

На правах рукописи

**КОСТАРЕВА Татьяна Викторовна**

**ПРОГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА  
ДЛЯ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РЕГИОНОВ  
(НА ПРИМЕРЕ УРАЛЬСКОГО РЕГИОНА)**

Специальность 25.00.30 Метеорология,  
климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт – Петербург  
2011

Работа выполнена в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова

Научный руководитель:

доктор географических наук  
Сонькин Лев Рахмилович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
Е. Л. Генихович

кандидат географических наук  
Н. С. Буренин

Ведущая организация:

Российский государственный  
гидрометеорологический университет

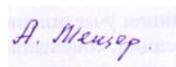
Защита диссертации состоится « 15 » февраля 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 327.005.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций в ФГБУ «ГГО» по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного учреждения «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова»

Автореферат разослан « 13 » января 2012 г.

Ученый секретарь совета по защите  
докторских и кандидатских диссертаций,

доктор географических наук



А. В. Мещерская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Одной из острых экологических проблем в крупных промышленных регионах остается проблема загрязнения воздуха. Для её решения и соответственно защиты здоровья населения в периоды неблагоприятных метеорологических условий большой интерес представляет задача прогнозирования и предотвращения экстремально высоких уровней загрязнения воздуха в городах (ЭВУЗВ), с которыми связаны наиболее неблагоприятные для населения и окружающей среды эпизоды. Имеются в виду опасные случаи высоких концентраций загрязняющих веществ, которые наблюдаются редко и могут быть приравнены к стихийным бедствиям, таким как наводнения, цунами, ураганы и др.

Указанная задача представляет особый интерес и для Уральского региона, где расположено много городов с развитой промышленностью, много предприятий, выбрасывающих в атмосферу вредные вещества. В наиболее неблагоприятные дни загрязнение воздуха может достигать катастрофического уровня. Особенности городов региона заключаются в ориентации их промышленности на использование металла, нефти и газа. Уральский регион относится к регионам с высоким уровнем загрязнения воздуха. Больше половины городов региона ежегодно фигурируют в Приоритетном списке с очень высоким уровнем загрязнения воздуха.

### Цель и задачи исследования

Целью данной диссертации является исследование закономерностей формирования ЭВУЗВ на территории крупных промышленных регионов, а также разработка эффективной схемы прогноза ЭВУЗВ с целью защиты атмосферы при неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ) в масштабе региона и в каждом из городов данного региона, в частности и при отсутствии специально разработанных схем прогноза ЭВУЗВ.

В соответствии с этой целью в диссертации были поставлены следующие задачи:

1. Выявить и исследовать условия формирования ЭВУЗВ в городах Уральского региона
2. В дни с экстремально высоким уровнем загрязнения воздуха определить связь между значениями обобщенного интегрального показателя загрязнения воздуха (параметра  $P$ ) и значениями концентраций примесей.
3. Исследовать особенности формирования ЭВУЗВ в целом по региону
4. Разработать статистические схемы прогноза ЭВУЗВ с использованием метода графической регрессии и метода множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей для городов Уральского региона
5. Оценить эффективность схем прогноза ЭВУЗВ на зависимом и независимом материале.

### Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Создана эффективная региональная система прогноза ЭВУЗВ в крупном промышленном регионе (на примере Уральского региона), а также в каждом из городов данного региона, с целью предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха, формирующихся в периоды НМУ.
2. Показана возможность и целесообразность использования одного и того же синоптического предиктора  $S_n$  для промышленных городов в пределах региона, так как по материалам ряда городов установлена тенденция к одновременному формированию ЭВУЗВ в городах региона
3. Показано, что в дни с значениями параметра  $P$ , соответствующими ЭВУЗВ, в городах региона реально имеют место опасные концентрации примесей в воздухе, значительно превышающие в ряде случаев предельно допустимые концентрации (ПДК).

4. Впервые по Уральскому региону проведена типизация синоптических процессов, способствующих накоплению вредных примесей в атмосфере с учетом географического происхождения, траектории движения барических образований, скорости ведущего потока по картам АТ 700 гПа или АТ 500 гПа, термического поля над регионом, а также длительности нахождения барического образования над рассматриваемым районом.

5. Даны рекомендации по прогнозу ЭВУЗВ с использованием единого синоптического предиктора в городах, для которых имеющихся материалов недостаточно для разработки методов прогноза загрязняющих веществ.

6. Получены общие по региону характеристики загрязнения воздуха с использованием метода разложения по естественным ортогональным функциям для оценки ожидаемого общего состояния загрязнения воздуха в регионе по материалам пяти Уральских городов.

### **Практическая ценность и реализация результатов работы**

Разработанные схемы прогноза ЭВУЗВ позволяют заблаговременно предсказывать в городах региона подавляющее большинство (79% - 92%) случаев экстремально высокого уровня загрязнения воздуха. Авторские испытания предложенного метода, проведенные по независимым материалам наблюдений пяти городов (Пермь, Екатеринбург, Соликамск, Березники, Губаха), подтвердили его эффективность. Схемы прогноза ЭВУЗВ в настоящее время используются в оперативной работе в городах Уральского региона. Они могут быть рекомендованы для оперативного использования во всех крупных промышленных регионах. Разработанные схемы прогноза ЭВУЗВ для городов Уральского региона размещены на сайте ГМЦ России в Методическом кабинете.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы вошли в Методические рекомендации, подготовленные для апробации в региональных управлениях Росгидромета, докладывались на международной научной конференции, проводившейся в Уральском отделении РАН (г. Екатеринбург, 2011г.), научно-методических курсах повышения квалификации для руководящих работников и специалистов Росгидромета "Современные задачи мониторинга загрязнения атмосферы" в Санкт-Петербурге (2006 г), на Ученом Совете ГГО, семинарах отдела исследования и мониторинга загрязнения атмосферы в ГГО; работа участвовала в региональном конкурсе исследовательских работ «Экология. Человек года», где была отмечена благодарностью; работа участвовала в конкурсе Росгидромета на лучшие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, признана лучшей региональной работой, присуждена ведомственная премия.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения. Она содержит 234 страницы, включая 30 рисунков, 19 таблиц и библиографию из 142 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы, дается общая характеристика работы, формулируются цели и основные задачи исследования, отмечается его научная новизна и практическая ценность.

**Первая глава** посвящена обзору экологического состояния загрязнения воздушного бассейна в городах Уральского региона, рассматриваются основные закономерности распространения примесей в атмосфере городов, а также влияние метеорологических условий на создание высоких уровней загрязнения воздуха. Рассматриваются вопросы

теоретических и экспериментальных исследований процесса распространения примесей в атмосфере городов, а также работы по краткосрочному прогнозированию загрязнения атмосферы, выполненные как в нашей стране, так и в ряде зарубежных стран.

В разделе 1.1 описано современное состояние загрязнения воздуха в городах Уральского региона. За последние годы по данным «Ежегодников состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России» количество городов с высоким уровнем загрязнения атмосферы снизилось со 145 до 136. Количество городов Приоритетного списка с высоким уровнем загрязнения атмосферы с тридцати семи в 2007 г. снизилось до тридцати в 2008 г. Несмотря на это, в городах Уральского региона уровень загрязнения воздуха остается высоким. В городах Уральского региона наибольший вклад в выбросы загрязняющих веществ вносят предприятия химической, нефтехимической и топливной промышленности. За пятилетний период 2004–2008 гг. возросли средние за год концентрации в городе Перми взвешенных веществ, фторида водорода и бенз(а)пирена, в городе Екатеринбурге — аммиака, формальдегида и этилбензола, в городах Березники, Губаха, Соликамск — бензола и этилбензола. Среднегодовые концентрации отдельных примесей превышают ПДК во всех городах региона, Так в 2008 год в Перми средняя за год концентрация формальдегида составила 3 ПДК, фторида водорода — 1,4 ПДК, бенз(а)пирена — 2,6 ПДК; в г. Екатеринбурге средняя за год концентрация формальдегида составила 5 ПДК, диоксида азота — 2 ПДК, бенз(а)пирена — 1,6 ПДК.

Максимальные значения концентраций примесей, превышающие в 10 раз максимальные разовые ПДК (ПДК<sub>мр</sub>), в 2007 и 2008 годах наблюдались в большинстве городов Уральского региона. Число жителей, многократно испытывающих воздействие такого высокого уровня загрязнения воздуха, составляет в регионе более 5 млн. человек. В 2007 году города Пермь, Соликамск, Екатеринбург входили в Приоритетный список городов с очень высоким уровнем загрязнения воздуха в России, в 2008 году — город Екатеринбург.

