмосферу вредных веществ, климатические и микроклиматические условия в суточном и годовом их ходе.

Одним из вариантов схем прогноза является включение метеорологических предикторов в ранние часы: 3-6 часов местного времени показателя загрязнения воздуха за первую половину дня.

В другом варианте используются предикторы за дневные часы и показатель загрязнения за вторую половину дня. При этом в случае сверхкраткосрочных прогнозов до 8-10 часов рассматривают измеренные метеорологические параметры.

При включении в схемы прогноза в качестве предиктора исходного значения параметра P' в неявном виде учитывается асинхронность связи между концентрацией и теми метеорологическими условиями, которые в наибольшей степени определяют уровень загрязнения воздуха в городе.

Вопросы прогноза загрязнения атмосферы и регулирования выбросов тесно связаны между собой. Очевидно, что прогностические разработки необходимы прежде всего для тех случаев, когда возможно регулирование загрязнения воздуха городов.

На загрязнение воздуха по городу в целом оказывает сложное влияние ряд метеорологических и других факторов. Зависимости между концентрациями и отдельными метеовеличинами часто нечетко выражены, поэтому необходимо рассматривать содержание примесей в воздухе при сочетании различных параметров. При этом рекомендуется использовать наблюдения основной метеостанции и пункта радиозондирования, который, как правило, находится за пределами города.

Для разработки схем прогноза загрязнения атмосферы в отдельных городах в качестве предикторов выбираются те характеристики, которые в наибольшей степени определяют изменение концентраций примесей в воздухе. Хотя при разработке прогноза загрязнения воздуха предикторы заранее не задаются, они в большинстве случаев оказываются примерно одинаковыми, поскольку схемы прогноза разрабатываются только для сравнительно крупных городов со сходной структурой выбросов.

К настоящему времени выполнено большое число работ, в которых изучается корреляция между загрязнением атмосферы в городах и соответствующими метеорологическими факторами. К ним относится и часть статистических исследований, ставящих своей задачей не разработку прогностических методов и правил, а обобщение сведений режимного характера, в том числе о годовом и суточном ходе загрязнения воздуха. Учет этих результатов может быть весьма полезен при прогнозах, поскольку некоторые из предикторов, особенно когда они определяются сочетанием нескольких факторов, устанавливаются в результате применения статистических методов.

При включении в схемы прогноза учитывается возможность предсказания предикторов имеющимися способами.

Предиктором, отражающим состояние термической устойчивости атмосферы, может быть толщина слоя перемешивания ΔH наряду с вертикальным градиентом температуры.

Более универсальной характеристикой устойчивости является разность температуры между уровнем земли и каким-то уровнем в пределах пограничного слоя атмосферы ΔT . В качестве предикторов для оценки интенсивности переноса примесей принимаются скорость ветра на уровне флюгера и на каком-либо уровне в пределах пограничного слоя, например, для изобарической поверхности AT_{925} , так как для нее составляются карты барической топографии.

Для учета направления переноса примесей в первом приближении достаточно использовать в качестве предиктора направление ветра на высоте флюгера, зафиксированное на основной метеостанции города.

При разработке прогностических схем существенное значение имеет учет инерционного фактора. Вероятность возникновения больших концентраций примесей после дней с высоким уровнем загрязнения атмосферы значительно больше, чем после дней с низким уровнем загрязнения. Из обработки материалов наблюдений в нескольких городах следует, что коэффициент корреляции между загрязнением воздуха в соседние дни составляет от 0,6 до 0,8, при этом положительная корреляция сохраняется в течение пяти дней и более. В связи с этим для учета инерционного фактора принято использовать исходное значение параметра загрязнения атмосферы P' .

При выборе предикторов для разработки схем прогноза по материалам наблюдений за предыдущие годы проводится анализ связей между загрязнением воздуха данного города и отдельными метеорологическими параметрами или их комплексами. Выбор предикторов обычно осуществляется

исходя из общих физических представлений о возможных причинах изменений концентрации примесей.

