

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ, ОПИСЫВАЮЩИХ ДИНАМИКУ ИЗМЕНЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ¹

Е.А. Гребенюк

Построены модели, представляющие собой динамические авторегрессионные модели с распределенными лагами и содержащие лаговые значения объясняемой переменной (конкретного загрязняющего вещества) и переменных, характеризующих метеорологические условия. Адекватность моделей процессу проверяется с помощью алгоритмов текущего обнаружения.

Ключевые слова: экологический мониторинг, загрязняющие вещества, авторегрессионные модели с распределенными лагами, последовательное обнаружение.

ВВЕДЕНИЕ

Для оздоровления экологической обстановки и предупреждения возникновения неблагоприятных экологических ситуаций необходим мониторинг состояния окружающей среды. Параметры, характеризующие экологическую обстановку, изменяются в пространстве и во времени в зависимости от совместного расположения источников вредных выбросов и под влиянием изменений:

- уровней интенсивности выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду;
- состава загрязняющих веществ;
- метеорологических условий среды.

Экологический мониторинг за состоянием окружающей среды включает в себя наблюдения за факторами воздействия и состоянием среды, оценку ее состояния и прогноз. Данные мониторинга служат источником информации, необходимой для принятия экологически значимых решений.

Существует два основных подхода к прогнозированию распространения загрязнений: теоретический и статистический. Первый из них опирается на общие физические и химические законы и, как правило, очень чувствителен к ошибкам в исходных данных, мониторинг используется для

подтверждения и проверки модели. Последние разработки в области создания наземных и спутниковых приборов для измерений концентраций загрязняющих веществ и новые информационные технологии позволяют выполнять анализ данных в реальном времени для описания и объяснения неблагоприятных экологических ситуаций, а также для их предупреждения. В целях оперативного прогноза распространения загрязняющих веществ во времени и в пространстве все шире применяется статистический подход [1, 2], при котором все соотношения между характеристиками загрязняющих веществ и другими факторами, влияющими на уровень загрязнения, определяются на основе результатов наблюдений. Модели изменения концентраций загрязняющих веществ во времени, построенные только на основе анализа прошлых наблюдений исследовались многими авторами: модели авторегрессии и авторегрессии — скользящего среднего [3, 4] — учитывают динамику отдельного загрязнителя, регрессионные модели [5, 6] позволяют учитывать воздействие других загрязнителей и метеопараметров. Модели, параметры которых вычисляются по данным наблюдений, имеют один существенный недостаток: они адекватно описывают состояние среды, если статистические характеристики данных, по которым модель построена, постоянны. Однако интенсивности источников выбросов и метеопараметры изменяются во времени. После изменения статистических ха-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-08-00350-а).



рактических характеристик окружающей среды процесс отклоняется от модели, точность прогноза значительно снижается, и можно пропустить момент резкого ухудшения качества экологической обстановки. Важно вовремя заметить начинающееся ухудшение до того, как оно примет угрожающий характер и перестроить модель. В настоящей статье предлагается комплексный подход к прогнозированию состояния окружающей среды, включающий в себя построение моделей и проверку их адекватности в режиме получения текущих наблюдений.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Построение модели. Обработка полученных наблюдений начинается с построения моделей, отражающих изменение концентраций загрязняющих веществ.

Пусть $\hat{Y}_t = (y_{t1}, \dots, y_{tk})$ — вектор измеряемых концентраций загрязняющих веществ, $\hat{X}_t = (x_{t1}, \dots, x_{tk})$ — вектор параметров, измеренных в момент времени t , характеризующих метеорологические условия. В общем случае изменение концентраций во времени может быть описано в виде авторегрессионной модели с распределенными лагами — ADL (autoregressive distributed lag) модели:

$$\hat{Y}_t = \Lambda + (A_0 + A_1L + \dots + A_pL^p)\hat{Y}_t + (B_1L + \dots + B_qL^q)\hat{X}_t + \hat{E}_t, \quad (1)$$

где $A_i, i = 0, 1, \dots, p, k \times k$ -матрица, $B_j, j = 1, \dots, q, k \times l$ -матрица, L — оператор сдвига: $Lz_t = z_{t-1}$, $L^p z_t = z_{t-p}$, $z_t = x_t$ или y_t , $\hat{E}_t = (\varepsilon_{t1}, \dots, \varepsilon_{tk})$ — случайное возмущение, $E(\varepsilon_{it}) = 0$, $\text{var}(\varepsilon_{it}) = \sigma^2$, $i = 1, \dots, k$, $E(\cdot)$ — знак математического ожидания, Λ — вектор констант. В процессе создания модели концентраций загрязнителей в конкретном регионе определяется структура модели (1) (наборы взаимозависимых переменных, порядок модели), вычисляются ее коэффициенты и проверяется адекватность модели данным наблюдений. В зависимости от типа метеорологических условий и интенсивностей источников загрязнения модель, построенная на отдельном участке процесса, может быть либо чисто авторегрессионной, либо чисто регрессионной, либо ADL-моделью.

Прогноз. Прогноз концентраций $\hat{Y}_{t,t+1}^P$ на момент времени $t + 1$ по наблюдениям, полученным

до момента времени t включительно, может быть вычислен по формуле:

$$\hat{Y}_{t,t+1}^P = (I - A_0)^{-1}(\Lambda + A_1Y_t + \dots + A_pY_{t-p} + B_1X_t + \dots + B_qX_{t-q}). \quad (2)$$

Этот прогноз является прогнозом с минимальной среднеквадратичной ошибкой. Прогнозы на 2, 3, ... и большее число шагов вычисляются подстановкой в формулу (2) значений прогнозов, полученных по наблюдениям до момента времени t , и самих наблюдений.