В разделе 1.2 кратко изложены результаты теоретических исследований, выполненных в ГГО под руководством профессора М. Е. Берлянда. Приводятся описания основных закономерностей изменения характеристик загрязнения воздуха от источников выбросов различных типов под влиянием метеорологических условий. В этом же разделе излагаются результаты анализа влияния метеорологических условий на уровень загрязнения воздуха.

Изменения уровня загрязнения воздуха по городу в целом определяются множеством факторов, доминирующее значение среди которых принадлежит метеорологическим условиям: скорости и направлению ветра, устойчивости атмосферы, слоям инверсии и изотермии, температуре воздуха, облачности, туманам, инерционным факторам и др. Результаты, представленные в данной главе, получены на основании выполненного автором анализа фактических материалов по городам Уральского региона с учетом имеющихся выводов ряда авторов в других городах России. Так, в городе Пермь при юго-западном ветре жилая зона города, расположенная северо-восточнее промышленного комплекса, загрязняется более интенсивно, чем при других направлениях ветра. Для города Березники неблагоприятное направление ветра – северное и северо-западное. В целом в городах Уральского региона зависимость загрязнения воздуха от направления ветра соответствует характеру расположения источников и эффекту наложения выбросов.

В зависимости от скорости ветра, как и в ряде других городов, отмечаются два максимума загрязнения воздуха - при штиле и при скорости ветра 4 - 6 м/с. Первый максимум обусловлен действием низких источников и автотранспортом, создающих общий фон загрязнения воздуха. Второй максимум обусловлен мощными выбросами высоких источников, для которых опасная скорость ветра равна 4 - 6 м/с.

Связь между температурой воздуха и загрязнением приземного слоя атмосферы в городах обуславливается несколькими обстоятельствами. В городах Уральского региона отмечается тенденция к повышению уровня загрязнения воздуха при росте температуры воздуха, особенно в летний период (Рис.1). Это проявляется при рассмотрении

температуры в слое ОТ-500/1000. На рис.1 показана зависимость параметра Р от температуры в слое 500/1000 летом в городе Соликамске.

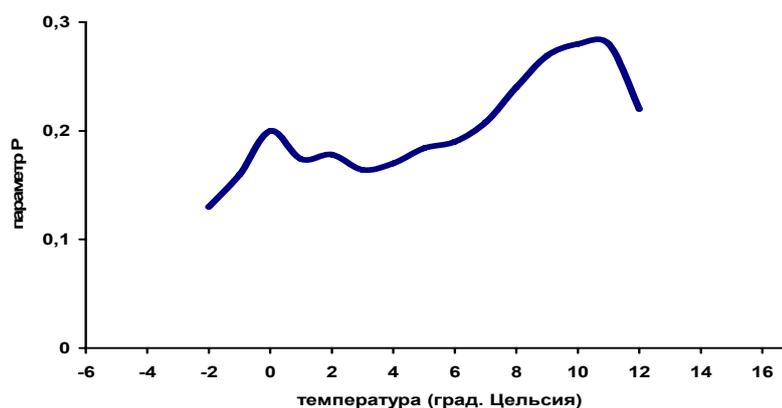


Рис. 1 Зависимость параметра Р от температуры в слое 500/1000 летом, г. Соликамск

Зимой высокий уровень загрязнения воздуха в городах региона имеет место в первую очередь в условиях застоя воздуха. Обработка фактического материала наблюдений в нескольких городах Уральского региона показала, что повторяемость случаев высокого загрязнения воздуха при застоях воздуха в среднем составляет 74%.

Осадки оказывают значительное влияние на уровень загрязнения воздуха в городах. По материалам наблюдений в Перми была изучена зависимость уровня загрязнения воздуха от осадков. В таблице 1 показаны значения параметра Р в дни с осадками и без осадков в феврале и июле .

Таблица 1

Зависимость параметра Р от осадков в г. Пермь

Месяц	Среднее значение параметра Р	
	В дни с осадками	В дни без осадков
Февраль	0,20	0,30
Июль	0,14	0,29

В разделе 1.3 приводится обзор работ по краткосрочному прогнозированию загрязнения атмосферы.

В настоящее время разработаны разные методы прогноза загрязнения воздуха. При этом отмечаются два подхода: детерминированный и статистический.

В основу детерминированных методов положены разработки теории атмосферной диффузии на основе математического описания распространения примесей с помощью уравнения турбулентной диффузии. Подробная библиография по данному вопросу приведена в монографии М. Е. Берлянда.

Статистические методы прогноза загрязнения воздуха в городах базируются на эмпирико-статистическом анализе материалов наблюдений за концентрациями примесей в воздухе и сопутствующими метеорологическими и синоптическими условиями. Методы краткосрочного прогнозирования загрязнения атмосферы получили в России широкое развитие. В работах группы специалистов Главной геофизической обсерватории, возглавляемой Л.Р. Сонькиным, разработана методология и успешно внедрены в оперативную практику Росгидромета методы прогноза от одиночных источников и интегральных показателей загрязнения по городу в целом. Такие методы активно используются и за рубежом. В основу этих разработок положен учет реального вида связей между загрязнением воздуха и метеорологическими и синоптическими условиями. В качестве прогнозируемой величины обычно используется параметр Р, который является

вероятностной характеристикой превышения концентраций, измеренных в течение дня на всех постах наблюдения в городе, по отношению к некоторому среднему уровню загрязнения. Он определяется по формуле:  $P = m/n$ , где  $n$  – общее количество наблюдений за концентрацией примесей в городе в течение одного дня на всех стационарных постах;  $m$  – количество наблюдений в течение этого дня с концентрациями  $q$ , которые превышают среднесезонное значение  $q_{\text{ср}}$  более чем в 1.5 раза ( $q > 1.5q_{\text{ср}}$ ).

В разделе 1.4 рассматривается проблема прогноза экстремально высокого уровня загрязнения воздуха (ЭВУЗВ). Под ЭВУЗВ по городу в целом принимаются редко встречающиеся случаи (1-2%) с наибольшими значениями обобщенного показателя загрязнения воздуха. Параметр  $P$  в этих случаях обычно равен или превышает 0,5. Большую роль в формировании высоких уровней загрязнения воздуха играет инерционный фактор. Для установления синоптических процессов формирования ЭВУЗВ в каждом городе в отдельности по многолетнему ряду наблюдений за предшествующие годы отдельно по сезонам выбираются случаи, попадающие в 2% дней с наибольшими значениями параметра  $P$  или другого интегрального показателя. Рассматриваются синоптические ситуации, соответствующие этим случаям, устанавливаются характерные ситуации. Затем такие ситуации отбираются по всему материалу, который используется при выполнении разработок. Если при заданной ситуации наряду с ЭВУЗВ имеют место случаи с относительно низким уровнем загрязнения, то ситуация уточняется. В первую очередь изучаются различия ситуации в случаях с экстремально высоким уровнем загрязнения воздуха и в случаях с низким уровнем загрязнения воздуха. С учетом характера синоптических ситуаций, особенностей развития синоптических процессов, а также инерционного фактора в ГГО им. Воейкова был сформулирован ряд правил для прогноза ЭВУЗВ. Правила относятся как к отдельному городу, для которого составляется прогноз, так и для всего региона, расположенного в зоне данной неблагоприятной ситуации. Сформулированные прогностические правила для прогноза ЭВУЗВ общие, поэтому в каждом регионе, с учетом его особенностей, необходимо их уточнять.

**Во второй главе** рассматриваются условия формирования ЭВУЗВ в городах Уральского региона, приводятся сведения о данных, использованных при разработке схем прогноза.