Таким образом, отбираются наиболее информативные предикторы, на основании которых составляется схема прогноза загрязнения воздуха.

Для решения задачи прогноза уровня загрязнения воздуха по городу в целом изучаются метеорологические условия, определяющие уровни загрязнения, и разрабатываются статистические схемы.

Предикторами для статистических схем являются метеорологические характеристики и параметр исходного загрязнения воздуха.

При использовании в качестве предиктанта параметра P рекомендуется рассматривать три группы загрязнения воздуха: высокое, повышенное и пониженное.

Схемы прогноза загрязнения воздуха следует разрабатывать отдельно по сезонам года. Такой подход позволяет более полно учитывать метеорологические характеристики, определяющие высокое содержание примесей в конкретную часть года.

Обычно используются два метода: последовательной графической регрессии и распознавания образов.

5.1 Прогноз загрязнения воздуха методом последовательной графической регрессии

При разработке прогностической схемы по методу последовательной графической регрессии на первом этапе с использованием пар предикторов строятся корреляционные графики, на каждом из которых представляется поле среднего значения обобщенного по городу показателя P или повторяемости его высоких значений. Эти характеристики, за каждый день однозначно определяемые на графиках по значениям двух исходных предикторов, используются в дальнейшем как комплексные метеорологические предикторы. На их основе строятся последующие графики. Процедура осуществляется до тех

пор, пока не останется один график, на котором представляется зависимость уровня загрязнения воздуха от итоговых показателей, включенных в схему предикторов.

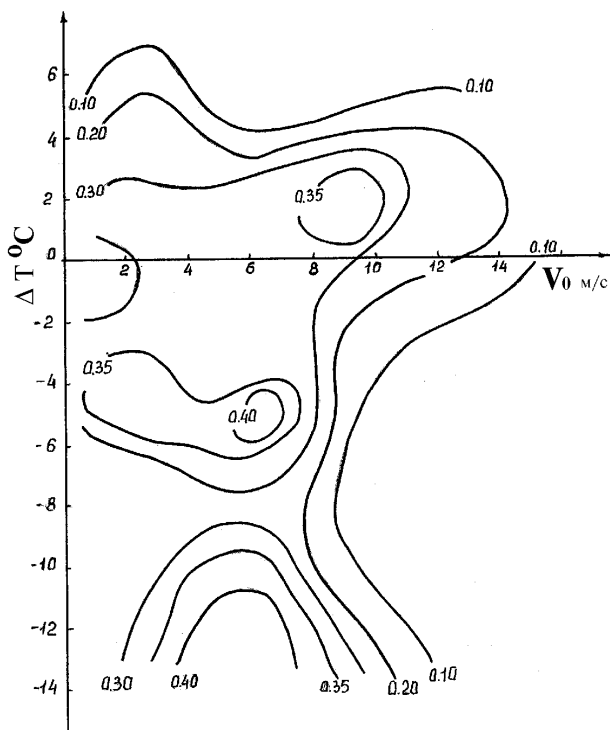
В соответствии с рекомендациями ГГО [6] при построении графиков для прогноза параметра P были взяты следующие предикторы: скорость ветра на высоте флюгера V_0 , м/с, $\Delta T = T_0 - T_{925}$, скорость ветра на уровне AT_{925} V_{925} , м/с, P' исходный параметр P .

На рис. 3-6 представлены графики для прогноза фонового загрязнения воздуха диоксидом серы (рис. 3) и диоксидом азота (рис. 5) летом и диоксидом серы (рис. 4) и диоксидом азота (рис. 6) зимой. На первых графиках (3(a) – 6(a)) показаны зависимости параметра P для каждой из примесей от разности температур в слое земля - AT_{925} (ΔT) и скорости ветра на уровне флюгера (V_0). Следует отметить, что графики имеют некоторые различия в разные сезоны для каждой из примесей. Однако высокое и повышенное загрязнение воздуха устанавливается при скорости ветра у земли, в основном не превышающей 6-8 м/с и при глубокой инверсии зимой и слабой неустойчивости летом.

