

И. Ю. Шалыгина

О СВЯЗЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В МОСКВЕ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА

Качественно новые данные непрерывных наблюдений за содержанием малых газовых примесей на автоматизированной сети контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПУ «Мосэкомониторинг» позволили получить представления о сезонных и внутрисуточных особенностях загрязнения воздуха в Москве [2, 4, 7]. Основным источником загрязнения в городе — автотранспорт, на долю которого приходится более 80 % выбросов [1]. В данной статье приведены некоторые результаты оценок воздействия крупномасштабных атмосферных процессов на содержание загрязняющих веществ в приземном воздухе, главная цель которых — выявить информативные метеорологические характеристики, получаемые по данным численных моделей атмосферы, для использования в прогнозе загрязнения городского воздуха.

Исходные данные

В соответствии с уровнями техногенных нагрузок территория Москвы условно разделена на четыре типа [1]. В качестве характеристики загрязнения воздуха в исследованиях использованы данные о среднечасовых концентрациях CO, NO и NO₂ за 2004—2005 гг., полученные по измерениям на семи станциях АСКЗА, из которых:

- две — примагистрального типа с самым высоким уровнем техногенных нагрузок (Сухаревская площадь, ул. Народного ополчения);
- четыре — смешанного типа, находящиеся под воздействием различных антропогенных источников (улицы Бутлерова, Вернадского, Толбухина и Долгопрудная);
- одна — фоновая (район МГУ).

В анализе использована также рассчитанная по данным станций смешанного типа средняя концентрация CO и NO₂, как сглаживающая шумы отдельных станций.

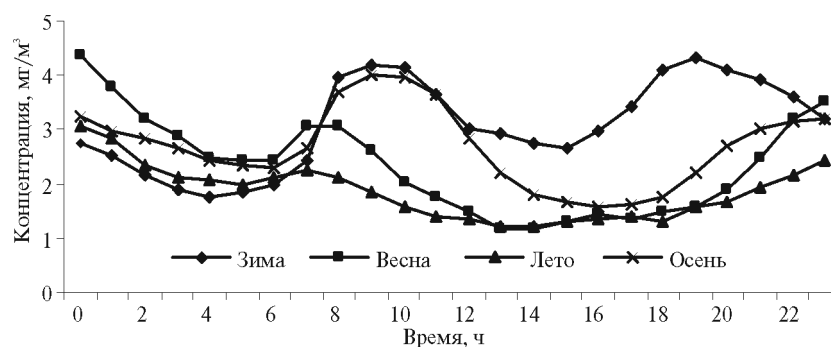
Характеристики крупномасштабного состояния атмосферы над Москвой получены по данным реанализа NCEP с горизонтальным разрешением 2,5 × 2,5 км [5, 6] для четырех сроков (0, 6, 12 и 18 ч ВСВ) каждого дня периода 2004—2005 гг.

Рассмотрены следующие параметры:

- температура на изобарической поверхности (и. п.) 1000 и 925 гПа,
- относительная высота и. п. 1000 и 925 гПа,
- разность значений температуры слоя 1000—925 гПа,
- обложные и конвективные осадки,
- высота геопотенциальной поверхности 925 гПа,
- скорость и направление ветра на поверхности 925 гПа,
- дефицит насыщения на поверхности 925 гПа,
- изменения температуры за 12 ч на поверхности 925 гПа,
- лапласианы геопотенциала высоты и температуры на поверхности 925 гПа.

В первом приближении сделаны предположения о прямом воздействии атмосферных процессов на колебания уровня загрязнения приземного воздуха. Для анализа сформированы ряды среднечасовых концентраций с соответствующей данным реанализа дискретностью 6 ч. При этом приняты во внимание особенности внутрисуточной изменчивости загрязняющих примесей (ЗП) и опережающее воздействие метеорологических условий.