В разделе 2.1 рассмотрены результаты анализа экстремальных случаев загрязнения воздуха в городах Уральского региона. Предварительно для каждого из городов региона были рассчитаны свои критерии ЭВУЗВ. Для этого по всему ряду наблюдений, с учетом 2% - ной повторяемости, были выбраны случаи с наибольшими значениями параметра  $P$ . В г. Березники к ЭВУЗВ относятся случаи со значением параметра  $P \geq 0,42$ , как для летнего, так и зимнего периодов. В г. Соликамске для летнего периода это дни со значением параметра  $P \geq 0,38$ , для зимнего -  $P \geq 0,40$ . В г. Екатеринбурге для летнего периода это дни со значением параметра  $P \geq 0,40$ , для зимнего -  $P \geq 0,60$ . В г. Перми для летнего периода это дни со значением параметра  $P \geq 0,42$ , для зимнего -  $P \geq 0,45$ . В г. Губаха для летнего периода это дни со значением параметра  $P \geq 0,45$ , для зимнего периода -  $P \geq 0,50$ . Далее в процессе анализа материалов пяти уральских городов достаточно определенно выявилось, что в дни с большими значениями параметра  $P$  (в дни с ЭВУЗВ) в городах возникают опасные условия. Так, во всех городах региона в дни с экстремально высоким уровнем загрязнения воздуха на всех постах наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха отмечались концентрации различных примесей, превышающие ПДК от 3 до 10 раз. Превышение концентраций примесей над  $1,5q$  среднесезонными (используется при расчете ежедневного значения обобщенного интегрального показателя загрязнения воздуха) в летний период составило от 3 до 10,5 раз, в зимний - в 2-13 раз. В отдельные дни превышение концентраций вредных примесей над  $1,5q$  среднесезонными было в 13-65 раз.

По данным для этих городов наибольшие концентрации диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода превышают в дни с ЭВУЗВ  $1,5q_{\text{ср}}$  в 7 – 9 раз и более, сероводорода, формальдегида, соляной кислоты, оксида азота – в 30 – 50 раз. Концентрации вредных веществ в воздухе в такие дни значительно превышают ПДК. В Перми и Соликамске при

ЭВУЗВ концентрации сероводорода превышают ПДК в 8 – 10 раз. Концентрации других измеряемых примесей во всех городах региона превышают ПДК в такие дни в 3 – 5 раз.

Повторяемость случаев превышения ПДК по градациям для пяти городов Уральского региона представлена в таблице 2. В этой же таблице для сравнения приведена повторяемость случаев превышения ПДК по градациям для этих же городов в дни со значением параметра  $P < 0,10$ , что соответствует пониженному уровню загрязнения воздуха.

Таблица 2

Повторяемость (%) случаев превышения ПДК по градациям в дни с ЭВУЗВ (в числителе) и в дни с пониженным ( $P < 0,10$ ) уровнем загрязнения воздуха (в знаменателе)

Город	Число случаев ЭВУЗВ/ $P < 0,10$		ПДК		$\geq 3$ ПДК		$\geq 5$ ПДК	
	зима	лето	зима	лето	зима	лето	зима	Лето
Пермь	22/97	12/58	100/14	100/29	64/2	8/3	27/1	8/-
Березники	9/98	10/87	100/23	100/46	33/1	50/-	-/-	20/-
Соликамск	8/38	14/47	100/16	100/36	25/-	36/4	-/-	29/-
Екатеринбург	12/45	13/127	100/17	100/22	58/2	23/2	8/2	-/1,5
Губаха	19/79	12/111	90/16	83/21	21/1	17/3	-/1	-/0,9

Анализ материалов показал, что во всех городах Уральского региона в дни с ЭВУЗВ одновременно на нескольких или на всех постах общегосударственной службы наблюдений и контроля над загрязнением атмосферы (ОГСНКА) сразу по нескольким примесям превышение ПДК составляет в зимний период 90% - 100%, в летний период – 83% – 100%; превышение 3 ПДК, составляет в зимний период от 21% до 64%, в летний — от 23% до 50 %, в г. Губаха 17%, в Перми 8%;. превышение 5 ПДК составляет от 8% до 29%. В дни с пониженным уровнем загрязнения воздуха превышение ПДК отмечается лишь на отдельных постах по отдельным примесям. В зимний период оно составляет от 14% до 23%, в летний период – 21% – 36%, лишь в г. Березники – 46%; превышение 3 ПДК составляет в зимний период от 1% до 2%, в летний - от 2% до 4 %; превышение 5 ПДК в отдельных городах региона составляет 1% - 2%.

Таким образом, проведенный анализ убедительно продемонстрировал, что во всех без исключения отобранных случаях с ЭВУЗВ концентрации примесей в воздухе во всех городах региона превышают ПДК.

В разделе 2.2 приводится классификация синоптических условий формирования ЭВУЗВ в городах Уральского региона.

По Уральскому региону такая классификация проведена впервые. Анализ выполнялся по приземным и высотным картам за 00 часов всемирного скоординированного времени (ВСВ) за шестилетний период (2000-2005гг). Были прослежены и изучены траектории движения барических образований, вычислены скорости их движения, по картам АТ 500гПа или АТ 700гПа были определены местоположение и ориентация ложбин и гребней. Термические условия проанализированы по картам АТ 850гПа и ОТ 500/1000. Учитывались географическое происхождение барических образований, а также длительность их нахождения над рассматриваемым регионом.

При установлении критерия ЭВУЗВ за шестилетний период было проанализировано около 1800 случаев. Учитывались все 12 месяцев года. При разработке схем прогноза ЭВУЗВ использовались данные только по летним и зимним месяцам.

За зимний период по данным города Перми было рассмотрено и проанализировано 426 случаев. Отмечалось двадцать два случая ЭВУЗВ, из них девять случаев отмечалось, когда над районом располагался центр стационарного антициклона, восемь случаев в

малоградиентной северо-западной части гребня Сибирского антициклона и пять случаев в малоградиентном поле.

За летний период было проанализировано 429 случаев, ЭВУЗВ отмечался двенадцать раз: шесть случаев - в малоградиентном поле и пять случаев – в центре антициклона.

В результате анализа были выявлены синоптические ситуации, при которых формируется экстремально высокий уровень загрязнения воздуха в городах региона. Они приведены на рисунках 2-5.

