

приземного озона в центральной части ЕТР И.Б. Коноваловым [9] апробирована химическая транспортная модель (XTM CHIMERE), но пока в России в оперативной практике численные модели для прогноза содержания приземного озона и других малых газовых составляющих, предшественников озона, не используются.

В статье ставится задача разработать расчетный метод определения комплексов метеорологических условий, обуславливающих высокое содержание озона в приземном слое воздуха. Для исследований применяется дискриминантный анализ.

*И.Ю. Шальгина*

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЫСОКОГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА**

### **Введение**

Приземный озон, его измерения, изменчивость и прогноз остаются актуальной задачей научных исследований во всем мире. Это связано в первую очередь с тем, что озон является веществом наивысшего класса опасности. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) включила его в список пяти наиболее опасных веществ, которые необходимо учитывать при оценке качества воздуха. Во многих странах, в том числе и в России, ежегодно отмечается повышение концентрации приземного озона выше установленных критериев. Заметим, у нас в стране в соответствии с Гигиеническими нормативами [1] максимальная разовая ПДК (ПДК м.р.) озона составляет 160 мкг/м<sup>3</sup>. По рекомендации ВОЗ, нормативом для озона является средняя за 8 ч концентрация, равная 100 мкг/м<sup>3</sup>.

Методы прогноза приземных концентраций озона основаны на нескольких подходах. Один из них – статистический [13, 14] – в России впервые был предложен А.М. Звягинцевым в 1996 году. Метод основан на регрессионных связях с концентрациями озона в предшествующие прогнозу сутки, с максимальной дневной температурой воздуха и относительной влажностью воздуха в 15–16 ч местного времени [6, 8].

Сегодня (<http://www.airqualitynow.eu/>) и США (<http://www.airnow.gov/index/>) интенсивно развивается численный прогноз концентраций озона, основанный на использовании транспортно-фотохимических моделей. Следует отметить, что для расчетов концентраций

### **Использованные данные**

Для анализа использованы данные измерений концентраций приземного озона, оксида углерода и диоксида азота в г. Москве на муниципальной сети автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПУ «Мосэкомониторинг» ([www.mosecom.ru](http://www.mosecom.ru)) и станции экологического мониторинга Института физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН, расположенной на территории метеорологической обсерватории географического факультета МГУ в период апрель–август 2002–2006 гг., а также данные измерений концентраций приземного озона в Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) г. Долгопрудный в апреле–августе 2007 года.

В качестве метеорологической информации привлечены наземные данные стандартных метеорологических наблюдений температуры, влажности воздуха и давления в г. Москве. Использованы также данные аэрологического зондирования и микроволнового профиломера (МТП5) за тот же период, что и данные о концентрации приземного загрязнения.

### **Обсуждение результатов исследований**

Газовый состав атмосферного воздуха в г. Москве имеет выраженные сезонные отличия. Это обусловлено при постоянстве эмиссий загрязняющих примесей особенностями климатических условий. В табл. 1 приведены данные о числе случаев с превышением ПДК м.р. оксида углерода, диоксида азота и приземного озона в 2006–2007 гг.

на станциях, не находящихся под непосредственным влиянием источников выбросов (станции смешанного влияния) в г. Москве.

Таблица 1  
Число случаев превышения ПДК м.р. CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> в г. Москве в 2006–2007 гг. (на станциях смешанного влияния)

	Теплый сезон			Холодный сезон					
	ночь	утро	вечер	сумма	ночь	утро	вечер	сумма	
CO	8	5	0	18	7	13	2	8	30
NO <sub>2</sub>	0	2	0	2	4	15	6	5	30
O <sub>3</sub>	0	0	11	0	11	0	0	0	0

Как видно из табл. 1 и показано в [11], в холодный сезон формирование высокого уровня загрязнения приземного воздуха происходит за счет газов – предшественников озона – CO, NO<sub>2</sub> и др. В теплый сезон основной причиной ухудшения качества атмосферного воздуха становится увеличение концентраций озона, которые достигают высоких и опасных для здоровья человека значений.

