

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ****CLIMATIC RESOURCES****КЛИМАТЫЧНЫЯ РЭСУРСЫ**

УДК 551.588, 504.054

**В. В. Божкова<sup>1</sup>, Л. М. Болотько<sup>1</sup>, Р. Н. Бурак<sup>2</sup>, Б. Б. Козерук<sup>2</sup>, А. М. Людчик<sup>1</sup>, Е. А. Мельник<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Минск, Беларусь,  
e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by

<sup>2</sup>Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, Минск, Беларусь, e-mail: orap4@pogoda.by, kbb@rad.org.by, liena18@mail.ru

**СУТОЧНЫЙ ХОД КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ГОРОДОВ БЕЛАРУСИ**

Антропогенное загрязнение городского воздуха является серьезной проблемой для многих стран. Безусловно, главную роль в предотвращении загрязнения атмосферы играет сокращение вредных выбросов. Однако немаловажное влияние на содержание загрязняющих веществ в городском воздухе оказывают также и метеорологические условия: в первую очередь ветер, способствующий переносу загрязнений от их источников, и вертикальная устойчивость атмосферы, которая определяет эффективность перемешивания атмосферы в вертикальном направлении, способствующего уменьшению концентраций загрязнений в приземном слое.

С использованием данных мониторинга Белгидромета выявлены существенные особенности влияния метеорологических условий на качество воздуха в городах Беларуси. Установлено, что в течение суток наибольшие концентрации загрязняющих веществ чаще всего регистрируются в утреннее и вечернее время и значительно реже днем. Рост концентраций в утренние часы не зависит от сезона и происходит в одно и то же время, а вечерний пик частоты повышенных концентраций смещается на более позднее время суток при переходе от зимы к лету.

Суточный ход вертикальной устойчивости атмосферы над городами Беларуси показывает в среднем несущественные различия по всей территории страны: устойчивость повсеместно максимальна в ночное время, минимальна в послеполуденное и постепенно увеличивается от лета к зиме. Суточный ход климатической нормы скорости ветра проявляет особенности, похожие на поведение максимумов концентраций загрязняющих веществ: вечером снижение скорости ветра также смещается по времени суток в зависимости от сезона, а утреннее повышение постоянно во времени и не зависит от сезона.

Однако определяющее влияние на появление утреннего и вечернего максимумов загрязнения городского воздуха оказывает интенсивность движения транспорта в светлое время суток. Метеорологические факторы играют существенную роль в формировании этих максимумов, но не главную.

**Ключевые слова:** антропогенное загрязнение воздуха, метеорологические условия, вертикальная устойчивость атмосферы, климатическая норма скорости ветра, суточный ход

**V. V. Bozhkova<sup>1</sup>, L. M. Bolotsko<sup>1</sup>, R. N. Burak<sup>2</sup>, B. B. Kozeruk<sup>2</sup>, A. M. Liudchik<sup>1</sup>, H. A. Melnik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>National Ozone Monitoring Research and Education Center of the Belarusian State University, Minsk, Belarus,  
e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by

<sup>2</sup>Republican Center for Hydrometeorology, Radiation Control and Environmental Monitoring, Minsk, Belarus,  
e-mail: orap4@pogoda.by, kbb@rad.org.by, liena18@mail.ru

**THE DIURNAL VARIATION OF THE CONCENTRATION OF ANTHROPOGENIC AIR POLLUTION IN THE CITIES OF BELARUS**

Anthropogenic pollution of the urban air is a serious problem for many countries. Naturally, the main factor in the prevention of air pollution is the reduction of harmful emissions. However, the meteorological conditions also have an important effect on the content of pollutants in the urban air. Mainly the wind contributes to the removal of pollution from it. And the vertical stability of the atmosphere, which determines the effectiveness of air mixing in the vertical direction, contributes to a reduction the concentrations of contaminants in the surface layer of the atmosphere.