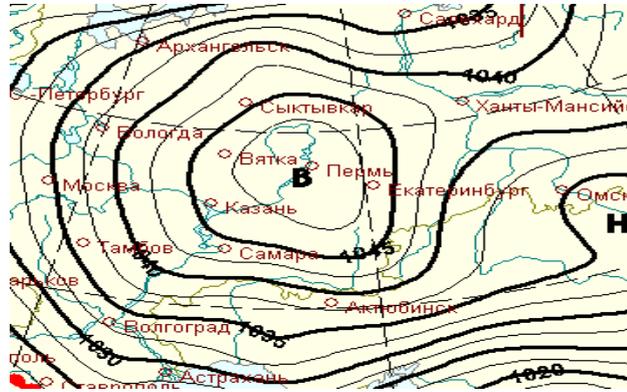


Рис. 2 Стационарный антициклон

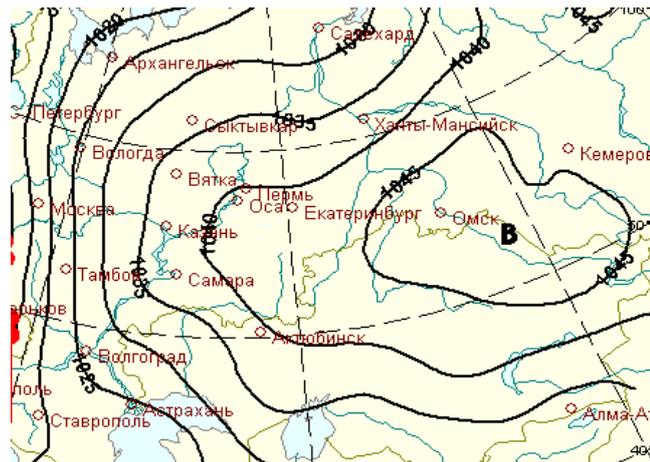


Рис. 3 Малоградиентная северо-западная часть гребня Сибирского антициклона

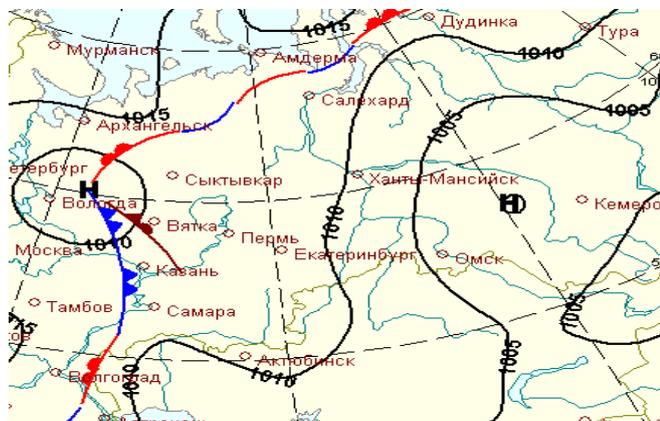


Рис. 4 Малоградиентное поле

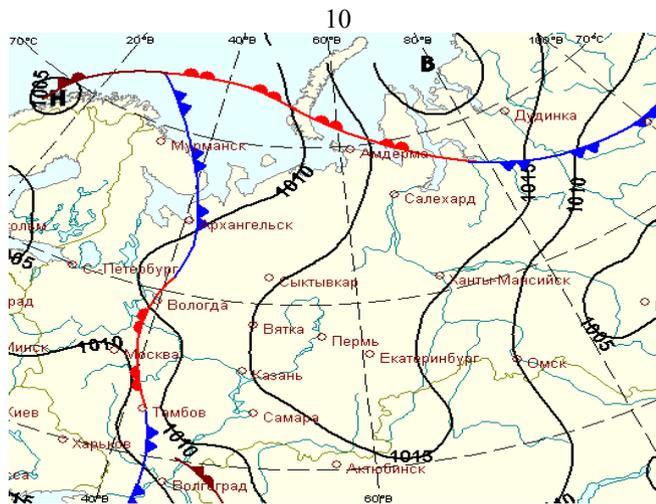


Рис. 5 малоградиентная южная периферия арктического антициклона

Оказалось, что при выявленных ситуациях наблюдались и пониженные уровни загрязнения воздуха. Для выявления особенностей возникновения ЭВУЗВ в одних случаях и отсутствия в других ситуации уточнялись. Были установлены различия в близких ситуациях при ЭВУЗВ и при пониженных уровнях.

В процессе выполненного уточнения, получены следующие выводы:

В летний период при антициклонах, смещающихся из северо-западных районов ЕТР на территорию Уральского региона и антициклонах, сформировавшихся при ультраполярных вторжениях в тыловых частях циклонов, ЭВУЗВ никогда не отмечается.

ЭВУЗВ в летний период отмечается только при антициклонах, смещающихся с юго-западных районов ЕТР на территорию Уральского региона или при распространении гребня Азорского антициклона на территорию региона. На высотах обычно отмечается малоградиентное поле повышенного давления. Над районом в эти дни расположена периферия очага тепла или очаг тепла, температура в слое 500/1000 выше  $7^{\circ}\text{C}$ .

В зимний период ЭВУЗВ при синоптической ситуации «центр антициклона» отмечается при любом типе антициклонов. Характерными особенностями наличия ЭВУЗВ в центре антициклона в зимний период являются:

1. Антициклон сохраняется над районом два дня и более (стационарный малоподвижный антициклон).
2. Параметр  $P'$  имеет повышенное значение ( $P \geq 0,20$ ).
3. Ветер слабый (0-2м/с), как приземный, так и градиентный
4. Наличие приземных инверсий мощностью 500-1700м, интенсивностью более  $14^{\circ}\text{C}$ .
5. Температура в слое 500-1000м от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-13^{\circ}\text{C}$ .
6. На карте ОТ 500/1000 отмечается очаг тепла или его периферия.

Экстремально высокий уровень загрязнения воздуха в зимний период никогда не встречается, если:

1. Центр антициклона располагается над регионом первые сутки или быстро смещается.
2. Значения исходного уровня загрязнения воздуха низкие ( $P' \leq 0,20$ )
3. На карте ОТ 500/1000 над районом располагается очаг холода или его периферия.
4. Температура в слое 500-1000м ниже  $-13^{\circ}\text{C}$ .

Экстремально высокий уровень загрязнения воздуха (ЭВУЗВ) при синоптической ситуации «северо-западная часть гребня Сибирского антициклона» в зимний период отмечается при следующих условиях:

1. Ветер у земли юго-восточный или переменный, не более двух метров в секунду.
2. Градиентный ветер – юго-восточный, южный не более 6м/с.
3. Наличие приземных инверсий мощностью 800-1200м и интенсивностью  $2-14^{\circ}\text{C}$ .
4. Синоптическая ситуация сохраняется над районом двое суток и более.
5. Ведущие потоки над районом юго-восточные ( $140^{\circ} - 160^{\circ}$ ) – не более 5м/с.
6. Наличие над территорией Урала мощного высотного антициклона

ЭВЗУВ при этой же синоптической ситуации никогда не отмечается, если:

1. Градиентный ветер более 6м/с
2. Отсутствует приземная инверсия или отмечается приподнятая инверсия с нижней границей 0,4-0,6км.
3. Скорость ведущего потока по картам АТ 700гПа и АТ 500гПа 10 м/с и более.
4. Территория региона находится в северной или северо-западной части высотного гребня.

Экстремально высокий уровень загрязнения воздуха при синоптической ситуации «малоградиентное поле» в зимний период отмечается, если одновременно выполняются три условия:

1. Над рассматриваемым районом в вышележащих слоях расположен очаг тепла или его периферия.
2. Скорость ветра у земли и на высотах не более 5 м/с
3. В утренние часы отмечается приземная инверсия.

В летний период ЭВЗУВ отмечается только при синоптической ситуации «малоградиентная южная периферия арктического антициклона». Для этой синоптической ситуации характерно наличие обширного, меридионально расположенного антициклона с центром в районе Обской Губы. Территория Уральского региона находится под влиянием его малоградиентного гребня. На картах барической топографии (АТ 700гПа и АТ 500гПа) над территорией региона расположена ось высотного гребня или центр антициклона. ЭВЗУВ отмечается при наличии очага тепла или его периферии над рассматриваемым районом. Температура в слое 500/1000 в этот период от 7,5<sup>0</sup> до 11,5<sup>0</sup>С.

Классификация синоптических процессов четко выявила синоптические ситуации, при которых формируется экстремально высокий уровень загрязнения воздуха в регионе. Полученные результаты будут использованы при разработке схем прогноза ЭВЗУВ для городов Уральского региона.

**В третьей главе** формулируется основная задача работы, которая заключается в прогнозировании ЭВЗУВ в крупном промышленном регионе, а также приводятся синоптико-статистические схемы прогноза ЭВЗУВ в городах Уральского региона.

В разделе 3.1 представлены основные положения синоптико-статистических схем прогноза ЭВЗУВ и подход к решению задачи прогноза.

Решение задачи прогноза ЭВЗУВ включает два этапа. Первый из них касается анализа метеорологических, в первую очередь, синоптических условий формирования высоких уровней загрязнения воздуха и установления на основе этого анализа прогностических правил, приведенных во второй главе. Второй этап включает разработку специальных статистических схем для данного вида прогнозов.

Для разработки схем прогноза ЭВЗУВ использовался ряд наблюдений, в который включены были только дни с повышенным уровнем загрязнения воздуха. Исходя из этого в схемы прогноза для городов Пермь, Березники, Соликамск и Губаха были включены все случаи со значением параметра  $P > 0,20$ , для города Екатеринбурга для зимнего периода это дни со значением параметра  $P \geq 0,30$ .

В разделе 3.2 излагается способ установления синоптического предиктора, с целью его использования в схемах прогноза ЭВЗУВ.

Для учета зависимости уровня загрязнения воздуха от синоптических условий в прогностических схемах вводится количественный синоптический предиктор. Одной из возможностей получения такого предиктора является кодировка типов синоптических ситуаций баллами. Для разработки синоптико-статистических схем прогноза ЭВЗУВ существующий способ установления синоптического предиктора  $S_n$  неприменим, вследствие малого числа случаев ЭВЗУВ в отдельном городе. Для оценки факторов, влияющих на формирование ЭВЗУВ, был применен новый подход с использованием системы баллов. Комплексная оценка степени опасности синоптической ситуации  $S_n$  складывалась из суммы баллов ее отдельных составляющих:  $S_n = B_{тс} + B_{пс} + B_{пр} + B_{ос}$  (1),

где  $B_{тс}$  – балл текущей ситуации,

$B_{пс}$  – балл предшествующей ситуации,

$B_{пр}$  – балл преобразования синоптических процессов,

Бос - балл неблагоприятных особенностей синоптических процессов.

При установлении балла текущей ситуации, все синоптические ситуации были разделены на группы в соответствии с их влиянием на создание высоких уровней загрязнения в городе. Была учтена классификация синоптических процессов, изложенная выше, а также повторяемость высокого и экстремально высокого уровня загрязнения воздуха при определенной синоптической ситуации (Таблицы 3 и 4).