Проверка соответствия прогнозной модели наблюдаемому процессу. Параметры загрязнения измеряются в течение некоторого интервала времени T с заданной дискретностью и поступают на вход модели, по которой вычисляется прогноз. Проверка наличия отклонений процесса от модели выполняется слежением за отклонениями показателей процесса от соответствующих значений модели: $\Delta_j = y_{ij} - y_{ij}^m$, где y_{ij} — координаты вектора \hat{Y}_t в точке t , y_{ij}^m — соответствующие им значения, вычисленные по модели. Если процесс соответствует модели (1), то математическое ожидание величины Δ_j равно нулю, при отклонении процесса от модели оно увеличивается или уменьшается. При превышении абсолютного значения эмпирического среднего заданного порога h алгоритм дает «звонок», сообщающий об изменении свойств процесса.

Общая постановка задачи. Требуется в режиме текущего наблюдения осуществлять прогнозирование состояния окружающей среды, обнаруживать изменение ее свойств и перестраивать прогнозную модель с наименьшим запаздыванием относительно момента возникновения изменений.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

2.1. Построение моделей и прогноз

Методология построения регрессионных и авторегрессионных моделей по данным наблюдений и прогнозирования по ним разрабатывается уже более 50 лет. Однако построение адекватной модели для каждого конкретного процесса до сих пор представляет собой отдельную и не всегда простую задачу. Спецификация модели (набор исходных данных и вид функциональной зависимости) зависит от целей, для которых модель построена, и от свойств наблюдаемого процесса. Статистические свойства концентраций загрязняющих веществ изменяются в зависимости от интенсивности источников загрязнений, метеословий, присутствия в среде других загрязнителей. В результате модель, построенная известными методами [1] по данным

наблюдения процесса на некотором временном интервале, перестает быть адекватной при изменении его свойств. Поэтому построение модели процесса, пригодной для выполнения прогноза по реальным данным представляет собой отдельное исследование, включающее в себя анализ его свойств и их возможных изменений, а также условий изменения модели.

2.2. Проверка соответствия прогнозной модели наблюдаемому процессу

Алгоритмы последовательного обнаружения изменений свойств (разладки) случайных процессов позволяют обнаруживать разладку при обработке данных в реальном времени. В случае возникновения изменений модели требуется определить их как можно скорее, но при этом не перепутать наличие существенных изменений со случайными флуктуациями процесса. Алгоритмы последовательного обнаружения [7] при определенных условиях обладают оптимальными свойствами в смысле выполнения указанных требований. После получения очередного наблюдения алгоритм анализирует его и принимает решение о наличии либо отсутствии изменения свойств. Опишем принцип действия этого алгоритма для случая одного загрязнителя ($k = 1$).

Рассматривается последовательность независимых случайных величин $(y_t)_{t \geq 1}$, имеющих закон распределения, зависящий от времени:

$$P(y_t) = \begin{cases} p_0(y_t), & \text{если } t < t_p; \\ p_1(y_t), & \text{если } t \geq t_p, \end{cases}$$

где $p_i(y_t)$, $i = 0, 1$ — функция плотности распределения случайной величины y_t до и после изменения соответственно, t_p — момент изменения (разладки).

Алгоритм обнаружения представляет собой последовательную процедуру проверки гипотезы H_0 : процесс распределен в соответствии с законом p_0 , против альтернативной гипотезы H_1 : процесс распределен в соответствии с законом p_1 . Основные шаги алгоритма:

1) для последовательности наблюдений $y_1, y_2, \dots, y_n, \dots$ на каждом шаге t вычисляется величина

$$Z(t, 1) - \min_{1 \leq k < t} Z(k, 1) = \max_{1 \leq k < t} Z(t, k),$$

$$Z(t, k) = \sum_{i=k}^t \log \frac{p_1(y_i)}{p_0(y_i)}, \quad (3)$$

где $p_0(y)$ и $p_1(y)$ — плотности распределения до и после момента t_p соответственно;

2) алгоритм подает сигнал об обнаружении изменений в момент времени N , если найдется такой предыдущий момент времени $k < N$, чтобы наблюдения y_k, \dots, y_N являлись бы значимыми для принятия гипотезы об изменении свойств:

$$N = \inf \left\{ t \geq 1: \max_{1 \leq k < t} Z(t, k) > h \right\} = \inf \{ t \geq 1: G_t > h \}, \quad (4)$$

где $G_t = \left[G_{t-1} + \log \frac{p_1(y_t)}{p_0(y_t)} \right]^+$, $[z]^+ = \max(0, z)$, $G_0 = 0$.

Порог h выбирается таким образом, чтобы:

— ошибка при принятии решения об изменении модели была бы не больше заданной величины α ,

— запаздывание в обнаружении состоявшихся изменений в модели не превышало заданной величины τ .

Качество обнаружения изменения плотности распределения от p_0 до p_1 оценивается средним временем между ложными обнаружениями $E_1(\tau | \tau < t_p)$ и средним временем задержки в обнаружении $E_2(\tau - t_p | \tau \geq t_p)$, где τ — момент обнаружения, определенный алгоритмом, $E_i(\cdot)$, $i = 1, 2$ — математическое ожидание.