Средние концентрации рассчитаны для сроков 4, 10, 16 и 22 ч и приближены к экстремумам в суточном ходе концентраций CO и NO₂. Так, примерно на 4 и 16 ч приходятся минимумы в суточном ходе концентраций, а в среднем за год около 10 и 22 ч наблюдаются суточные максимумы. На рисунке приведены сезонные типовые суточные изменения CO, обусловленные внутрисуточной изменчивостью выбросов и метеорологическими условиями рассеивания, которые получены по измерениям в 2005 г. в условиях ослабленного рассеивания примесей, т. е. при



Суточный ход среднечасовых концентраций CO на станциях примагистрального типа

неблагоприятных метеорологических условиях (НМУ). При интенсивном рассеивании суточный ход концентраций ЗП в приземном воздухе выражен слабо и экстремумы на пониженном фоне могут смещаться относительно среднесезонного профиля.

С учетом ярко выраженных сезонных особенностей внутрисуточной изменчивости ЗП при анализе данных использовано разделение на два сезона:

- 1) теплый (апрель—октябрь),
- 2) холодный (ноябрь—март).

Взаимная корреляция концентраций загрязняющих примесей

В таблице приведены результаты кросскорреляционного анализа среднечасовых концентраций CO, NO и NO₂ на станции смешанного типа (ул. Толбухина) в 2005 г. Наибольшие коэффициенты корреляции (*R*) в основном проявляются в синхронных связях. Самые высокие значения *R* во все сезоны получены для пары CO и NO (*R* = 0,91...0,96), которые являются первичными выбросами. Зависимость вторичного загрязнения NO₂ от первичных выбросов NO имеет сезонную характеристику, но, очевидно, она определяется различными факторами. Более выражены прямые связи NO₂ не с предшественником (NO), а с CO, в чем, видимо, отражаются общие закономерности вариаций этих примесей под влиянием метеорологических факторов. Аналогичный ана-

Корреляция среднечасовых концентрации CO с концентрациями NO, NO₂ и NO/NO₂, а также концентрации NO с концентрацией NO₂ на станции смешанного типа

Временной сдвиг, ч	NO	NO ₂	NO/NO ₂	NO с NO ₂	Временной сдвиг, ч	NO	NO ₂	NO/NO ₂	NO с NO ₂
З и м а					Л е т о				
-2	0,79	0,61	0,75	0,57	-2	0,57	0,50	0,33	0,40
-1	0,88	0,66	0,83	0,62	-1	0,76	0,57	0,45	0,41
0	0,96	0,72	0,87	0,67	0	0,91	0,58	0,56	0,38
1	0,89	0,69	0,81	0,64	1	0,80	0,50	0,50	0,30
2	0,80	0,63	0,73	0,60	2	0,64	0,38	0,42	0,20
В е с н а					О с е н ь				
-2	0,49	0,57	0,45	0,49	-2	0,63	0,31	0,38	0,23
-1	0,70	0,69	0,66	0,58	-1	0,82	0,34	0,48	0,23
0	0,90	0,77	0,83	0,66	0	0,96	0,36	0,53	0,24
1	0,72	0,68	0,68	0,56	1	0,83	0,39	0,42	0,25
2	0,52	0,55	0,49	0,45	2	0,64	0,36	0,33	0,24

лиз данных измерений на станциях примагистрального типа показал схожие результаты.

Наличие тесной связи между CO и изменчивостью NO, а также более высокие коэффициенты корреляции между CO и NO₂ позволяют использовать для исследования воздействия метеорологических факторов на загрязнение воздуха именно концентрации CO и NO₂.

Обсуждение результатов

Цель наших исследований — выявить метеорологические факторы, влияющие на содержание ЗП в приземном воздухе. В качестве объективной комплексной характеристики метеорологических условий использован предложенный Р. Б. Зариповым, сотрудником Гидрометцентра России, параметр ARi_B — некий аналог объемного числа Ричардсона [3]. Этот безразмерный показатель рассчитывается следующим образом:

$$ARi_B = g \operatorname{grad} \theta \frac{2}{\theta_{1000} + \theta_{925}} \left(\frac{H_{925} + H_{1000}}{V_{925}} \right)^2.$$

где g — гравитационная постоянная, H_{925} и H_{1000} — высота изобарических поверхностей 925 и 1000 гПа соответственно, θ_{925} и θ_{1000} — потенциальная температура на уровнях 925 и 1000 гПа соответственно, W_{925} — скорость ветра на и. п. 925 гПа.