Таблица 3

Баллы синоптических ситуаций, зимний сезон

№ группы	синоптические ситуации	баллы	Уровни загрязнения воздуха				общее число случаев
			пониженное $P \leq 0,20$	повышенное $0,35 \geq P > 0,20$	высокое $\text{ЭВУЗВ} > P > 0,35$	ЭВУЗВ	
1	Аст., ПАСЗ, ПАЗ с $V_o \leq 6 \text{ м/с}$	4	-	-	7 41%	10 59%	17
2	М, Ситуации №1 первые сутки	3	14 27,5%	21 41%	13 25,5%	3 6%	51
3	ПЦЮ, ПЦЮВ, ПАВ	2	21 58%	15 42%	-	-	36
4	ПАЗ, ПАСЗ с $V_o > 6 \text{ м/с}$	2	52 83%	7 11%	4 6%	-	63
5	Ц, ПЦВ, ПЦС	1	45 74%	14 23%	2 3%	-	61
6	ПАС, ПАСВ, ПАЮЗ, ПАЮ, ТЦ, Л, Цтс	0	158 85%	28 15%	-	-	186

Таблица 4

Баллы синоптических ситуаций, летний сезон

№ группы	синоптические ситуации	баллы	Уровни загрязнения воздуха				общее число случаев
			пониженное $P \leq 0,20$	повышенное $0,35 \geq P > 0,20$	высокое $\text{ЭВУЗВ} > P > 0,35$	ЭВУЗВ	
1	Аст., Га, М	4	-	9 39%	3 13%	11 48%	23
2	Ситуации №1 первые сутки	3	13 18%	47 64%	14 18%	-	74
3	ПАЮ, ПАЮЗ, ПАВ, ПАЗ, ПАСЗ	2	26 39%	34 52%	5 8%	1 1%	66
4	Мц	2	25 52%	22 46%	1 2%	-	48
5	ПАС, Л, Цтс	1	48 65%	25 34%	1 1%	-	74
6	ПАСВ, ПАЮВ, Ц, ТЦ, ПЦВ, ПЦЮ, ПЦС	0	161 89%	20 10,5%	1 0,5%	-	182

К 1 группе были отнесены наиболее неблагоприятные ситуации и оценены в 4 балла. Зимой это стационарный антициклон ( $A_{ст}$ ), западная и северо-западная части гребня Сибирского антициклона при скорости ветра  $V_o \leq 6 \text{ м/с}$  (ПАСЗ, ПАЗ), летом – стационарный антициклон ( $A_{ст}$ ), малоградиентная южная часть арктического гребня ( $\Gamma_a$ ) и малоградиентное поле повышенного давления (М).

Неблагоприятные ситуации были включены во 2 группу и оценены в 3 балла. В эту группу вошли ситуации 1 группы в первый день их действия. В зимний период дополнительно малоградиентное поле (М).

В 3 группу зимой включены следующие синоптические ситуации – южная, юго-восточная периферии циклона (ПЦЮ, ПЦЮВ), восточная периферия антициклона (ПАВ), летом – все периферии антициклона (ПАЮ, ПАЮЗ, ПАВ, ПАЗ, ПАСЗ), кроме северной и северо-восточной. К 4 группе в зимний период отнесены такие синоптические ситуации - западная и северо-западная периферии антициклона (ПАЗ, ПАСЗ с  $V_o > 6\text{ м/с}$ ), а в летний период - малоградиентное поле пониженного давления ( $M_{ц}$ ).

В 5 группу зимой включены восточная и северная части циклона (ПЦВ, ПЦС), центр циклона (Ц), летом – ложбина (Л), теплый сектор циклона ( $Ц_{тс}$ ) и северная периферия антициклона (ПАС).

Все остальные синоптические ситуации, не вошедшие в предыдущие группы, были отнесены к 6 группе. Группы 3 и 4 были оценены в 2 балла, группа 5 в 1 балл и группа 6 в 0 баллов.

Обычно характер связей между параметром Р и синоптическими ситуациями текущего и предшествующего дней сохраняется. Поэтому балл предшествующей ситуации решено оценивать так же, как и текущей, но с коэффициентом 0,5:  $Бпр = 0,5Бтс$ .

Формирование ЭВУЗВ связано с преобразованием синоптических процессов, с переходом ситуаций из одной группы в другую или с сохранением ситуации в данной группе. Вклад такого преобразования в создание ЭВУЗВ оценивался баллами Бпр. Наиболее неблагоприятные преобразования: переход ситуации из 4 группы к 1 или 2 группам; переход любой неблагоприятной ситуации в группу 1 или 2 оцениваются в 4 балла. Взаимные преобразования неблагоприятных ситуаций оцениваются баллами Бпр=3 или 2. Преобразование групп синоптических ситуаций при прогнозе ЭВУЗВ учитывалось в соответствии с таблицами 5 и 6.

Таблица 5

Количественная оценка преобразования синоптических ситуаций  
в баллах (Бпр) в холодный период

текущая ситуация, № группы	последующая ситуация, № группы					
	1	2	3	4	5	6
1	4	4	3	2	1	0
2	4	4	2	1	1	0
3	4	4	2	2	1	0
4	4	3	2	2	1	0
5	3	3	1	2	1	0
6	2	2	1	0	0	0

Таблица 6

Количественная оценка преобразования синоптических ситуаций  
в баллах (Бпр) в теплый период

текущая ситуация, № группы	последующая ситуация, № группы					
	1	2	3	4	5	6
1	4	4	3	2	1	0
2	4	4	2	1	0	0
3	4	4	2	1	1	0
4	3	3	2	1	1	0
5	3	3	2	1	0	0
6	2	2	1	0	0	0

Далее были установлены неблагоприятные особенности синоптических процессов Бос, которые способствуют значительному увеличению уровня загрязнения воздуха в городе. По всему ряду были выписаны предикторы, а также все особенности, отмечавшиеся в городах региона в дни с ЭВУЗВ. Прогноз каждой из перечисленных ниже особенностей добавляет к  $S_n$  от половины балла до двух.

В холодный период к ним относятся: приземная инверсия, очаг тепла или периферия очага тепла над городом по карте ОТ 500/1000, туман, дымка, наличие малоподвижного фронта окклюзии в окрестностях города и расположение северо-западнее города обширного глубокого циклона на расстоянии не менее 500 км. В летний период к таким особенностям относятся: приземная инверсия в сочетании со скоростью ветра 0-1м/с, туман, дымка, малоподвижный фронт окклюзии в окрестностях города.

В летний период также были выявлены особенности синоптических процессов, способствующие значительному снижению уровня загрязнения воздуха в городе при неблагоприятных ситуациях, это: расположение очага холода или периферии очага холода над городом на карте ОТ 500/1000, если прогнозируется прохождение холодного фронта и температура в слое 500/1000 менее 5°С. В этом случае баллу особенностей Бос присваивается обратный знак (таблицы 7 и 8)

Таблица 7

Количественная оценка особенностей синоптических процессов в холодный период.

приземная инверсия	+1 балл
очаг тепла над городом по карте ОТ 500/1000	+1 балл
периферия очага тепла по карте ОТ500/1000	+0,5 балла
туман	+2 балла
дымка	+1,5 балла
малоподвижный фронт окклюзии	+1 балл
город находится на далекой периферии обширного глубокого циклона	+1,5 балла

Таблица 8

Количественная оценка особенностей синоптических процессов в теплый период.

приземная инверсия + ветер 0-1м/с	+1 балл
очаг холода над городом по карте ОТ 500/1000	-2 балла
периферия холода по карте ОТ500/1000	-1 балл
туман	+2 балла
дымка	+1 балл
малоподвижный фронт окклюзии	+1 балл
прохождение ХФ	-2 балла
в слое 500/1000 Т менее +5°	-1 балл

В разделе 3.3 представлен сравнительный анализ случаев ЭВУЗВ в городах Уральского региона. Он был проведен отдельно для летнего и зимнего сезонов. При анализе наиболее опасных эпизодов загрязнения воздуха основной интерес представляют случаи, когда значительное увеличение концентраций вредных веществ в воздухе имеет место одновременно в разных городах. Известные катастрофические эпизоды характеризовались формированием ЭВУЗВ одновременно на всей территории Уральского региона. В г. Перми в зимний период отмечалось 23 случая ЭВУЗВ. В 18 случаях в одном или в нескольких городах региона также отмечался ЭВУЗВ, что составляет 78% от всех случаев. В летний период из 11 случаев ЭВУЗВ, отмечавшихся в г. Перми, в 8 случаях ЭВУЗВ отмечался и в других городах региона, что составляет 73% от всех случаев.