Анализ изменения концентраций загрязняющих примесей при различных метеорологических ситуациях позволяет выделить условия, приводящие к формированию эпизодов загрязнения и повышения концентраций загрязняющих примесей до опасных уровней. Эпизодом здесь называются случаи, когда на территории города содержание примесей приближается к установленным нормативам. В эпизодах ситуация осложняется активными фотохимическими процессами, когда загрязнители наиболее активно взаимодействуют с другими газами в атмосфере.

Как показано в [10], зимние эпизоды в г. Москве формируются в периоды аномально холодной и тихой погоды при наличии инверсий температуры в приземном слое воздуха. Отличительной особенностью эпизодов высокого загрязнения в теплый сезон является то, что летом, благодаря достаточному количеству света и тепла, фотохимические процессы протекают гораздо быстрее. Кроме того, если зимой периоды, благоприятные для накопления примесей, могут сохраняться в течение продолжительного времени, в том числе и в дневное время, то летом эпизоды высокого загрязнения не продолжительны, но могут наблюдаться и ночью, и днем.

Самые значительные эпизоды O<sub>3</sub> в теплый сезон в России и за рубежом [4, 15] наблюдались при метеорологических условиях, способствующих ночью и в утренние часы накоплению предшественников O<sub>3</sub>, а днем – активной фотохимической генерации озона с их участием. Можно отметить и другой тип эпизодов высокого озона, которые обусловлены адвекцией как предшественников, так и самого озона из районов природных пожаров [3].

В дополнение к проведенным ранее исследованиям связи максимальных суточных концентраций O<sub>3</sub> и метеорологических условий [11] с использованием данных АСКЗА проведен анализ связи между максимальными концентрациями приземного озона и отдельными метеорологическими параметрами, ранее не апробированными, с целью выявления наиболее информативных предикторов. В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции максимальных суточных концентраций приземного озона (O<sub>3max</sub>) в теплый сезон (апрель–сентябрь) по данным станции ИФА РАН, МГУ и максимальной суточной температурой воздуха (T<sub>max</sub>, °C), средней за двое суток максимальной и минимальной температурой воздуха (srT<sub>max2</sub>, °C), разностью максимальной и минимальной суточных температур воздуха (dT<sub>max-min</sub>, °C), отклонением средней суточной температуры от климатических значений (dT, °C), скоростью ветра на уровне 925 гПа в 00 ч местного времени (V925<sub>0</sub>, м/с) и 12 ч местного времени (V925<sub>12</sub>, м/с), средней скоростью ветра за эти два срока (srV925, м/с), приземным давлением (P, мб), минимальной относительной влажностью воздуха (H, %).

Таблица 2

Коэффициенты парной корреляции данных отдельных метеорологических параметров с максимальной суточной концентрацией приземного озона в г. Москве по данным 2002–2006 гг.

Параметры	O <sub>3max</sub>	T <sub>max</sub>	srT <sub>max2</sub>	dT <sub>max-min</sub>	dT	srV925	V925 <sub>0</sub>	V925 <sub>12</sub>	P	H
O <sub>3max</sub>	1	0,49	0,43	0,62	0,54	-0,27	-0,35	-0,24	-0,23	-0,51

Максимальные коэффициенты корреляции получены для озона с разностью максимальной и минимальной температур (r = 0,62),

отклонением средней суточной температуры от климатических значений ( $\gamma = 0,54$ ), максимальной суточной температурой ( $\gamma = 0,49$ ) и минимальной относительной влажностью ( $\gamma = -0,51$ ).

Представленные здесь результаты, как и полученные ранее [2, 5, 11], указывают на то, что максимальные суточные концентрации приземного озона не определяются отдельным метеорологическим параметром. Апробированные параметры с невысокими коэффициентами могут быть использованы как уточняющие в расчетных уравнениях, используемых для прогноза максимальных концентраций приземного озона.