Параметр ARi_B значительно отличается от собственно числа Ричардсона, служащего мерой кинетической энергии турбулентности, но его использование — оценка возможности применения комплексной характеристики состояния атмосферного пограничного слоя (АПС), которая рассчитывается по данным численных моделей атмосферы.

В первом приближении путем корреляционного анализа проведены оценки связей между концентрациями ЗП и метеорологическими характеристиками для теплого и холодного периодов на общей выборке (без разделения на отдельные сроки).

В теплый период (без разделения на сроки) статистически значимых показателей связи ЗП с метеорологическими параметрами не установлено (как следствие ярко выраженных внутрисуточных изменений содержания ЗП в городском воздухе). Лучшие, но невысокие коэффициенты корреляции получены между среднечасовой концентрацией CO и W_{925} ($R = -0,31 \dots -0,35$), а также между среднечасовой концентрацией CO и ARi_B ($R = 0,23 \dots 0,30$). Для остальных метеорологических параметров значимых связей с ЗП не установлено.

В холодный сезон (без разделения на сроки) показатели связи также невысокие, но более выражены, чем в теплый сезон. Лучшие связи получены также для CO с W_{925} ($R = -0,34...-0,39$). Для станций, удаленных от прямых источников выбросов, коэффициент корреляции CO и ARi_B составил порядка 0,30—0,36.

Кросскорреляционный анализ данных в теплый сезон показал небольшое увеличение коэффициентов корреляции между средними часовыми концентрациями CO и метеорологическими параметрами при сдвиге на 6 ч, что указывает на то, что содержание CO зависит от предшествующего в ближайшие часы состояния атмосферы (при сдвиге на большие сроки показатели корреляции снижались). Получено, что концентрация NO₂ не имеет асинхронной зависимости от метеоусловий, что, очевидно, связано с активностью химических преобразований оксидов азота в теплый сезон. В холодный период, напротив, для NO₂ наблюдаются некоторые улучшения связей с предшествующими метеоусловиями, а для CO такого эффекта не отмечено.

Таким образом, на общей выборке (без разделения данных на характерные сроки) наиболее «значимый» регрессор — скорость ветра в АПС. Низкие показатели связей CO и NO₂ с метеорологическими параметрами указывают на необходимость учета специфики внутрисуточной изменчивости ЗП при изучении воздействия атмосферных процессов на содержание малых газовых примесей. Последующий анализ данных в отдельные сроки показал эффективность такого подхода.

Как уже отмечено, сформированные для анализа «срочные» выборки ЗП приближены к данным реанализа и близки к суточным экстремумам концентраций CO и NO₂ (минимумы в 4 и 16 ч, максимумы — в 10 и 22 ч). Далее при анализе срочных данных ЗП использованы следующие термины:

- ночные (срок 4 ч),
- утренние (срок 10 ч),
- дневные (срок 16 ч),
- вечерние (срок 22 ч).

Н о ч ь . Теплый сезон. Оценка данных, наблюдавшихся в ночные сроки, показала существенное улучшение показателей связей для обоих веществ со всеми метеорологическими параметрами. На станциях смешанного типа между CO и скоростью ветра коэффициенты корреляции увеличились примерно до $-0,5$ ($R = -0,48...-0,53$), на станциях примагистрального типа $R = -0,41...-0,44$. Самые высокие коэффициенты корреляции получены для CO и ARi_B на станциях смешанного типа ($R = 0,51...0,60$) и на станциях примагистрального типа, находящихся под прямым воздействием выбросов ($R = 0,43...0,49$). В теплый сезон

заметнее зависимость CO от температуры ($R = 0,20 \dots 0,36$ на и. п. 1000 гПа, а на и. п. 925 гПа R увеличился до 0,43).