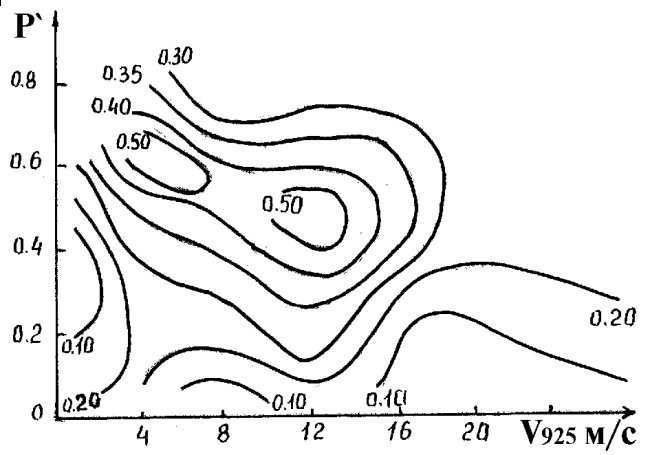
На вторых графиках (3(б) – 6(б)) рассматривается связь параметра P с его исходным значением (P') и скоростью ветра на изобарической поверхности AT_{925} (V_{925}).

Наибольшее значение для прогноза уровня загрязнения воздуха имеет инерционный фактор, т.е. исходное значение параметра P (P'), которое чаще всего сохраняется и на следующий день. В целом параметр P уменьшается с усилением скорости ветра, но выявляется эффект некоторого снижения загрязнения воздуха диоксидами серы и азота при малых скоростях ветра на AT_{925} .

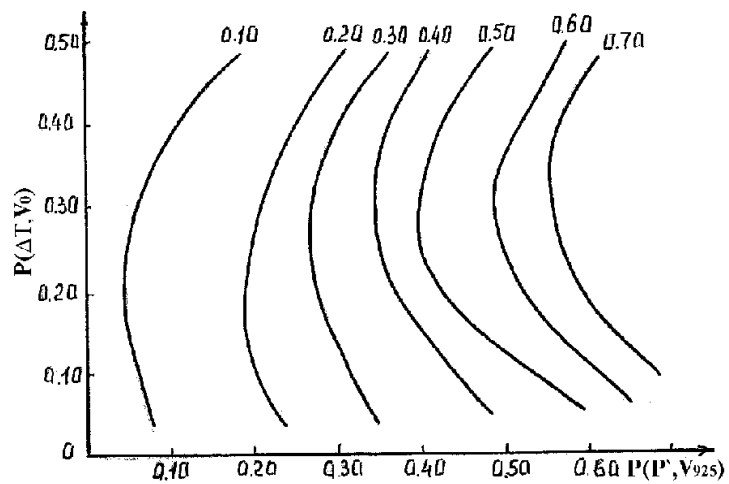
Прогностические значения параметра P для исследуемых примесей представлены на третьих графиках (3(в) – 6(в)), где отражена зависимость параметра P от всех используемых предикторов.