В работах [8, 9] показано, что в случае точно известных параметров до и после обнаружения алгоритм (3), (4) обладает оптимальными свойствами в смысле критерия минимизации средней задержки обнаружения при заданном ограничении на среднее время между ложными обнаружениями.

3. ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ И ПРОВЕРКА ИХ ПРОГНОЗНЫХ СВОЙСТВ

Концентрации химических веществ, загрязняющих окружающую среду, изменяются в зависимости от интенсивностей источников их выброса и в результате физических, химических и биохимических процессов рассеяния, поглощения и синтеза. Их значения в текущий момент времени могут зависеть от прошлых значений, от значений концентраций других загрязнителей и атмосферных условий, ускоряющих либо замедляющих соответствующие процессы. Поэтому исходные ряды наблюдений имеют следующие особенности:

— концентрации загрязняющих веществ могут быть автокоррелированными и коррелированными с концентрациями других загрязнителей;

— на значения концентраций могут оказывать влияние метеорологические условия, причем это влияние может проявляться с запаздыванием;



Таблица 1

Средние уровни загрязнения

Загрязнитель	ПДК (разовая), мг/м ³	Средний уровень загрязнения при концентрации		
		низкой	средней	высокой
Оксид азота	0,4	Не более 0,1	От 0,01 до 0,3	Более 0,3
Диоксид азота	0,085	Не более 0,1	От 0,01 до 0,075	Более 0,075

Таблица 2

Среднее число значимых лагов

Загрязнитель	Концентрация		
	низкая	средняя	высокая
Оксид азота	4,8 (1,6)	8 (2,7)	13,3 (4,4)
Диоксид азота	5,6 (1,9)	7,2 (2,4)	11,3 (3,8)

Примечание. В скобках указано время затухания ЧАКФ в часах.

— характер зависимости может изменяться под действием ненаблюдаемых факторов, в результате в процессе возникают изменения, которые в эконометрической литературе называются «структурными сдвигами» [10].

Первые две особенности определяют спецификацию модели: состав переменных и порядки авторегрессии, запаздывания регрессоров. Наличие структурных сдвигов концентраций служит сигналом к изменению модели.

В качестве примера объекта исследования были взяты временные ряды концентраций оксида и диоксида азота в атмосфере. Содержание вредных веществ в воздухе определяется их концентрацией, выражаемой в мг/м³. Максимальная концентрация вредных веществ, не оказывающая влияния на здоровье человека, называется предельно допустимой концентрацией (ПДК). Для атмосферного воздуха населенных мест нормируется максимальная разовая и среднесуточная ПДК [11]. Конечная цель анализа заключалась в построении моделей изменения концентраций для прогноза состояния среды, позволяющих обнаруживать возможные превышения концентраций задолго до того, как они приведут к катастрофическим изменениям.

Анализ динамики изменения концентраций загрязняющих веществ проводился по данным, полученным из базы данных экологического мониторинга, с периодом съема наблюдений 20 мин, собранным за два года [12].

3.1. Тестирование авторегрессионных и регрессионных зависимостей

Исследовалась зависимость времени затухания частных автокорреляционных функций (ЧАКФ) от уровня концентраций загрязняющих веществ. Выделялись следующие уровни концентраций: низкая, средняя и высокая. Значения средних уровней концентраций загрязняющих веществ для оксида и диоксида азота приведены в табл. 1.

Как известно из теории временных рядов [1], выбор порядка модели авторегрессии определяется числом значимых лагов ЧАКФ. Среднее число лагов для каждого уровня концентрации, после которых значения ЧАКФ становятся незначимыми, приведены в табл. 2.

На рис. 1 приведены графики ЧАКФ и уровней их значимости, построенных по наблюдениям за процессами загрязнения диоксидом азота DA_1 и оксидом азота OA_1 с низкими уровнями концентраций. На рис. 2 приведены графики ЧАКФ и уровней их значимости, построенных по наблюдениям за процессами загрязнения диоксидом азота DA_2 и оксидом азота OA_2 с высокими уровнями концентраций. По оси абсцисс отложено значение лага, с которым рассчитывалась ЧАКФ, по оси ординат — ее значение. Графики процессов с низким