Для исследований влияния метеорологических условий на максимальные концентрации приземного озона был применен дискриминантный анализ с использованием алгоритмов статистического пакета обработки данных SPSS ([www.spss.ru](http://www.spss.ru)). Расчеты проводились по данным за теплый сезон (апрель–август) 2002–2006 гг. в г. Москве. Вся выборка была разбита на два класса. К первому классу отнесены условия ( $M_{O_3}$ ), сопровождающие повышенные концентрации приземного озона, ко второму классу – условия, при которых повышения концентраций  $O_3$  до опасных уровней не наблюдается. В качестве независимых переменных выбраны метеорологические параметры, с которыми установлены лучшие связи  $O_{3\max}$  (табл. 2): максимальная приземная температура, средняя за двое суток максимальная температура воздуха, разность максимальной и минимальной температур. Но поскольку нами был применен метод пошагового анализа, то в процессе расчетов идет просеивание, и из взаимозависимых переменных выбирается одна, которая лучше описывает изменение зависимой переменной. Также в качестве независимых переменных выбраны: минимальная относительная влажность воздуха и средняя за два срока (00 и 12 ч) скорость ветра на уровне 925 гПа.

В результате выполненного анализа в итоговое уравнение для дискриминантной функции  $M_{O_3}$  вошли максимальная приземная температура воздуха, средняя за два срока (00 и 12 ч) скорость ветра на уровне 925 гПа и минимальная относительная влажность воздуха. Уравнение имеет следующий вид:

$$M_{O_3} = a_1 \cdot T_{\max} + a_2 \cdot srV_{925} + a_3 \cdot H + a_0 \quad (1)$$

где  $a_0, a_1, \dots$  – коэффициенты дискриминантной функции.

Результаты дискриминантного анализа оказались достаточно надежными, поскольку значение лямбды Уилкса равно 0,025 (близко к нулю).

Проведена апробация уравнения (1) на зависимой выборке. Результаты испытаний показали, что новый расчетный метод позволяет правильно идентифицировать 92 % случаев попадания  $M_{O_3}$  в группы метеорологических условий, сопровождающих повышенные или климатические максимальные концентрации приземного озона.

Анализ полученных результатов показал, что часть неудачных расчетов связаны с ситуациями, когда ветер в пограничном слое атмосферы превышал 10 м/с. Известно [7], что связь между приземными концентрациями озона и скоростью переноса не линейна. А именно: при значительных скоростях ветра (более 10 м/с) происходит обогащение приземного слоя озоном из вышележащих слоев. Но обогащаемый механизм возможного притока озона не приводит к повышению концентраций до предельно допустимых значений. Тем не менее такие случаи вносят коррективы в оценку метода расчета  $M_{O_3}$ .

В качестве независимой выборки для испытания разработанного метода определения максимальных суточных концентраций  $O_3$  на основе рассчитанных значений дискриминантной функции  $M_{O_3}$  был выбран теплый сезон 2007 года. Испытания уравнения (1) на зависимой выборке показали, что значения функции  $M_{O_3}$  меняются от –4 до 4. Значениям расчетного  $M_{O_3}$  от 1,5 и выше соответствуют метеорологические условия, способствующие увеличению концентраций  $O_3$  выше предельно допустимых значений.

На рис. 1 приведен график связи рассчитанной дискриминантной функции  $M_{O_3}$  с концентрациями приземного озона, измеренными в 16 ч на станции в г. Долгопрудный в 2007 году. Пунктирной линией на графике обозначена граница раздела двух групп метеорологических условий, в правой части – значения, описывающие условия, способствующие повышенным и высоким концентрациям  $O_3$ . Видно, что максимальным значениям расчетного  $M_{O_3}$  соответствуют максимальные значения  $O_3$ .