а



б



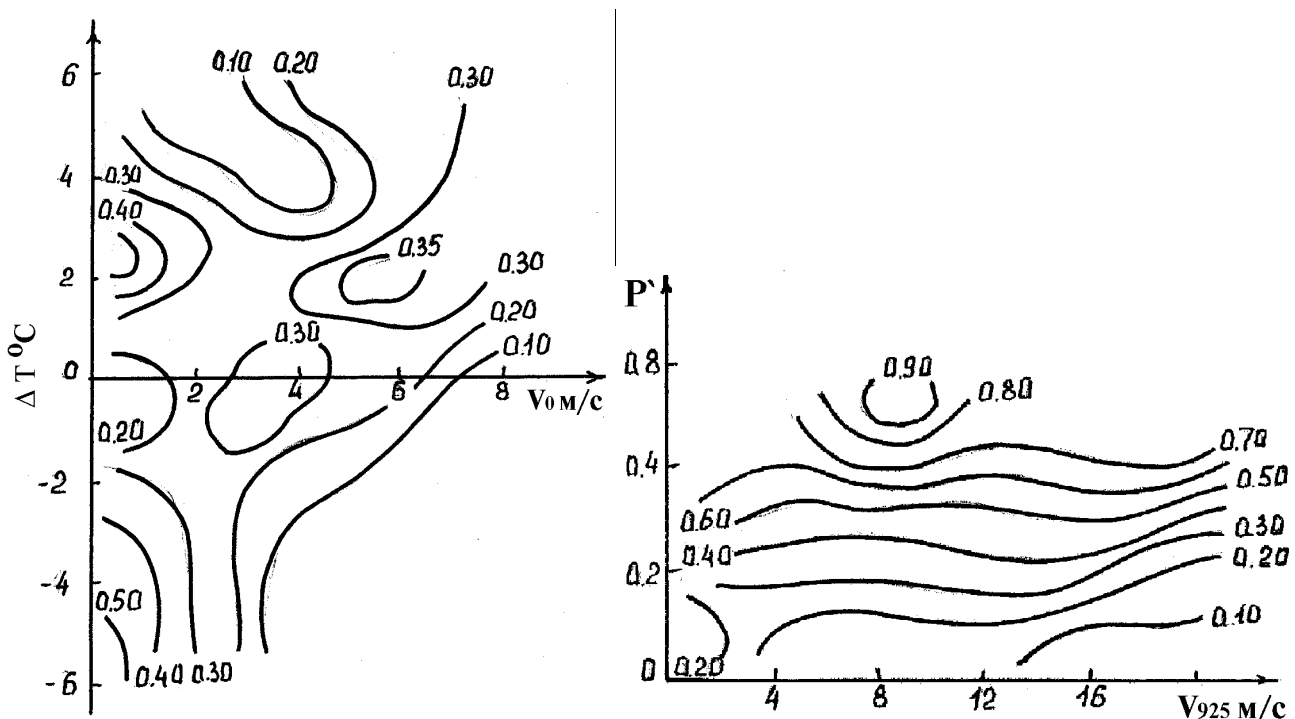
в

Рисунок 3 Графики для прогноза загрязнения воздуха диоксидом азота в Саратове зимой

а – первый предварительный график $[P(\Delta T, V_0)]$,

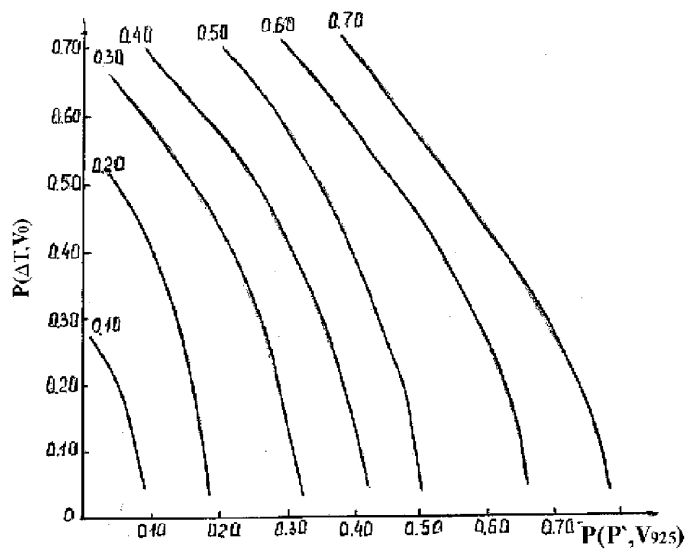
б – второй предварительный график $[P(P', V_{925})]$,