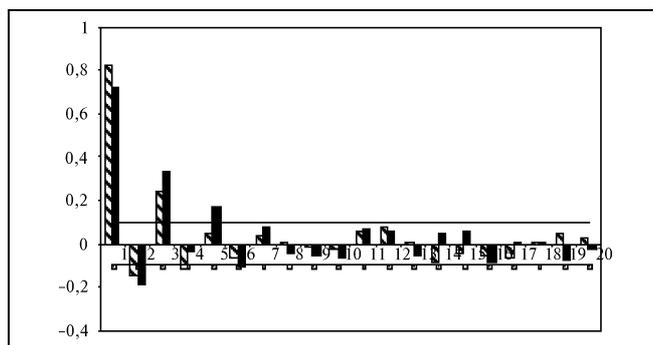
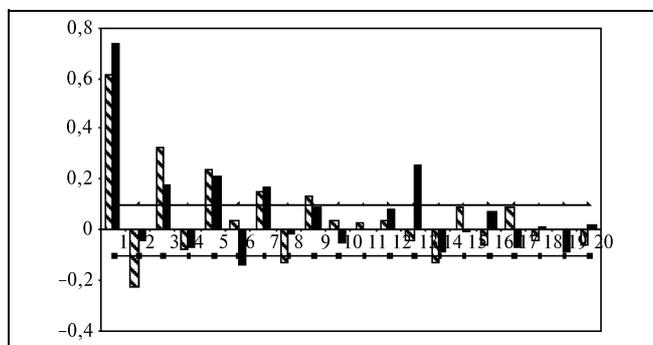
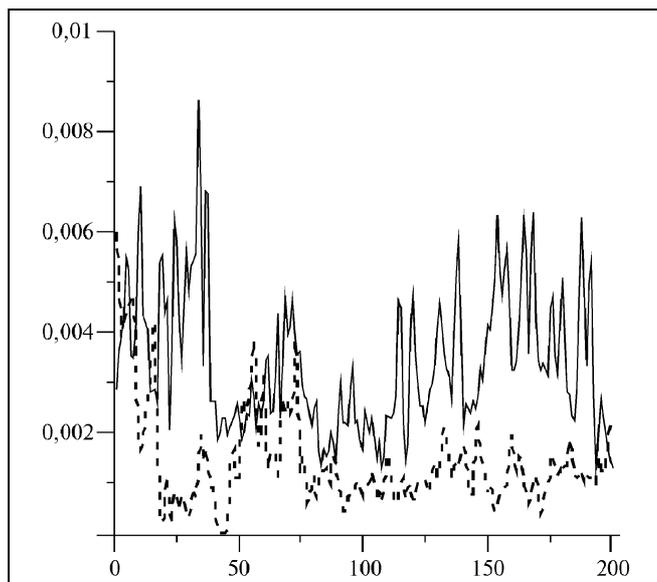
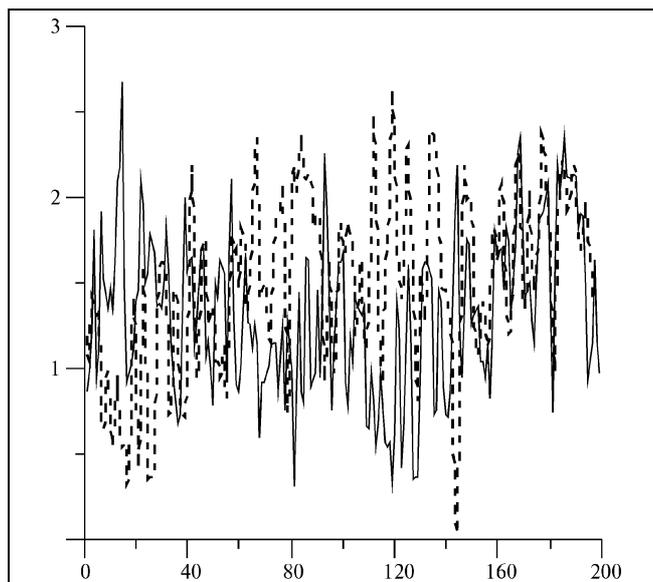
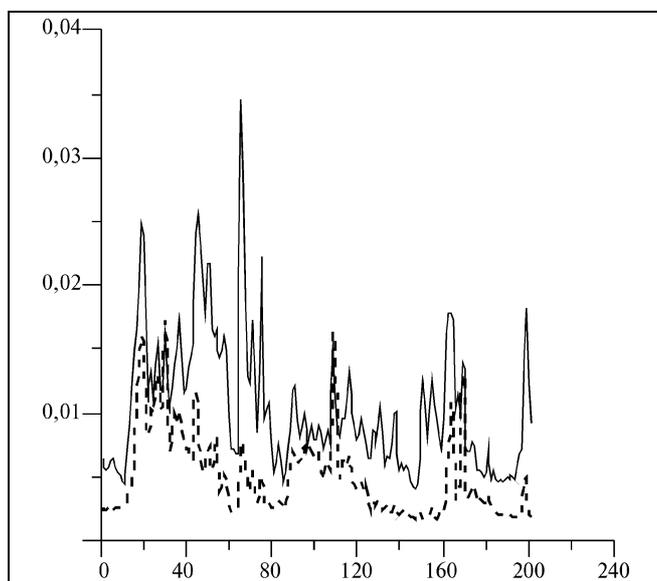
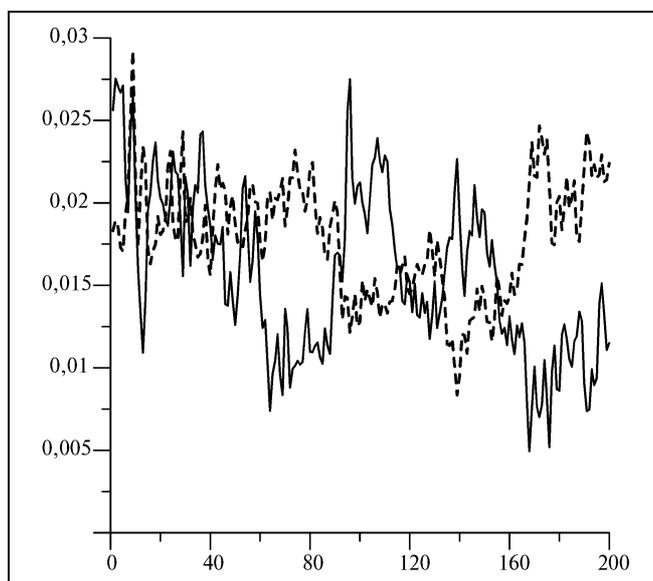
Рис. 1. Частные автокорреляционные функции процессов DA_1 (□) и OA_1 (■) и уровни значимости (—)

Рис. 2. То же, что и на рис. 1

Рис. 3. Графики процессов OA_1 (—) и DA_1 (---)Рис. 4. Графики процессов OA_1 (—) и DA_2 (---)Рис. 5. Положительно коррелированные процессы OA (—) и DA (---); коэффициент корреляции $r = 0,62$ Рис. 6. Отрицательно коррелированные процессы OA (—) и DA (---); коэффициент корреляции $r = -0,39$

и высоким уровнями концентраций приведены на рис. 3 и 4.