В табл. 3 приведены показатели успешности примененного метода для оценки концентраций приземного озона, измеренных в 16 ч

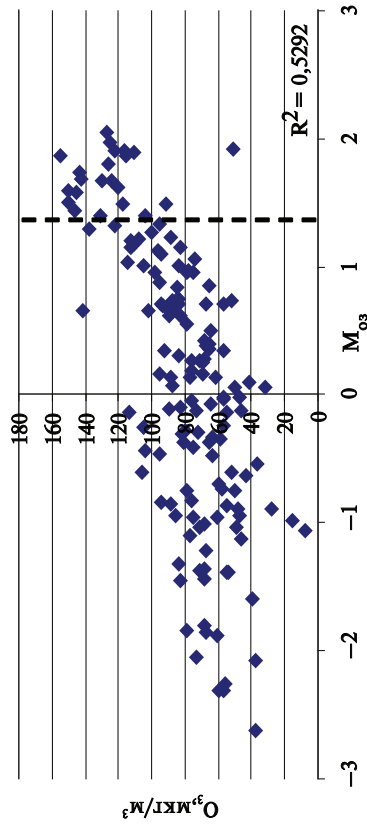


Рис. 1. Связь максимальных концентраций  $O_3$  на станции г. Долгопрудный и рассчитанных значений  $M_{O_3}$

на станции в г. Долгопрудный в 2007 году. Оценка результатов расчетов  $M_{O_3}$  на зависимой выборке показала, что предсказанность случаев с концентрациями, приближающимися (выше  $132 \text{ мкг/м}^3$ ) и выше ПДК м.р., составляет 75 %. Доля ложных тревог от общего числа прогнозов составляет 7 %.

Таблица 3  
Показатели успешности прогнозов индекса  $M_{O_3}$  на текущие сутки

Индекс	Количество прогнозов	Идентификация группы		Общая оправляемость, %	Предупрежденность прогноза, %
		спрогнозировано верно	ложные тревоги		
$M_{O_3}$	153	139	14	89,5	75

В полученное расчетное уравнение входит три метеорологических параметра. При прогнозе  $M_{O_3}$  с заблаговременностью до 2–3 суток предполагается использовать данные численных моделей атмосферы с высоким разрешением. На рис. 2 показан пример расчетов индекса метеорологических условий  $M_{O_3}$  для Европейской территории России.

Подобные расчеты для региона можно использовать также для экспертной оценки результатов расчета озона по численным химическим транспортным моделям, например, модели, описанной в работе [9] и уже апробированной для центральных областей России.

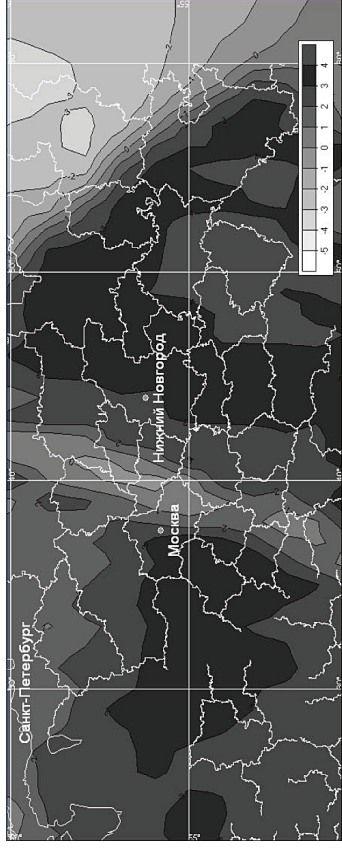


Рис. 2. Поле рассчитанных значений индекса  $M_{O_3}$  по данным модели NCEP на 15 августа 2008 года

## Выводы

С использованием дискриминантного анализа апробирован новый подход для прогнозирования условий, описываемых индексом  $M_{O_3}$ , благоприятных для формирования высоких уровней озона в приземном воздухе в Московском регионе.