в – окончательный график $[P(\Delta T, V_0, P', V_{925})]$



а

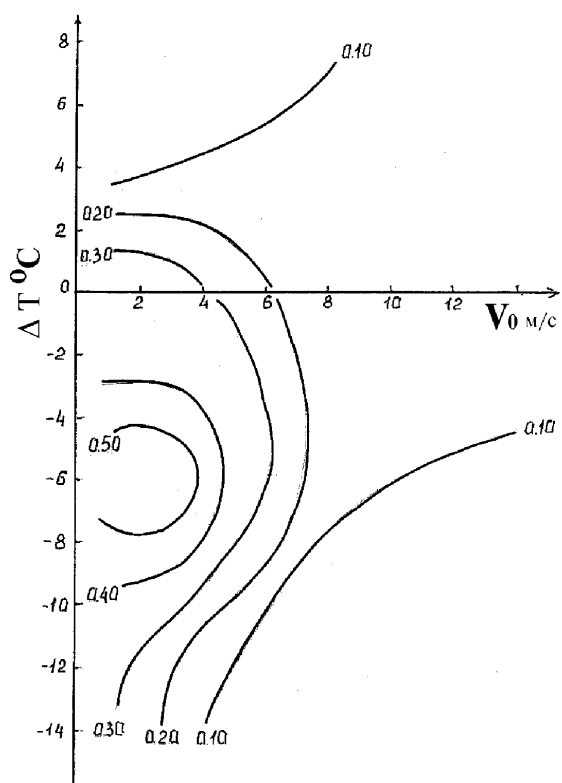
б



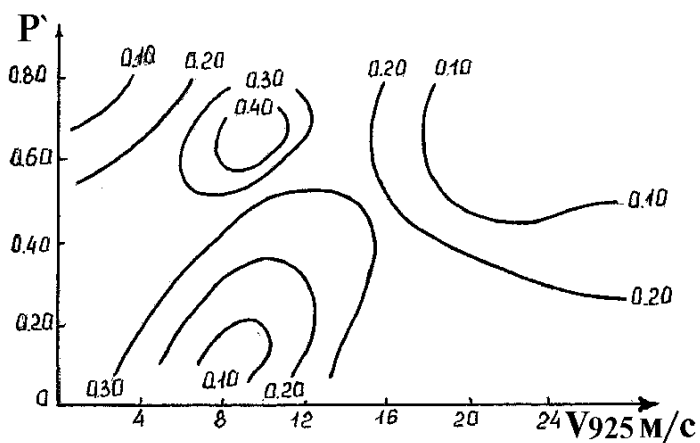
в

Рисунок 4 Графики для прогноза загрязнения воздуха диоксидом азота в Саратове летом

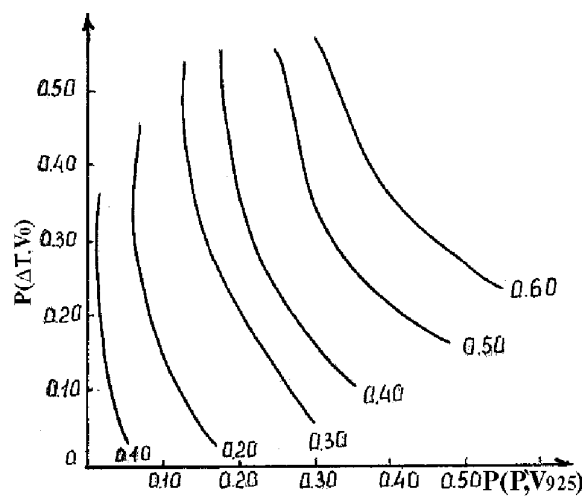
- а – первый предварительный график [$P(\Delta T, V_0)$],
- б – второй предварительный график [$P(P', V_{925})$],
- в – окончательный график [$P(\Delta T, V_0, P', V_{925})$]