Анализ показал:

— во временных рядах концентраций загрязняющих веществ наблюдается автокорреляционная зависимость, причем время затухания ЧАКФ, в зависимости от интенсивности концентраций и метеоусловий, составляет от 4,5 до 1,5 ч;

— время затухания ЧАКФ изменяется в зависимости от уровня концентраций — уменьшается (увеличивается) с уменьшением (увеличением) концентраций.

Исследовалась зависимость между уровнями концентраций оксида и диоксида азота. По выборке из 45 тыс. наблюдений в скользящем окне длиной 200 наблюдений с шагом $s = 40$ рассчитывался коэффициент корреляции и проверялась его значимость. В результате анализа выявлено, что концентрации этих веществ, в 81 % всех экспериментов, связаны положительной корреляционной зависимостью. Коэффициент корреляции колеблется в пределах 0,4—0,81. Однако на отдельных участках, общая длина которых составляет около 19 % длины экспериментальной выборки, эта за-

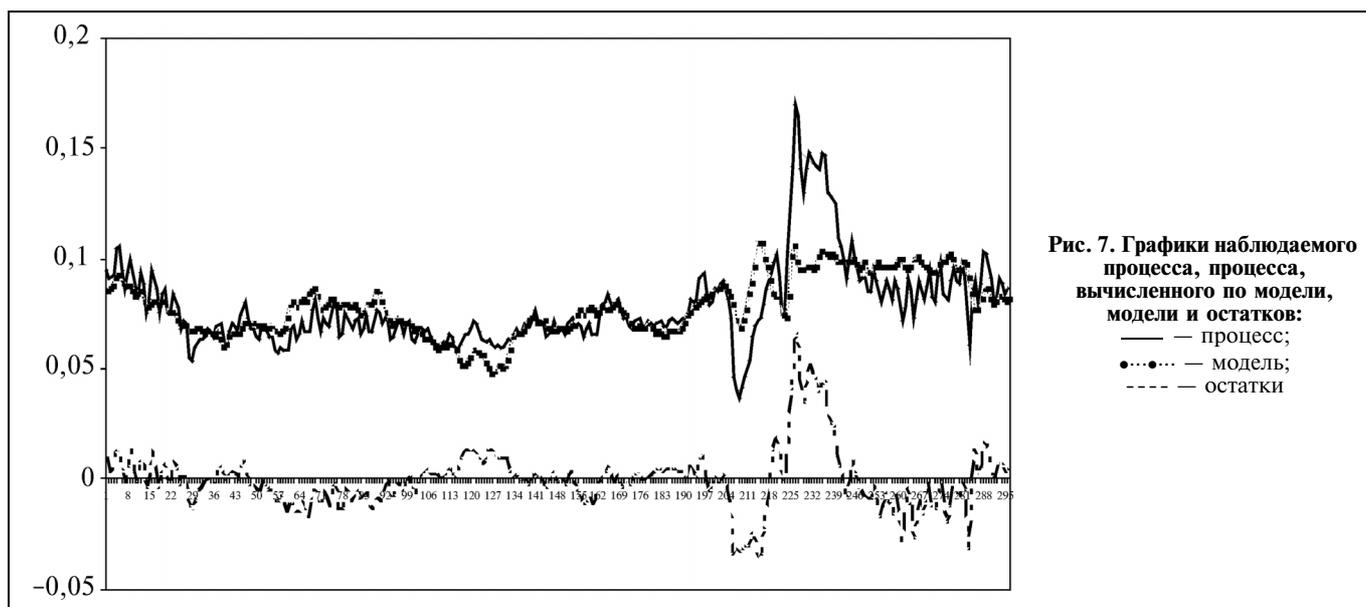


Рис. 7. Графики наблюдаемого процесса, процесса, вычисленного по модели, модели и остатков:
 — процесс;
 ••••• модель;
 - - - остаток

висимость нарушается. В 15 % экспериментов коэффициент корреляции был отрицательным: $-0,2 \dots -0,4$; в 4 % случаев он значимо не отличался от нуля. Примеры наличия положительной и отрицательной корреляционной связи приведены на рис. 5 и 6.

3.2. Анализ влияния метеопараметров

Для проверки влияния метеопараметров на уровни концентраций загрязняющих веществ были построены модели концентраций загрязнителей для интервалов наблюдений различной длины, а также рассматривались модели, построенные по данным суточных концентраций. Модели строились с помощью статистического пакета EViews 5. Анализ свойств моделей, учитывающих только зависимости концентраций от метеопараметров, показал, что такие модели отслеживают долгосрочные изменения: тренды и квазипериодические колебания концентраций загрязнителей, но не чувствительны к краткосрочным изменениям.