Для других городов Уральского региона был проведен такой же сравнительный анализ. Проведенный анализ показал, что в городах Уральского региона в 88% - 100% случаев одновременно отмечается высокий и экстремально высокий уровень загрязнения воздуха

В разделе 3.4 приводятся схемы прогноза ЭВУЗВ, разработанные с использованием метода графической регрессии. В схемах были использованы два, но наиболее значимых предиктора: синоптический предиктор Sn и показатель исходного уровня загрязнения воздуха в городе параметр P. В результате анализа синоптических условий загрязнения воздуха в рассматриваемых городах Уральского региона было установлено, что

зависимость параметра  $P$  от синоптических условий в каждом из городов практически одинаковая. Это позволило решать задачу прогноза ЭВУЗВ в городах региона, принимая одинаковые значения предиктора  $Sn$  для каждого из городов, в том числе одинаковые неблагоприятные синоптические ситуации (Бт и Бп), неблагоприятные особенности (Бос) и неблагоприятные преобразования процессов (Бпр). Графики были построены для городов Пермь, Соликамск, Березники, Губаха и Екатеринбург, отдельно для зимнего и летнего периодов. Всего построено 10 графиков. На графиках красной линией отделена область, соответствующая ЭВУЗВ в городе. Схема включает только один график. Она очень удобна для использования в оперативной работе. По прогностическому значению  $Sn$  и рассчитанному на момент прогноза значению параметра  $P$  по графикам находится ожидаемый уровень загрязнения воздуха в городе. На рисунках 6 и 7 представлены схемы прогноза для города Перми.

В летний период ЭВУЗВ в городах региона отмечается при значениях синоптического предиктора  $Sn = 7 - 9,5$ ; в зимний период при  $Sn = 8 - 9,5$ .

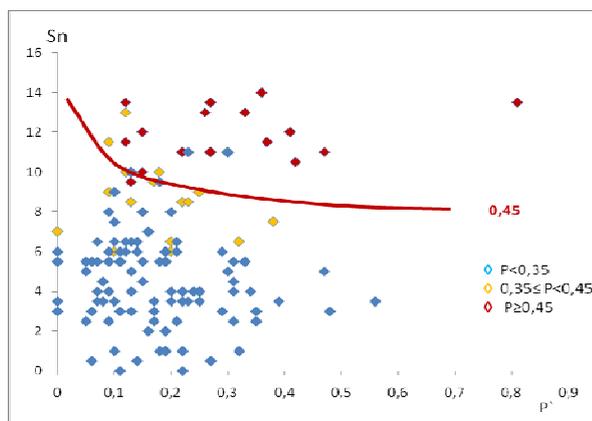


Рис.6 Схема прогноза ЭВУЗВ г. Пермь, зима,

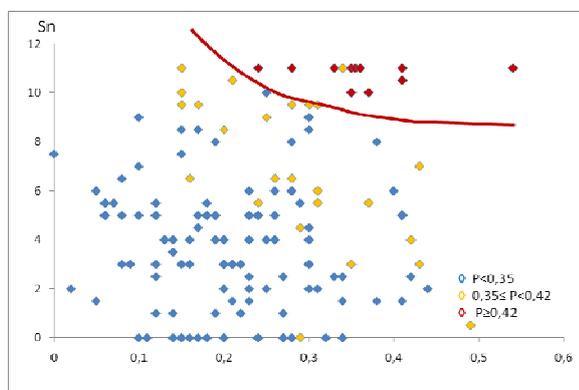


Рис. 7 Схема прогноза ЭВУЗВ г. Пермь, лето

В разделе 3.5 описаны результаты применения метода множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей. При разработке схем прогноза ЭВУЗВ использовался ряд наблюдений, в который включены были только дни с повышенным уровнем загрязнения воздуха, поэтому линейная связь между предиктантом и предикторами была нарушена. В связи с этим в данной схеме предикторы преобразованы. Разработка схемы прогноза ЭВУЗВ по методу множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей выполнена с использованием специально составленной программы на ПЭВМ, выполняющей следующие операции:

1. Анализ связей между предиктантом и предикторами,
2. Преобразование предикторов в соответствии с указаниями РД 52.04.306-92
3. Расчет весовых коэффициентов и свободного члена уравнения регрессии.

Для включения в схему различных предикторов, сначала была проведена оценка значимости каждого из них. Для холодного периода, наиболее значимыми предикторами являются количественный синоптический предиктор  $S_n$ , значение параметра  $P$ , предшествующее прогнозу и форма термического поля  $\square$  (очагу тепла на карте OT500/1000 придается  $\square = 5$ , области холода -  $\square = 1$ , промежуточные состояния – периферия очага тепла, прямолинейные изогипсы, периферия области холода). Для зимнего периода было получено прогностическое уравнение:

$$P = -0,11 + 0,95P(S_n) + 0,22P(P') + 0,20P(\square) \quad (2),$$

где  $P(S_n)$ ,  $P(\square)$ ,  $P(P')$  – преобразованные предикторы

Для теплого периода, наиболее значимыми предикторами являются количественный синоптический предиктор  $S_n$  и значение параметра  $P$ , предшествующее прогнозу. Было получено следующее прогностическое уравнение:

$$P = -0,13 + 0,89P(S_n) + 0,58P(P') \quad (3),$$

где  $P(S_n)$ ,  $P(P')$  – преобразованные предикторы

Прогностические уравнения были разработаны по материалам города Перми. Для решения вопроса об использовании этих схем прогноза в других городах Уральского региона проводилась их апробация по материалам города Екатеринбурга за шестилетний период, т. к. анализ синоптического материала показал, что синоптические ситуации неблагоприятные для города Перми, в основном являются неблагоприятными и для других городов региона. Апробация схем прогноза по материалам города Екатеринбурга показала неплохие результаты. Оправдываемость схем по материалам г. Екатеринбурга для летнего и зимнего периода получилась 100%, предсказуемость случаев ЭВУЗВ для зимнего периода составила 67%, для летнего периода – 62%.

Таким образом, можно сделать вывод, что схемы прогноза ЭВУЗВ по методу множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей, разработанные для города Перми, могут быть использованы в оперативной работе и в других городах Уральского региона.

В разделе 3.6 приводится оценка эффективности схем прогноза ЭВУЗВ

Испытание разработанных схем прогноза для городов Уральского региона проводилось на зависимом и независимом материале отдельно для зимнего и летнего периода. Эффективность схем прогноза ЭВУЗВ оценивалась с помощью коэффициента корреляции  $R$  между фактическими и прогностическими значениями параметра  $P$ , при помощи критерия Багрова  $H^*$  (Эффективной считается схема при  $H^* > 0,2$ ), также рассчитывались оправдываемость прогнозов ЭВУЗВ и их предсказуемость. Критерий Багрова рассчитывался по формуле:

$$H = \frac{U - U_0}{1 - U_0}, \quad \text{где } U = n_{11} + n_{22} / n_{00}; \quad U_0 = m_1 + m_2 / n_{00}; \quad m_1 = n_{10} * n_{01} / n_{00}; \quad m_2 = n_{20} * n_{02} / n_{00};$$

$n_{11}$ –число оправдавшихся прогнозов с явлением;  $n_{22}$ –число оправдавшихся прогнозов без явления;

$n_{21}$ –не давалось, а было;  $n_{00}$ –общее число прогнозов;  $n_{10}$ –число прогнозов с явлением;

$n_{20}$ –число прогнозов без явления;  $n_{01}$ –число дней с явлением;  $n_{02}$ –число дней без явления;  $n_{12}$ –давалось, а было без явления.

Для Перми за зимний период по зависимому материалу методом графической регрессии было составлено 24 прогноза ЭВУЗВ, оправдалось 23. Из 18 случаев ЭВУЗВ предсказаны все 18. Для летнего периода составлено 12 прогнозов ЭВУЗВ, из них оправдалось 8. Из 11 случаев ЭВУЗВ с  $P \geq 0,42$  предсказаны 10.

Эффективность прогностической схемы методом множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей также оказалась весьма высокой. Для зимнего периода коэффициент корреляции между прогностическими и рассчитанными по данным измерений значениями параметра  $P$  составил 0,90. Для летнего периода множественный коэффициент корреляции составил 0,74. В зимний период было составлено 19 прогнозов ЭВУЗВ, из которых оправдались все 19. Всего было отмечено 18 случаев ЭВУЗВ, предсказаны все 18. В летний период было составлено 8 прогнозов ЭВУЗВ, из которых оправдались 7. Из отмечавшихся 11 случаев ЭВУЗВ предсказаны были

10. В таблице 10 представлены результаты испытания прогностических схем для г. Перми на зависимом материале по обеим схемам.

Схемы для зимнего периода, разработанные по методу графической регрессии и по методу множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей, оказались более эффективными, чем для летнего периода.