а



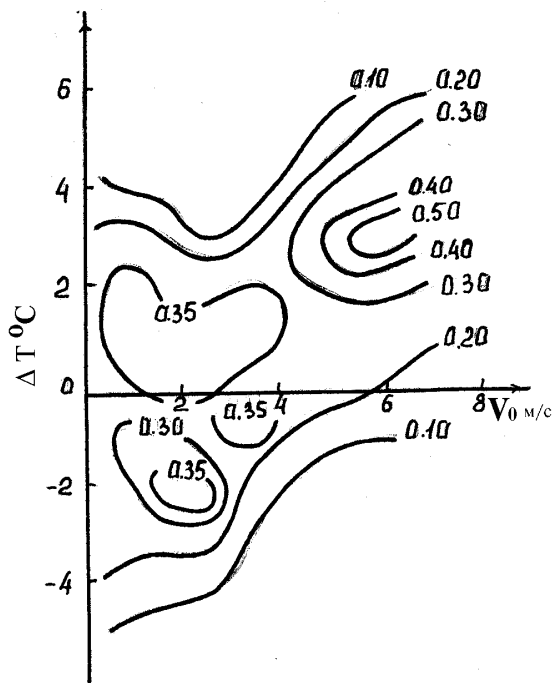
б



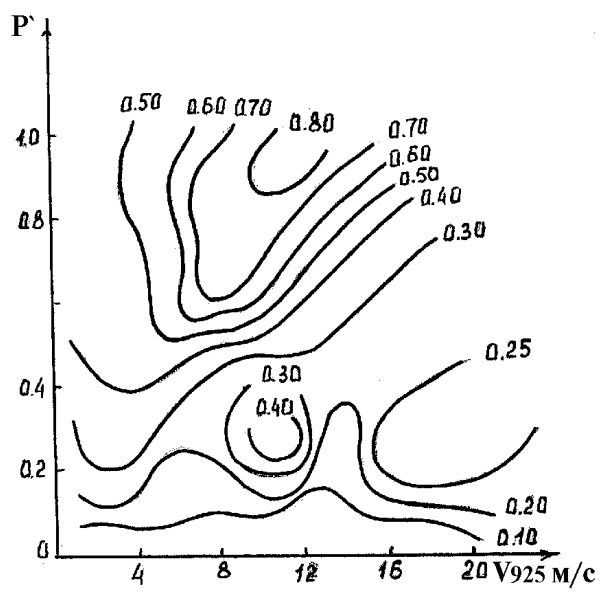
в

Рисунок 5 Графики для прогноза загрязнения воздуха диоксидом серы в Саратове зимой:

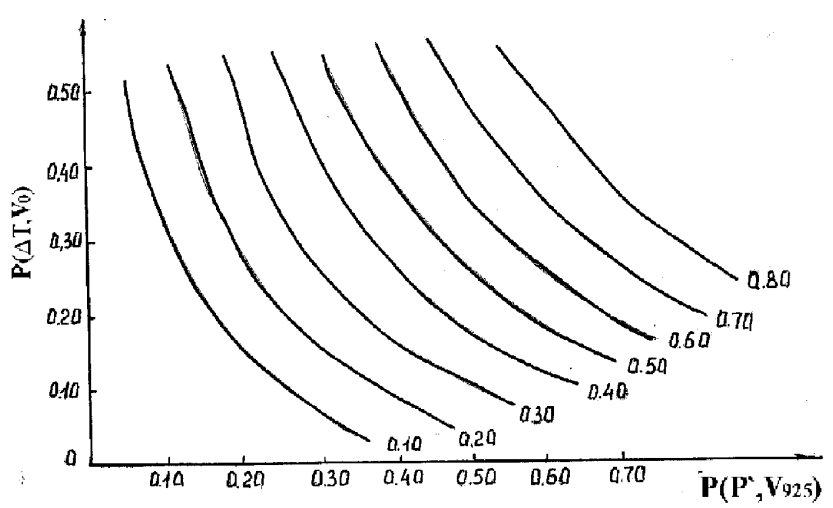
- а – первый предварительный график [$P(\Delta T, V_0)$],
- б – второй предварительный график [$P(P', V_{925})$],
- в – окончательный график [$P(\Delta T, V_0, P', V_{925})$]



а



б



в

Рисунок 6 Графики для прогноза загрязнения воздуха диоксидом серы в Саратове летом:

- а – первый предварительный график $[P(\Delta T, V_0)]$,
- б – второй предварительный график $[P(P', V_{925})]$,
- в – окончательный график $[P(\Delta T, V_0, P', V_{925})]$

5.2 Прогноз загрязнения воздуха методом распознавания образов

Сущность данного метода прогноза состоит в определении степени близости конкретной ситуации (комплекса предикторов) к характерным ситуациям, например, высокого (1-я группа), повышенного (2-я группа) и пониженного (3-я группа) уровней загрязнения воздуха.