Using the monitoring data of the Hydrometeorological Center, significant features of weather conditions influence on air quality in Belarusian cities were revealed. It was found that during the day the greatest concentrations of pollutants are most often registered in the morning and evening and much less in the afternoon. Morning rise does not depend on the season and occurs at the same time, and the evening peak of the frequency of increased concentrations shifts to a later time of the day, moving from winter to summer.

The diurnal variation of vertical stability of the atmosphere over the cities of Belarus shows, on average, insignificant differences throughout the country: stability is maximized at night, minimal in the afternoon and gradually increases from summer to winter. The diurnal variation of the climatic normal of wind speed shows features like the behavior of the maximum concentrations of pollutants: in the evening, the decrease in wind speed also shifts by the time of day depending on the season, and the morning increase is constant by time and does not depend on the season.

However, traffic intensification in the daytime influenced on the appearance of the morning and evening peaks of the urban air pollution. Meteorological factors play an important role in the formation of these peaks, but not the main one.

**Keywords:** anthropogenic air pollution, meteorological conditions, vertical stability of the atmosphere, climatic norm of the wind speed, daily variation

**В. У. Бажкова<sup>1</sup>, Л. М. Балацько<sup>1</sup>, Р. М. Бурак<sup>2</sup>, Б. Б. Казярук<sup>2</sup>, А. М. Людчык<sup>1</sup>, А. А. Мельнік<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Нацыянальны навукова-даследчы цэнтр маніторынгу азонасферы БДУ, Мінск, Беларусь, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by

<sup>2</sup>Рэспубліканскі цэнтр па гідраметэаралогіі, кантролю радыеактыўнага забруджвання і маніторынгу навакольнага асяроддзя, Мінск, Беларусь, e-mail: orar4@pogoda.by, kbb@rad.org.by, liena18@mail.ru

### СУТАЧНЫ ХОД КАНЦЭНТРАЦЫЙ ЗАБРУДЖВАЮЧЫХ РЭЧЫВАЎ У АТМАСФЕРНЫМ ПАВЕТРЫ ГАРАДОЎ БЕЛАРУСІ

Антрапагеннае забруджанне гарадскога паветра з'яўляецца сур'ёзнай праблемай для многіх краін. Безумоўна, галоўнай роляй у прадухіленні забруджвання атмасферы з'яўляецца скарачэнне шкодных выкідаў. Аднак немалаважны ўплыў на ўтрыманне забруджвальных рэчываў у гарадскім паветры аказваюць таксама і метэаралагічныя ўмовы. Гэта ў першую чаргу вецер, які спрыяе вынасу забруджвання ад іх крыніц, і вертыкальная ўстойлівасць атмасферы, якая вызначае эфектыўнасць перамешвання атмасферы ў вертыкальным кірунку, які спрыяе памяншэнню канцэнтрацый забруджвання ў прыземным слоі.

З выкарыстаннем дадзеных маніторынгу Гідраметэацэнтра выяўлены істотныя асаблівасці ўплыву метэаўмоў на якасць паветра ў гарадах Беларусі. Устаноўлена, што на працягу сутак найбольшыя канцэнтрацыі забруджвальных рэчываў часцей за ўсё рэгіструюцца ў ранішні і вячэрні час і значна радзей днём. Ранішняе павышэнне не залежыць ад сезону і адбываецца ў адзін і той жа час, а вячэрні пік частаты павышаных канцэнтрацый рухаецца на больш позні час сутак пры пераходзе ад зімы да лета.

Сутачны ход вертыкальнай устойлівасці атмасферы над гарадамі Беларусі паказвае ў сярэднім неістотныя адрозненні па ўсёй тэрыторыі краіны: устойлівасць паўсюдна максімальная ў начны час, мінімальная – пасляпаўдзённы і па-ступова павялічваецца ад лета да зімы. Сутачны ход кліматычнай нормы хуткасці ветру праяўляе асаблівасці, падобныя да паводзін максімумаў канцэнтрацый забруджвальных рэчываў: увечары зніжэнне хуткасці ветру таксама рухаецца па часе сутак у залежнасці ад сезону, а ранішняе павышэнне – пастаяннае ў часе і не залежыць ад сезону.