При анализе зависимости ночного содержания NO_2 от метеорологических параметров значительного улучшения коэффициентов корреляции не отмечено. Как и в общей выборке, наиболее значимый фактор — W_{925} (R возрос до $-0,42$). Очевидно, содержание этого загрязнителя в приземном воздухе ночью в большей степени определяется первичными выбросами NO_2 и инерцией.

В *холодный сезон* показатели связи заметно возросли лишь для CO и ARi_B на станциях смешанного ($R = 0,43 \dots 0,57$) и примыкающего ($R = 0,29 \dots 0,37$) типов. Для W_{925} они изменились мало.

Для NO_2 немного увеличились коэффициенты корреляции с разностью значений температуры в слое 1000—925 гПа и ARi_B , для остальных параметров они изменились мало или возросли не на всех станциях.

У т р о . На период 8—10 ч приходится первый максимум в суточном ходе ЗП. В *теплый сезон* в это время самые существенные изменения состояния нижних слоев атмосферы проявляются в температуре; ветер и другие факторы изменяются значительно меньше, влияя в основном на скорость химических преобразований первичных выбросов во вторичные загрязнители. И именно характеристика термического состояния АПС — разность значений температуры на и. п. 1000 и 925 гПа — для утреннего срока оказалась самой значимой в корреляции между ЗП и метеорологическими параметрами (R увеличился до $-0,52$).

В *холодный сезон* содержание CO в утренние сроки, как и ночью, зависит от состояния нижних слоев атмосферы. Самые высокие коэффициенты корреляции получены для комплексного показателя — параметра ARi_B ($R = 0,42 \dots 0,5$), а также для W_{925} (в среднем R увеличился до $-0,41$), геопотенциала и дефицита насыщения на и. п. 925 гПа (R увеличился до 0,42). Содержание NO_2 в утренние часы, как и ночью, мало зависит от текущего состояния АПС.

Д е н ь . В *теплый сезон* на часы после полудня в суточном ходе концентраций приходится дневной минимум, обусловленный в первую очередь интенсивной конвекцией в максимально развитом слое перемешивания. Конвекция по своему воздействию на ЗП преобладает над всеми другими метеорологическими параметрами и обеспечивает незначительную межсуточную изменчивость концентраций ЗП (CO , NO_2 , NO) в этот период суток. Имеющиеся отдельные «выбросы» в рядах данных в послеполуденные сроки случайны и не связаны с определенными метеорологическими условиями. Полученные слабые корреляции ЗП с метеорологическими параметрами подтверждают нецелесообразность использования линейных регрессоров для описания содержания ЗП в послеполуденные часы.

В *холодный сезон* в типовом суточном ходе ЗП в послеполуденные часы наблюдается лишь незначительное снижение уровня ЗП в приземном воздухе. Это отличие от суточного хода ЗП в теплый сезон нашло отражение в корреляции ЗП с метеорологическими параметрами. Коэффициенты корреляции оказались близки к полученным для утренних сроков, а между СО и разностью значений температуры на и. п. 1000 и 925 гПа они возросли до $-0,5$, что выше, чем для всех других сроков.

В *е ч е р*. На вечерние часы приходится второй суточный максимум загрязнения приземного воздуха, обусловленный и вечерним пиком автомобильных выбросов, и ослаблением рассеивающих свойств атмосферы. В *холодный сезон* для этого времени суток получены одни из самых высоких показателей связей; коэффициенты корреляции СО с ARi_B составили $0,3-0,57$, с W_{925} — $R = -0,37...-0,52$, с дефицитом насыщения и геопотенциалом на и. п. 925 гПа они возросли до $0,41$.

В *теплый сезон* коэффициенты корреляции между вечерними концентрациями СО и метеорологическими параметрами оказались близкими к полученным для ночных условий; наиболее выражены связи между СО и ARi_B , СО и W_{925} ; до $0,43$ увеличились коэффициенты корреляции с дефицитом насыщения и. п. 925 гПа.