Для каждой группы рассчитываются средние значения предикторов X и их среднеквадратические отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}, \quad (30)$$

где X_i — конкретные значения рассматриваемого предиктора;

N - количество случаев в данной группе;

\bar{X} - среднее значение предиктора в группе.

Близость между ситуацией конкретного дня и характерной ситуацией группы определяется по так называемому расстоянию между ними.

Пусть отобраны пять предикторов: v_0 , v_1 , ΔT , T_0 и P' . Тогда «расстояние» между данной ситуацией и ситуацией 1 группы ρ^2 рассчитывается следующим образом:

$$\rho_1^2 = \frac{(v_0 - \bar{v}_{01})^2}{\sigma_{v_{01}}^2} + \frac{(v_1 - \bar{v}_{11})^2}{\sigma_{v_{11}}^2} + \frac{(\Delta T - \bar{\Delta T}_1)^2}{\sigma_{\Delta T_1}^2} + \frac{(T_0 - \bar{T}_{01})^2}{\sigma_{T_{01}}^2} + \frac{(P' - \bar{P}'_1)^2}{\sigma_{P'_1}^2}. \quad (31)$$

Здесь \bar{v}_{01} , \bar{v}_{11} , $\bar{\Delta T}_1$, \bar{T}_{01} и \bar{P}'_1 — средние значения предикторов в 1 группе; $\sigma_{v_{01}}$, $\sigma_{v_{11}}$, $\sigma_{\Delta T_1}$, $\sigma_{T_{01}}$, $\sigma_{P'_1}$ — среднеквадратические отклонения соответствующих предикторов в 1 группе загрязнения воздуха.

Аналогичным образом рассчитываются ρ^2_2 и ρ^2_3 — «расстояния» между конкретной ситуацией данного дня и характерными ситуациями соответственно 2 и 3 группы загрязнения воздуха. Прогнозируется та группа, для которой ρ^2 имеет наименьшее значение.

Получены схемы прогноза загрязнения воздуха диоксидами серы и азота. При составлении схемы прогноза в качестве предикторов были взяты следующие характеристики: T_0 - температура воздуха у земли за 07 часов; V_0 - скорость ветра на уровне флюгера за 07 часов; $\Delta T = T_0 - T_{925}$ - разность температур на уровне земли и AT_{925} по данным радиозондирования за 03 часа; V_{925} - скорость ветра на уровне AT_{925} за 03 часа и P' - исходная величина параметра P .

В табл. 2 приведены эталоны предикторов для выделенных групп показателей загрязнения воздуха.

Таблица 2 - Средние значения X и средние квадратические отклонения σ предикторов для разных групп загрязнения воздуха диоксидом азота

Группа загрязнения	Предикторы									
	P'		T °C		V_0 , м/с		V_{925} , м/с		ΔT °C	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
	Зима									
1	0,35	0,25	-11,2	7,29	3	2,1	10	4,6	-2,9	5,4
2	0,26	0,16	-10,9	7,37	3	2,1	10	4,5	-3,2	4,3
3	0,19	0,14	-9,8	7,21	4	2,2	11	4,7	-2,6	4,4
	Лето									
1	0,50	0,26	18,4	3,2	2	1,4	8	4,5	0,4	2,0
2	0,17	0,17	19,0	3,1	2	1,0	6	4,2	0,1	1,5
3	0,11	0,13	17,9	3,4	2	1,5	8	2,8	0,2	2,1

В табл. 3 представлены результаты расчетов для прогноза загрязнения воздуха диоксидом серы в зимний и летний сезоны. Предикторы использовались те же, что и для прогноза диоксидом азота.