Аднак вызначальны ўплыў на з'яўленне ранішняга і вячэрняга максімумаў забруджвання гарадскога паветра аказвае інтэнсіфікацыя руху транспарту ў светлыя часы сутак. Метэаралагічныя фактары нясуць істотную ролю ў фарміраванні гэтых максімумаў, але усё ж не галоўную.

**Ключавыя словы:** антрапагеннае забруджанне паветра, метэаралагічныя ўмовы, вертыкальная ўстойлівасць атмасферы, кліматычная норма хуткасці ветру, сутачны ход

**Введение.** Мониторинг загрязнения приземного воздуха стал актуальным в XX веке и получает все большее распространение в текущем столетии в связи с развитием экологически опасных промышленных производств и транспорта. Во многих публикациях [1–9] отмечается важность учета метеорологических условий при оценке эффективности рассеяния загрязнений, способствующего снижению их концентраций в приземном воздухе. Обычно выделяют три группы метеопараметров, играющих первостепенную роль в очищении атмосферы: скорость и направление ветра, вертикальную устойчивость атмосферы или близкую к ней по физическому содержанию высоту слоя перемешивания (mixery layer height) и температуру воздуха у поверхности земли.

В отношении последнего параметра следует заметить, что температура приземного воздуха непосредственно не связана с эффективностью рассеяния загрязнений. Во-первых, ее повышение не всегда означает усиление термической конвекции (снижение вертикальной устойчивости или увеличение высоты слоя перемешивания), поскольку одним из определяющих факторов рассеяния загрязнений является не сама температура, а ее стратификация в пограничном слое тропосферы (вертикальный градиент температуры [10]), что подтверждается также исследованиями [5, 7, 8]. Во-вторых, повышение температуры способствует генерации

вторичных загрязнителей воздуха и образованию смога. Примерами городов, где эти процессы ярко выражены, являются Лос-Анджелес и Мехико [11]. Для них характерны весьма высокие температуры и концентрации антропогенных загрязнений и, как следствие, высокие концентрации вторичного загрязнителя – приземного озона.

Что касается скорости ветра и вертикальной устойчивости атмосферы, то они являются безусловными «лидерами» в процессе очищения городского воздуха [2, 4–9, 12]. Следует заметить, что относительная эффективность влияния этих метеопараметров зависит от конкретных условий: географического положения города, городского ландшафта и особенностей планировки и архитектуры. Например, в [5] в качестве основного фактора указана вертикальная устойчивость атмосферы, поскольку сильные ветры в Милане, находящемся в окруженной горами долине реки По, крайне редки. Напротив, в качестве главного фактора, обеспечивающего рассеяние загрязнений, в работе [4] определены скорость ветра и его направление.

Воздействие ветра на уровень антропогенного загрязнения воздуха крупного города и сельской местности существенно различается. Для пункта, удаленного от источника антропогенных выбросов загрязняющих веществ, определяющее влияние на качество воздуха оказывает перенос загрязнений вместе с перемещением воздуха от их источника [13]. Однако в городе с интенсивным транспортным движением и крупными промышленными предприятиями, т.е. в месте расположения источника загрязнений, ветер способствует их «выдуванию» и уменьшению концентраций [4]. А термическая конвекция, скорее всего, действует всюду одинаково: чем меньше устойчивость атмосферы, тем быстрее происходит очищение приземного слоя воздуха от загрязнений. Однако, если в месте наблюдений отсутствуют повышенные концентрации загрязнений в приземном воздухе, очевидно, что вертикальное перемешивание не дает никакого эффекта.