Таблица 10

Эффективность прогностических схем для летнего и зимнего периодов на зависимом материале, г. Пермь

Метод	Сезон	Оправдываемость %	Предсказуемость %	Общее число случаев	Критерий Багрова
<b>Множественной регрессии</b>	<b>Зима</b>	<b>19/19 100</b>	<b>18/18 100</b>	<b>129</b>	<b>0,99</b>
	<b>Лето</b>	<b>8/7 88</b>	<b>11/10 91</b>	<b>191</b>	<b>0,89</b>
<b>Графической регрессии</b>	<b>Зима</b>	<b>24/23 96</b>	<b>18/18 100</b>	<b>129</b>	<b>0,96</b>
	<b>лето</b>	<b>12/8 67</b>	<b>11/10 91</b>	<b>191</b>	<b>0,73</b>

В таблице 11 представлены результаты испытания прогностических схем ЭВУЗВ на зависимом материале для пяти городов Уральского региона. Оправдываемость прогнозов ЭВУЗВ по всем городам Уральского региона достаточно высокая и составляет в зимний период 89%, в летний период – 79%. В зимний период было составлено 96 прогнозов ЭВУЗВ, из них оправдалось 85; в летний период составлено 82 прогноза ЭВУЗВ, оправдалось 65. Предсказуемость случаев ЭВУЗВ также высока: из отмечавшихся в зимний период 63 случаев ЭВУЗВ предсказаны 59; в летний период отмечалось 57 случаев ЭВУЗВ, предсказаны 49. Как видно из таблицы 11 значения критерия Багрова свидетельствуют об эффективности разработанных схем прогноза. В летний период они равны 0,73 - 0,84 и в зимний период 0,79 - 0,99.

Таблица 11

Эффективность прогностических схем для летнего и зимнего периодов на зависимом материале для всех городов Уральского региона

Метод	Сезон	пункт	Оправдываемость ЭВУЗВ, %	Предсказуемость ЭВУЗВ, %	Значение критерия Багрова
<b>Графической регрессии</b>	<b>зима</b>	Березники	10/10	9/9	0,99
		Соликамск	14/13	8/7	0,99
		Губаха	30/24	16/14	0,79
		Екатеринбург	18/15	12/11	0,83
		Пермь	24/23	18/18	0,96
		По всем городам	96/85 89%	63/59 94%	
	<b>лето</b>	Березники	14/11	10/8	0,78
		Соликамск	21/25	14/12	0,84
		Губаха	18/14	9/8	0,80
		Екатеринбург	17/15	13/11	0,84
		Пермь	12/8	11/10	0,73
		По всем городам	82/65 79%	57/49 86%	

На независимом материале испытание схем прогноза ЭВУЗВ для городов Пермь, Березники, Соликамск и Губаха было проведено по данным за 2006 - 2008 годы, для города Екатеринбурга - по материалам 2009 -2010 годов.

Методом графической регрессии и методом множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей для Перми за летний период было составлено 78 прогнозов, за зимний период – 54 прогноза. Из таблицы 12 видно, что большую эффективность показала схема, разработанная методом графической регрессии.

Таблица 12

Эффективность прогностических схем для летнего и зимнего периодов по независимому материалу для г. Перми, 2006 - 2008гг.

Метод	Сезон	Общая оправдываемость, %	Оправдываемость ЭВУЗВ, %	Предсказуемость, %	Общее число случаев	Значение критерия Багрова
Множественной регрессии	Зима	90	8/8	8/8	54	0,99
	Лето	90	8/6	10/7	78	0,81
Графической регрессии	Зима	100	8/8	8/8	54	0,99
	Лето	96	13/11	10/8	78	0,91

В зимний период методом графической регрессии и методом множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей было составлено 8 прогнозов ЭВУЗВ, из которых все оправдались. В летний период методом графической регрессии было составлено 13 прогнозов ЭВУЗВ, из которых 11 оправдались. Методом множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей было составлено 8 прогнозов ЭВУЗВ, из которых 6 оправдались.

Предсказуемость случаев ЭВУЗВ для Перми по независимому материалу также достаточно хорошая. Из отмечавшихся в зимний период 8 случаев ЭВУЗВ, все были предсказаны. В летний период отмечалось 10 случаев ЭВУЗВ, методом множественной линейной регрессии были предсказаны 7 случаев, методом графической регрессии предсказаны 8 случаев. Значения критерия Багрова как для зимнего периода, так и для летнего по обеим схемам получились высокими (0,81 – 0,99). Это свидетельствует об эффективности разработанных схем.

В таблице 13 представлены результаты испытания прогностических схем для летнего и зимнего сезонов на независимом материале для всех городов Уральского региона.

Таблица 13

Эффективность прогностических схем для летнего и зимнего сезонов на независимом материале для городов Уральского региона

метод	город	Оправдываемость ЭВУЗВ, %		Предсказуемость ЭВУЗВ, %		Оправдываемость общая, %	
		зима	лето	зима	лето	зима	лето
Графической регрессии	Екатеринбург	5/4	7/6	3/3	7/6	18/17	31/29
	Березники	5/5	5/5	6/5	7/5	33/31	27/25
	Соликамск	3/3	4/4	4/3	5/4	35/34	46/45
	Губаха	16/14	10/10	14/13	5/4	46/42	35/34
	Пермь	8/8	13/11	8/8	10/8	54/54	78/75
	По всем городам	37/34 92%	39/36 92%	35/32 91%	34/27 79%	186/178 95%	217/208 96%

Всего по городам Уральского региона в зимний период было составлено 37 прогнозов ЭВУЗВ, 34 прогноза оправдались; в летний период составлено 39 прогнозов ЭВУЗВ, из них оправдалось 36.

В зимний период отмечалось 35 случаев ЭВУЗВ, предсказаны были 32; в летний период из отмечавшихся 34 случаев ЭВУЗВ, предсказаны были 27 случаев.

Испытание схем прогноза ЭВУЗВ для городов Уральского региона на зависимом и независимом материале оказалось довольно успешным. Таким образом, можно сделать вывод о реальной возможности успешного прогнозирования ЭВУЗВ в городах региона.

Для определения успешности разработанных схем прогноза ЭВУЗВ по всему ряду наблюдений были составлены прогнозы уровней загрязнения воздуха с использованием прогностической схемы с учетом количественного синоптического предиктора (используется при ежедневном составлении прогнозов уровней загрязнения воздуха) и схемы прогноза ЭВУЗВ (рисунки 8 и 9). На графиках точки в виде ромбов - это прогнозы, составленные по схемам прогноза с учетом количественного синоптического предиктора, в виде квадратов – прогнозы, составленные с использованием схем прогноза ЭВУЗВ. При прогнозе пониженного уровня загрязнения воздуха прогнозы по обеим схемам совпадают. На корреляционных графиках видно, что связь между прогностическими и фактическими значениями параметра Р линейная и в том и в другом случае, но корреляционная связь лучше в случае использования схем прогноза ЭВУЗВ. При использовании схемы прогноза с учетом количественного синоптического предиктора коэффициент корреляции составляет 0,71 и в летний и в зимний периоды; при использовании схемы прогноза ЭВУЗВ - в летний период он равен 0,79, в зимний – 0,87.

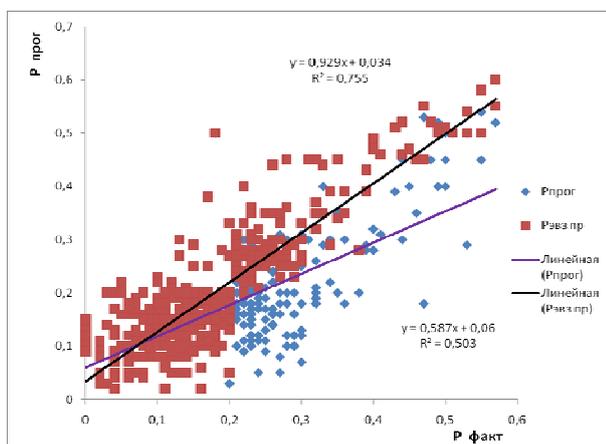


Рис. 8 Корреляционная зависимость между фактическими и прогностическими значениями параметра Р за зимний сезон, Пермь

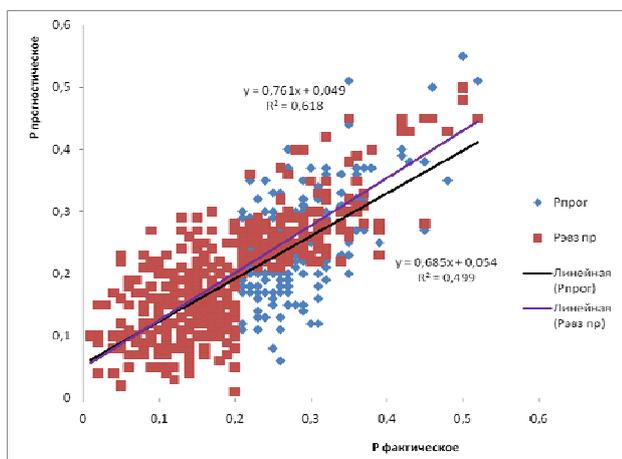


Рис. 9 Корреляционная зависимость между фактическими и прогностическими значениями параметра Р за летний сезон, Пермь

Таким образом при прогнозе высоких и экстремально высоких уровней загрязнения воздуха более точное значение параметра Р дают схемы прогноза ЭВУЗВ.