Как один из способов устранения погрешностей за счет применения простой корреляции проведены численные эксперименты по устранению влияния нелинейности связей путем логарифмирования переменных корреляции. Предварительный анализ показал, что натуральный логарифм используемых для анализа концентраций СО и NO_2 значительно ближе к нормальному закону распределения. Проведенные логарифмические преобразования рассматриваемых величин позволили повысить значения коэффициентов корреляции в среднем на $5-10\%$ в целом для сезона, а также для отдельных сроков, за исключением послеполуденного срока в теплый сезон. В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть и другие способы линеаризации данных для получения объективных регрессионных зависимостей загрязнения городского воздуха и характеристик метеорологических условий рассеивания.

Основные выводы

Впервые для изучения воздействия крупномасштабных атмосферных процессов на загрязнение городского воздуха использованы данные реанализа совместно с данными автоматических непрерывных измерений концентраций ЗП на семи станциях АСКЗА «Мосэкомониторинг» Москвы. В результате сделаны следующие выводы.

1. При помощи корреляционного анализа проведены оценки воздействия метеорологических факторов на формирование внутрисуточных изменений концентраций ЗП (имеющих сезонные особенности) в приземном воздухе. Целесообразно и эффективно использовать такие оценки для данных наблюдений, приближенных к внутрисуточным экстремумам загрязнения воздуха;

2. Среди других ЗП концентрация СО — лучший индикатор воздействия крупномасштабных атмосферных процессов, что, с одной стороны, отражает индивидуальные свойства этого вещества, а с другой, — дает основания использовать СО в качестве главного маркера общего загрязнения воздуха;

3. Использование данных о средней концентрации (СО, NO₂) для однотипных территорий в целом приводит к получению более высоких (по сравнению с отдельной станцией) показателей связи с метеорологическими параметрами. Это позволяет при разработке прогноза загрязнения воздуха в городе использовать данные не отдельных станций, а станций определенных (двух—четырех) типов;

4. Выявлены наиболее информативные метеорологические параметры крупномасштабного состояния атмосферы для включения в уравнения — предсказатели загрязнения воздуха в Москве с использованием данных численных моделей атмосферы:

- число ARi_B (комплексная характеристика метеоусловий) — максимальные коэффициенты корреляции $R = 0,5...0,6$,
- скорость ветра на и. п. 925 гПа — $R = -0,5...-0,56$,
- разность значений температуры в слое 1000—925 гПа — $R = -0,48...-0,52$,
- геопотенциал и. п. 925 гПа — $R = 0,41...0,45$.

5. Исследования вида распределения рассматриваемых величин показали, что линейное преобразование анализируемых переменных может заметно улучшить полученные результаты.

Автор выражает благодарность за предоставленные данные ГПУ «Мосэкомониторинг». Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 05—0 5—65288-а, 05—0 5—0 8018-офи_а, 06—0 5—64104.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бюллетень о загрязнении воздушной среды города Москвы за 2004 год. — М.: Изд. ГПУ «Мосэкомониторинг», 2005. — 48 с.
2. Горчаков Г. И., Семутникова Е. Г., Зоткин Е. В., Карпов А. В. и др. Вариации газовых компонент загрязнения в воздушном бассейне г. Москвы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. — 2006. — Т. 42, № 2. — С. 1—15.

3. Замай С. С., Якубайлик О. Э. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города. Учебное пособие. Красноярск, 1998.

4. Шалыгина И. Ю. Согласование классификации метеорологических условий с данными загрязнения воздуха // X Всерос. конф. молодых ученых «Состав атмосферы. Климатические эффекты. Атмосферное электричество». — Москва, 2006. С. 26—35.

5. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. — 1996. — N 3, Vol. 77. — P. 437—471.

6. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woolen J., Yang S-K. et al. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc. — 2002. — N 11, Vol. 82. — P. 1631—1643.

7. Shalygina I. Yu. Validated classifications of meteorological conditions on data of air pollution in Moscow // Intern. conf. on environmental observations, modeling and informational systems «ENVIROMIS 2006». — Tomsk, 2006. — P. 69.