Таблица 3 - Средние значения X и средние квадратические отклонения σ предикторов для разных групп загрязнения воздуха диоксидом серы

Группа загрязнения	Предикторы									
	P'		T °C		V ₀ , м/с		V925, м/с		ΔT °C	
	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ	X	σ
	Зима									
1	0,39	0,17	-13,2	7,6	3	2,4	11	5,3	-3,4	4,9
2	0,20	0,25	-12,0	7,2	3	1,9	11	4,5	-2,4	5,5
3	0,12	0,13	-8,8	7,0	3	2,2	11	5,1	-2,8	4,9
	Лето									
1	0,51	0,24	18,2	3,2	2	1,5	7	3,8	0,5	1,7
2	0,28	0,14	18,7	3,3	2	1,3	8	5,2	-0,4	2,0
3	0,11	0,1	18,3	3,4	2	1,5	8	4,5	0,4	2,0

Анализ оправдываемости краткосрочного прогноза загрязнения воздуха отдельными примесями проведен на независимом материале. В табл. 4 и 5 представлены результаты этого анализа.

Таблица 4 - Оправдываемость прогноза загрязнения воздуха диоксидами азота и серы методом распознавания образов, %

Группа загрязнения	NO ₂		SO ₂	
	Зима	Лето	Зима	Лето
Высокое	77	66	65	52
Повышенное	67	73	72	38
Пониженное	74	72	63	59
Общая оправдываемость	73	71	66	54

Таблица 5 - Оправдываемость прогноза загрязнения воздуха диоксидами азота и серы методом последовательной графической регрессии, %

Группа загрязнения	NO ₂		SO ₂	
	Зима	Лето	Зима	Лето
Высокое	80	77	70	57
Повышенное	69	60	78	75
Пониженное	80	87	60	74
Общая оправдываемость	77	75	68	68

Метод последовательной графической регрессии имеет более высокую оправдываемость как общую, так и высокого загрязнения воздуха отдельными примесями.

Ранее было установлено, что для прогноза фоновое загрязнения воздуха совокупностью примесей в Саратове более эффективным является применение метода распознавания образов [8]. Полученные результаты оправдываемости прогноза загрязнения воздуха в Саратове близки к оправдываемости в других городах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Саратове в последние десятилетия вследствие сокращения производства произошло некоторое снижение количества выбросов вредных веществ в атмосферу, но в целом проблема загрязнения воздушной среды сохраняется.

На уровень загрязнения воздуха в Саратове, наряду с промышленным потенциалом, значительное влияние оказывает местоположение города в условиях сложного рельефа, климатические и микроклиматические особенности.

Размещение предприятий в пределах городской территории, наличие в атмосфере большого количества специфических загрязнителей и преобладание выбросов автотранспорта являются типичными для крупных городов России с развитой многоотраслевой промышленностью. Такие региональные особенности, как котловинообразное строение рельефа, континентальность климата, частая повторяемость инверсий, низкая проветриваемость центральных районов, расположение промплощадок в зоне основных воздуховодов города приводит к тому, что Саратов постоянно входит в перечень городов с низким качеством воздуха

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 17.2.3.01-86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. М., 1987.
2. Безуглая Э.Ю., Расторгуева Г.П., Смирнова И.В. Чем дышит промышленный город. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 256 с.
3. Безуглая Э.Ю., Завадская Е.К. Влияние загрязнения атмосферы на здоровье населения // Труды ГГО, 1998. Вып. 549. С. 199-214.
4. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89. М., 1991.
5. Владимиров А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 422 с.
6. Руководство по прогнозу загрязнения воздуха. РД 52.04.306092. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 104 с.
7. Охрана атмосферного воздуха // Бюллетень НИИ Атмосферы. 1999. № 10. 93 с.
8. Экология атмосферы крупного промышленного центра в условиях сложного рельефа. Фетисова Л.М., Пужлякова Г.А., Полянская Е.А. и др., Саратов, Изд-во Саратов. ун-та, 2004, 136 с.
9. Лайхтман Д.Л., Гисина Ф.А., Каплан С.Н. Принцип учета метеорологических условий при проектировании промышленных предприятий // Тр. ЛГМИ. 1963. Вып. 15. С. 57-65.
10. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Саратовской области в 2007 году. Саратов, 2007, С. 127-132.