Таблица 3

Модель концентраций диоксида азота как регрессия на метеопараметры

Переменные	Значения коэффициентов	Стандартное отклонение	t-статистика	Вероятность ошибки
C	-130,39	34,4258	-3,7875	0,0002
N_V	0,0001	0,00002	5,7954	0,0000
S_V	-0,0047	0,0007	-6,6078	0,0000
DAV	0,1546	0,0408	3,7880	0,0002
VL	0,0008	0,0002	5,4661	0,0000

Пример построения модели концентраций диоксида азота приведен в табл. 3 и на рис 7. В таблице представлены переменные, включенные в модель, коэффициенты модели, их стандартные отклонения, t -статистики и уровни значимости. На рисунке приведены графики наблюдаемого процесса, процесса, вычисленного по модели и построенной модели и график остатков — разностей между истинным значением процесса и вычисленным по модели.

Обозначения: C — константа, N_V — направление ветра, S_V — скорость ветра, DAV — давление, VL — влажность, в последнем столбце указана вероятность совершить ошибку, отвергнув нулевую гипотезу о нулевом значении коэффициента. Исправленный коэффициент детерминации, определяющий качество подгонки модели к исходным данным, $R^2 = 0,467$, уравнение в целом является значимым. Прогнозные качества такой модели невелики: среднеквадратичная ошибка прогноза на один шаг $err = 0,014$.

3.3. Построение ADL-модели

Если в модель, для рассматриваемого выше участка выборки, мы добавим авторегрессионные члены, то ее прогнозные свойства значительно улучшатся. Список переменных, коэффициенты ADL-модели, их стандартные отклонения, t -статистики и уровни значимости коэффициентов приведены в табл. 4, где DA — концентрация диоксида азота, $DA(-1)$, $DA(-2)$ — запаздывания переменной DA . Графики наблюдаемого процесса, процесса, вычисленного по модели, и остатков приведены на рис. 8.

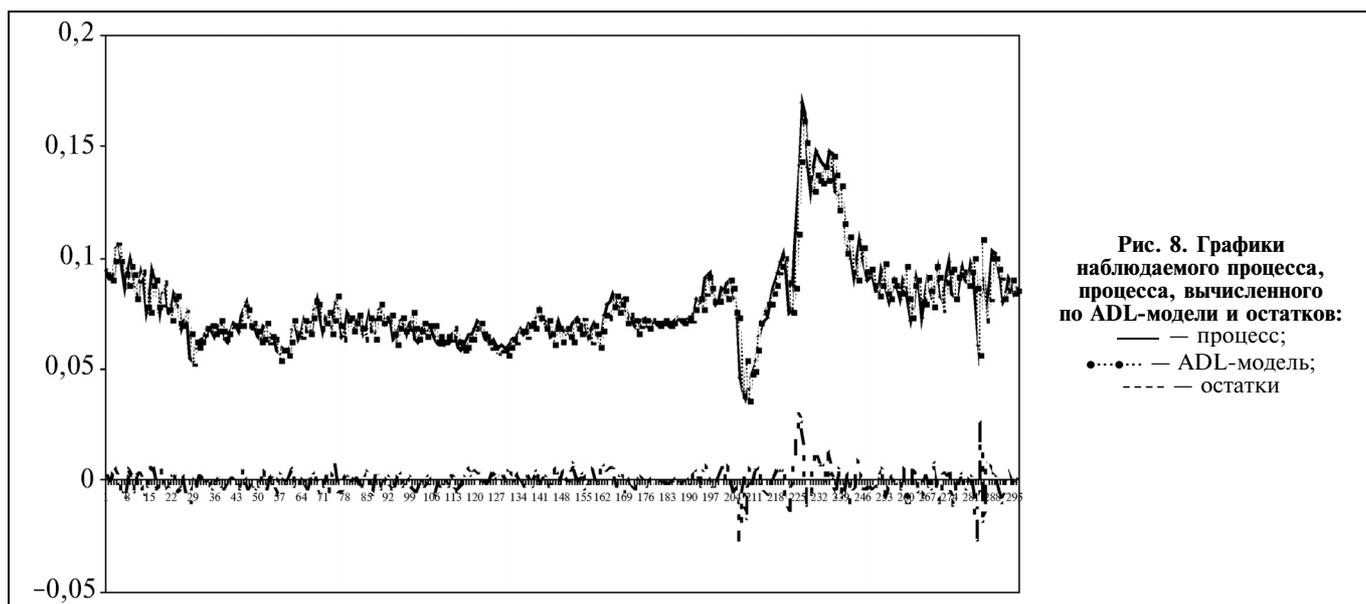


Рис. 8. Графики наблюдаемого процесса, процесса, вычисленного по ADL-модели и остатков:
 — процесс;
 ••••• — ADL-модель;
 - - - - - остатки

Исправленный коэффициент детерминации $R^2 = 0,876$, уравнение в целом является значимым. Среднеквадратичная ошибка прогноза на один шаг $err = 0,003$, т. е. прогнозные качества модели значительно выше.

3.4. Проверка изменений свойств процесса по отклонениям его от модели

Построим модель, зависящую только от метеопараметров, для участка выборки, не содержащего превышения концентраций (см. рис. 7 и 8, первые 200 точек ряда). Параметры модели приведены в табл. 5.