Получено уравнение  $M_{O_3}$  для расчета дискриминантной функции, включающее три метеорологических параметра – максимальная приземная температура воздуха, средняя за два срока скорость ветра на уровне  $925 \text{ гПа}$  и минимальная относительная влажность воздуха. Для прогнозирования  $M_{O_3}$  до 2–3 суток предполагается использовать данные численных моделей атмосферы.

Оценка результатов расчетов  $M_{O_3}$  на зависимой и независимой выборке показала, что предсказанность случаев с концентрациями не менее  $0,8 \text{ ПДК м.р.}$  составляет 75 %. Доля ложных тревог от общего числа прогнозов составляет 7 %.

Автор выражает благодарность за предоставленные материалы А.М. Звягинцеву, Н.Ф. Еланскому и ГПУ «Мосэкомониторинг», а также И.Н. Кузнецовой за обсуждения и полезные замечания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России

на 2007–2012 гг.» по составной части темы «МЕГАПОЛИС — интегрированные технологии оценки загрязнения атмосферы крупных городов в региональном и глобальном масштабах на основе аэрокосмического и наземного мониторинга для уменьшения негативных последствий антропогенных воздействий».

#### Список литературы

1. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.1338–03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест». — 2003.
2. *Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б. и др.* Изменчивость газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 43, № 2. — С. 1–14.
3. *Еланский Н.Ф., Сенюк И.А.* Измерения приземной концентрации озона на Высокогорной научной станции Кисловодск: сезонные и суточные вариации // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 1995. — Т. 31, № 2. — С. 251–259.
4. *Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Егоров В.И., Кузнецова И.Н. и др.* Погодительно-аномалии приземного озона в июле–августе 2002 г. в Москве и ее окрестностях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 78–89.
5. *Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н.* Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2002. — Т. 38, № 4. — С. 486–495.
6. *Звягинцев А.М., Кручицкий Г.М.* Об эмпирической модели приземной концентрации озона вблизи Москвы (г. Долгопрудный) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 1996 — Т. 32, № 1. — С. 96–100.
7. *Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шальгина И.Ю.* Статистические методы прогноза максимальных суточных концентраций приземного озона в Москве // Информационный сборник № 36. — 2009. — С. 153–162.
8. *Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Какаджанова Г., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шальгина И.Ю.* Статистическое моделирование максимальных суточных концентраций приземного озона // Оптика атмосферы и океана. — 2010. — № 2. — С. 1–9.
9. *Коновалов И.Б., Еланский Н.Ф., Звягинцев А.М., Беликов И.Б., Бикманн М.* Валидация химически-транспортной модели нижней атмосферы Центрально-Европейского региона России с использованием данных наземных и спутниковых измерений // Метеорология и гидрология. — 2009. — № 4. — С. 65–74.
10. *Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Шальгина И.Ю., Лезина Е.А.* Метеорологические предпосылки формирования зимних эпизодов высокого загрязнения воздуха в г. Москве // Метеорология и гидрология. — 2008. — № 3. — С. 48–59.

11. *Шальгина И.Ю.* Исследование влияния метеорологических условий на концентрацию приземного озона и его предшественников в г. Москве: диссертация на соискание ученой степени канд. географ. наук. — ГУ «Гидрометцентр РФ». — 2007.

12. *Шальгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И., Звягинцев А.М., Лезина Е.А.* О прогнозировании приземного озона в большом городе (на примере Москвы) // Оптика атмосферы и океана. — 2007. — Т. 20, № 7. — С. 651–658.

13. *Clark T.L., Karl T.R.* Application of prognostic meteorological variables to forecasts of daily maximum one-hour ozone concentrations in the northeastern United States // J. Appl. Meteorol. — 1982. — Vol. 21, N 11. — P. 1662–1671.

14. *Jacob D.J.* Introduction to Atmospheric Chemistry. — Princeton: Princeton University Press, 1999. — 266 p.

15. *Solberg S., Coddeville P., Förster C., Orsolini Nov. Y., Utse K.* European surface ozone in the extreme summer 2003 // Atmos. Chemistry and Physics. — 2005. — Vol. 5. — P. 9003–9038.