В разделе 3.7 представлены рекомендации по прогнозу ЭВУЗВ в городах региона, при отсутствии разработанной прогностической схемы, а также дается оценка ожидаемого состояния загрязнения воздуха в регионе с использованием метода разложения по е. о. ф.

Рекомендации по прогнозу ЭВУЗВ в каждом из городов региона при отсутствии разработанной прогностической схемы заключается в следующем:

1. Прогнозируется синоптический предиктор  $S_n$ . Ожидаемое большое значение  $S_n$  уже является определенным предостережением. (Выше было показано, что в рассмотренных городах ЭВУЗВ формируется, когда  $S_n$  превышает 8 – 9 баллов).

2. Учитывается имеющаяся информация о состоянии воздушного бассейна в городах на момент прогноза.

3. Учитывается прогноз для близлежащего города.

На основании этого делается вывод о возможном формировании ЭВУЗВ.

С использованием метода разложения по естественным ортогональным функциям были получены общие по региону характеристики загрязнения воздуха. Использовались ряды параметра  $P$  для пяти рассмотренных городов. Ряды для расчета  $r$  содержат более 400 случаев. Ряды параметра  $P$  в пяти городах региона ( $P(x, t)$ ) представляются в виде суммы членов разложения, каждый из которых характеризует определенное свойство процесса загрязнения воздуха в городах региона:

$$P(x, t) = \bar{P}(x) + \sum_{i=1}^n \alpha_i(t) \varphi_i(x)$$

где  $n$  – число членов разложения по е. о. ф. (соответствует числу рассматриваемых городов в регионе и в нашем случае равно пяти);

$\alpha_i(t)$  - коэффициенты разложения, зависящие от времени  $t$ ;

$\varphi_i(x)$  - естественные ортогональные функции, компоненты которых относятся к отдельным городам.

Важная особенность метода разложения по е. о. ф. заключается в том, что первые члены разложения дают наибольший вклад в общую изменчивость изучаемой характеристики. В нашем случае первая составляющая включает 45% изменчивости загрязнения воздуха в рассматриваемом регионе. Она характеризуется одинаковыми по знаку изменениями параметра  $P$  во всех пяти городах. Компоненты  $\varphi_1$  во всех городах положительны. Вклад второй составляющей в общую изменчивость параметра  $P$  в регионе равен 21%. Для всех городов за исключением Екатеринбурга значения компонентов  $\varphi_2$  отрицательны. Вклады остальных трех составляющих незначительны.

Обобщенными характеристиками загрязнения воздуха в регионе являются зависящие от времени коэффициенты разложения  $\alpha_i(t)$ . Наибольший интерес представляют значения первого коэффициента разложения  $\alpha_1$ . Анализ показал, что при больших значениях  $\alpha_1$  практически во всех городах отмечаются высокие значения  $P$ , в основном достигающие ЭВУЗВ.

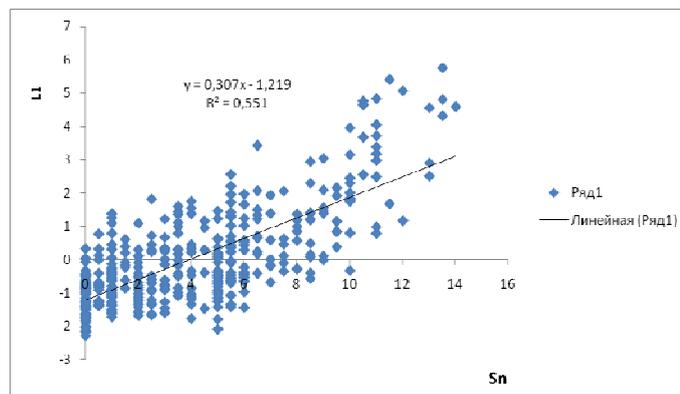


Рис. 10 Корреляционная зависимость между синоптическим предиктором  $S_n$  и первым членом разложения по е.о.ф.  $\alpha_1$

Существует достаточно сильная корреляция между  $\square_1$  и параметром  $P$  в каждом из пяти городов. Значения  $r$  колеблются от 0,70 до 0,54. Большие значения  $\square_1$  отмечаются и при больших значениях синоптического предиктора ( $S_n=8$  и более), причем происходит одновременное повышение и понижение этих двух характеристик. Коэффициент корреляции между  $\square_1$  и  $S_n$  составляет 0,74 (Рис. 10).

### Заключение

В результате выполненного исследования получены следующие основные результаты:

1. Создана эффективная региональная система прогноза экстремально высоких уровней загрязнения воздуха в крупном промышленном регионе (на примере Уральского региона), с целью предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха, формирующихся в периоды неблагоприятных метеословий.
2. Разработаны и внедрены в практику схемы прогноза ЭВУЗВ для пяти городов Уральского региона.
3. Выявлена тенденция к одновременному формированию экстремально высоких уровней загрязнения воздуха (ЭВУЗВ) в близлежащих городах промышленного региона;
4. Показана возможность и целесообразность использования одного и того же синоптического предиктора  $S_n$  для промышленных городов в пределах региона;
5. Установлена эффективность синоптико-статистических схем прогноза ЭВУЗВ, включающих два наиболее значимых предиктора – синоптический предиктор  $S_n$  и параметр загрязнения воздуха в предшествующий день  $P'$ .
6. Результаты испытания прогностических схем для г. Перми на зависимом материале показали, что схемы для зимнего периода, разработанные по методу графической регрессии и по методу множественной линейной регрессии с предварительным исключением нелинейности связей, оказались более эффективными, чем для летнего периода.
7. По материалам наблюдений в городах Уральского региона показано, что в дни с большими значениями параметра  $P$ , соответствующими ЭВУЗВ, в городах реально имеют место опасные концентрации примесей в воздухе, значительно превышающие в ряде случаев ПДК.
8. По Уральскому региону впервые проведена типизация синоптических процессов, способствующих накоплению вредных примесей в атмосфере с учетом географического происхождения, траектории движения барических образований, скорости ведущего потока по картам АТ 700 гПа или АТ 500 гПа, термического поля над районом, а также длительности нахождения барического образования над рассматриваемым районом.
9. Даны рекомендации по прогнозированию ЭВУЗВ в промышленном регионе с использованием единого синоптического предиктора, в том числе в городах, для которых имеющихся материалов недостаточно для разработки прогностических положений.
10. По материалам пяти городов Уральского региона получены общие характеристики загрязнения воздуха с использованием метода разложения по естественным ортогональным функциям для оценки ожидаемого общего состояния загрязнения воздуха в регионе

**Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Костарева Т.В. Схемы прогнозирования ЭВУЗВ для г. Пермь. //Информационный бюллетень за 2005 год. Состояние работ по прогнозу загрязнения воздуха в городах Российской Федерации. – М., 2006. с. 36-41.

2. Костарева Т.В., Сонькин Л.Р. Некоторые вопросы предупреждения и предотвращения высоких уровней загрязнения воздуха в периоды НМУ (на примере г. Пермь и Пермской области). В сб.: Вопросы охраны атмосферы от загрязнения. Информационный бюллетень НПК «Атмосфера» при ГГО, № 2 (32).

3. Костарева Т.В., Кириллова В.И., Николаев В.Д., Сонькин Л.Р. Прогноз экстремально высоких уровней загрязнения воздуха в городах промышленного региона. // Труды ГГО. – 2010. – Вып. 561. С. 92-103.

4. Костарева Т.В. Прогноз ЭВУЗВ в городах Уральского региона. В сборнике: «Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле земли, интерпретация геофизических полей». Материалы конференции. Екатеринбург: УрО РАН. 2011. С.205-208.