Таблица 4

Модель концентраций диоксида азота как регрессия на метеопараметры и запаздывающие значения объясняемой переменной (концентрации диоксида азота)

Переменные	Значения коэффициентов	Стандартное отклонение	t-статистика	Вероятность ошибки
C	0,0172	0,0035	4,9923	0,0000
$DA(-1)$	1,0511	0,0568	18,5149	0,0000
$DA(-2)$	-0,2172	0,0551	-3,9401	0,0001
N_V	0,0002	0,00001	4,7954	0,0000
S_V	-0,0016	0,0004	-5,6078	0,0000
DAV	0,1246	0,0508	4,7880	0,0001
VL	0,0008	0,0002	5,4661	0,0000

Исправленный коэффициент детерминации $R^2 = 0,586$, уравнение в целом является значимым. Уравнение модели запишется в виде:

$$y_t^{m1} = -132,2602 \cdot C + 0,000122 \cdot N_V - 0,004032 \cdot S_V + 0,1546 \cdot DAV + 0,000767 \cdot VL \quad (5)$$

На этом же участке ряда построим ADL-модель, параметры которой приведены в табл. 6.

Исправленный коэффициент детерминации $R^2 = 0,75$, уравнение в целом является значимым. Уравнение модели запишется в виде:

$$y_t^{m2} = 0,0122 \cdot C + 0,998670 \cdot y_{t-1}^{m2} - 0,10724 \cdot y_{t-2}^{m2} + 0,000172 \cdot N_V - 0,001709 \cdot S_V + 0,13534 \cdot DAV + 0,000636 \cdot VL. \quad (6)$$

Вычислим отклонения моделей (5) и (6) от процесса и сформируем последовательности $\Delta_1^1, \dots, \Delta_t^1$ и $\Delta_1^2, \dots, \Delta_t^2$ остатков моделей, которые поступают на вход алгоритма последовательного обнаружения, $\Delta_t^1 = y_t - y_t^{m1}$, $\Delta_t^2 = y_t - y_t^{m2}$, где y_t — наблюдения процесса в момент времени t , y_t^{m1} и y_t^{m2} — значения, вычисленные по моделям (5) и (6) соответственно.

Рассматривалось 10 участков выборки длиной по 300 наблюдений, на которых, начиная с 241-й точки наблюдения, наблюдались фактические превышения допустимых концентраций и 10 участков, на которых превышений не наблюдалось, но наблюдались «скачки» концентраций, в пределах среднего уровня загрязнений. По первым 200-м



Таблица 5

Характеристики модели концентраций диоксида азота как регрессии на метеопараметры, построенной в скользящем окне длиной 200 точек (рис. 7)

Переменные	Значения коэффициентов	Стандартное отклонение	t-статистика	Вероятность ошибки
<i>C</i>	-132,2602	51,7918	2,5537	0,0000
<i>N_V</i>	0,0001	0,00002	5,7954	
<i>S_V</i>	-0,0040	0,0005	-8,6078	
<i>DAV</i>	0,1546	0,06141	3,5588	0,0002
<i>VL</i>	0,0008	0,00005	5,4661	0,0000

Таблица 6

Характеристики модели концентраций диоксида азота как регрессии на метеопараметры и запаздывающие значения объясняемой переменной, построенной в скользящем окне длиной 200 точек

Переменные	Значения коэффициентов	Стандартное отклонение	t-статистика	Вероятность ошибки
<i>C</i>	0,0122	0,0039	5,0225	0,0000
<i>DA(-1)</i>	0,9987	0,0668	14,9515	
<i>DA(-2)</i>	-0,1072	0,0321	-3,337	0,0001
<i>N_V</i>	0,0002	0,00001	4,7954	0,0000
<i>S_V</i>	-0,0017	0,0004	-4,2498	
<i>DAV</i>	0,1353	0,0508	4,2880	0,0002
<i>VL</i>	0,0006	0,0002	4,1561	0,0000

Таблица 7

Результаты работы алгоритма последовательного обнаружения (3), (4)

Среднее значение δ при обнаружении изменений по отклонениям от модели типа		Число ложных тревог при обнаружении изменений по отклонениям от модели типа	
(5) $\Delta_1^1, \dots, \Delta_t^1$	(6) $\Delta_1^2, \dots, \Delta_t^2$	(5) $\Delta_1^1, \dots, \Delta_t^1$	(6) $\Delta_1^2, \dots, \Delta_t^2$
3,4 точек наблюдений (1,13)	1 точка наблюдений (0,33)	3 ложных обнаружения	8 ложных обнаружений
Примечание. В скобках указано время запаздывания в часах.			

точкам выборки строились модели вида (5) и (6). Последовательности $\Delta_1^1, \dots, \Delta_t^1$ и $\Delta_1^2, \dots, \Delta_t^2$ остатков моделей подавались на вход алгоритма последовательного обнаружения (3), (4), настроенного на обнаружение значений концентраций, приближающихся, но не достигающих значения ПДК. Были рассчитаны времена разности δ между моментами фактических превышений ПДК $t_{\text{ПДК}}$ и моментами обнаружения концентраций, приближающихся к ПДК $t_{\text{обн}}$, и число «ложных тревог». Результаты приведены в табл. 7.

Анализ показал, что начинающееся в процессе отклонение, вызванное изменением интенсивностей источников загрязнения, не связано с изменением метеопараметров, и алгоритм (3), (4) обнаруживает возможное превышение концентраций по отклонениям процесса от модели вида (5) раньше, чем по отклонениям процесса от модели вида (6). Число «ложных срабатываний» алгоритма в случае обнаружения по модели вида (5) на 50 % меньше, чем число срабатываний в случае обнаружения по модели вида (6).

4. ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ТЕКУЩЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРЕВЫШЕНИЯ НОРМАТИВНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

По результатам выполненного анализа предложен подход к прогнозированию состояния окружающей среды и предупреждению возникновения аварийных ситуаций, заключающийся в использовании двух моделей: одной (более точной) для прогноза, другой (робастной по отношению к авторегрессиям концентраций) для обнаружения отклонений, приводящих к возможным превышениям концентраций, с помощью алгоритма текущего обнаружения.

Пусть наблюдаемый процесс в стабильном режиме описывается двумя моделями вида (5) и (6). Первая из них описывает влияние на процесс погодных условий, а во вторую добавлены авторегрессоры объясняемой переменной, а также могут входить регрессоры других загрязнителей (если они коррелированы с процессом на рассматриваемом участке). По модели вида (6) осуществляется прогноз, а разность между фактическим значением концентрации и значением, вычисленным по модели вида (5), поступает на вход алгоритма текущего обнаружения. Изменения характеристик процесса вызывают отклонение процесса от модели вида (5), которое выявляется алгоритмом текущего обнаружения (3), (4). Алгоритм текущего об-

нарушения дает сигнал для перестройки используемой для прогноза модели вида (6).

Разработанный алгоритм представляет собой формальную процедуру, которая может быть включена в состав программно-алгоритмического обеспечения системы мониторинга и экологической защиты окружающей среды.

Таким образом, процесс мониторинга состоит из следующих шагов:

1) построение моделей вида (5) и (6);

2) прогноз по модели вида (6); вычисление значений по модели вида (5) и отклонений модельного значения от фактического; вычисление прогнозных значений по модели вида (6) и ошибки прогноза;

3) анализ изменений в процессе алгоритмом текущего обнаружения: если обнаружено изменение, приводящее к значимому увеличению допустимых концентраций, то подается сигнал, сообщающий оператору о необходимости принятия соответствующих управленческих решений.

Такая система контроля позволяет:

— обнаружить изменения в процессе до того момента, когда они приведут к возникновению аварийных ситуаций;

— улучшить качество текущего прогноза загрязнения состояния окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для осуществления предупреждающего контроля и оперативного обнаружения экологических нарушений необходимо специальное алгоритмическое обеспечение, позволяющее построить параметрические модели загрязнителей с учетом метеоусловий и обнаруживать текущие изменения в процессах.

Такое обеспечение может быть разработано с помощью методов построения векторных параметрических моделей и алгоритмов обнаружения изменения свойств, обнаруживающих отклонения исходного процесса от модели [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. — М.: Мир, 1974. — 406 с.
2. Ицкович Э.Л., Гребенюк Е. А. Разработка автоматизированной системы экологической защиты региона от промышленных выбросов // Приборы и системы управления. — 1994. — № 9. — С. 9—15.
3. Huang L. S. and Smith R. L. Meteorologically-dependent trends in urban ozone Technical Report 72 / National Institute of Statistical Sciences. — 1997.
4. Time series analysis of long-term data sets of atmospheric mercury concentrations / C. Temme et al. // Analytical and Bioanalytical Chemistry. — 2004. — Vol. 380, No 3. — P. 493—501.
5. Xie-Kang Wang and Wei-Zhen Lub Seasonal variation of air pollution index: Hong Kong case study // Chemosphere. — 2006. — Vol. 63, No 8. — P. 1261—1272.
6. Bordignon S., Gaetan C. and Lisi F. Nonlinear models for ground-level ozone forecasting // Statistical Methods and Applications. — 2002. — No 8. — P. 227—246.
7. Page E.S. Continuous inspection schemes // Biometrika. — 1954. — Vol. 41, No 1. — P. 110—115.
8. Lorden G. Procedures for reacting to a change in distribution // Ann. Math. Stat. — 1971. — Vol. 42. — P. 1897—1908.
9. Ritov Y. Decision theoretic optimality of the CUSUM procedure // Ann. Statist. — 1990. — Vol. 18. — P. 1464—1469.
10. Maddala G.S., In-Moo Kim, Unit Roots, Cointegration and Structural Change. — Cambridge University Press. — 1998. — P. 423.
11. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.05.2003 № 114 (ред. от 03.11.2005) «О введении в действие ГН 2.1.6.1338-03» (вместе с «Гигиеническими нормативами «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. ГН 2.1.6.1338-03», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21.05.2003) (Зарегистр. в Минюсте РФ 11.06.2003 N 4679).
12. Вересников Г.С., Панкова Л.А. Прогнозирование параметров экологического мониторинга // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2007. — № 4. — С. 58—64.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Дорофеевым.

Гребенюк Елена Алексеевна — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-76-40, e-mail: lngrebenuk@rambler.ru.

Новая книга

Левин В. И. Очерки истории прикладной логики. — Пенза: Пенз. гос. технол. акад., 2007. — 284 с.

Подробно изложена история открытий, приведших к новым, нетрадиционным применениям логики и появлению новых наук и рукотворных объектов. Наиболее подробно излагается история открытия логического моделирования дискретных систем, приведшего к появлению цифровой вычислительной и управляющей техники, равно как и новых наук — кибернетики, информатики, искусственного интеллекта. Также описывается история открытия логического моделирования принятия решений человеком — так называемая нечеткая логика. Обстоятельно воссозданы научные и человеческие биографии ряда ученых, связанных с указанными открытиями (К. Э. Шеннон, В. И. Шестаков, А. Накашима, Л. Заде, М. А. Гаврилов, С. А. Яновская). Большая часть материалов книги никогда не публиковалась и мало известна даже специалистам.

Для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, а также научных работников, интересующихся или занимающихся историей и философией науки.