В работе [14] на основании статистической обработки наблюдений за несколько прошлых лет получено распределение во времени суток частоты регистрации повышенных концентраций антропогенных загрязнений в областных городах Беларуси. Отмечается высокая корреляция времени появления пиков концентраций всех исследованных загрязнений (углерода оксида, азота оксида и диоксида, летучих органических соединений: бензола, толуола и ксилола). Установлено, что чаще всего повышенные концентрации антропогенных загрязняющих веществ (в 1,5 раза превышающие среднемесячные значения) регистрируются утром и вечером, в то время как днем и ночью вероятность их появления заметно снижается. Эта особенность суточного хода концентраций загрязнений в городах отмечается также и в других публикациях [1, 2, 4, 7], однако в [14] установлено, что первый, утренний пик повсеместно в городах Беларуси приходится на 5 часов по Гринвичу, а время появления второго, вечернего пика загрязнения воздуха зависит от сезона.

На первый взгляд, это время коррелирует с продолжительностью светового дня: зимой оно наступает раньше, весной и летом – значительно позже, а осенью опять смещается на более раннее время. Однако обнаруженная корреляция не может служить объяснением сезонного смещения вечернего пика загрязнений, поскольку не ясны физические механизмы такой зависимости.

Целью данной публикации является установление действительных причин обнаруженной закономерности, скорее всего, обусловленных сезонными изменениями интенсивности источников антропогенных выбросов и/или метеорологическими факторами. Поскольку закономерность носит ярко выраженный статистический характер (повышенные концентрации загрязнений могут появляться в любое время суток, но чаще это происходит утром и вечером), то для ее объяснения следует использовать статистические характеристики влияющих на качество воздуха метеорологических параметров.

**Активность источников антропогенных загрязнений воздуха.** Концентрация загрязняющих веществ в городском воздухе в первую очередь зависит от интенсивности выбросов местных источников. Поэтому можно ожидать, что именно суточный ход их активности определяет изменение концентраций загрязнений во времени [2, 3, 7]. Имеются убедительные доказательства такого влияния. Например, в работе [3] отмечается заметное снижение загрязненности воздуха в выходные дни, когда интенсивность антропогенных источников снижается.

Основными источниками загрязнений в крупных городах в настоящее время являются автомобильный транспорт, вклад которого в суммарные выбросы составляет свыше 70 %, промышленные предприятия и предприятия теплоэнергетики [15]. Интенсивность выбросов автотранспорта увеличивается утром, выходит на плато в дневное время и снижается с наступлением темного времени суток. Выбросы большинства промышленных предприятий происходят в течение рабочего дня и заканчиваются после 5–6 ч местного времени при работе в одну смену, или в 23–24 ч при двухсменной работе. Небольшое количество предприятий работает круглосуточно. Следовательно, интенсивность источников антропогенного загрязнения городского воздуха снижается в ночное время.

В связи с этим можно предположить, что именно выбросы автотранспорта, интенсивность которых коррелирует в некоторой степени с продолжительностью светового дня, объясняют обнаруженную закономерность. Однако тогда следовало бы ожидать постепенного повышения концентраций загрязнений утром и их снижения к темному времени суток, что на самом деле не происходит. Поэтому необходимо учесть влияние и других факторов.

Результаты мониторинга качества воздуха свидетельствуют о большой зависимости концентраций загрязнений от метеоусловий [14]. В частности, именно дневной «провал» в частоте возникновения повышенных концентраций антропогенных загрязняющих веществ в городском воздухе обязан усилению термической конвекции, способствующей эффективному переносу загрязненного воздуха в более высокие слои тропосферы, и повышению скорости ветра, приводящему к выносу загрязнений за пределы города.

**Вертикальная устойчивость атмосферы.** Состояние атмосферы (или стратификация), при котором небольшие вертикальные движения в атмосфере развиваются далее, захватывая следующие слои воздуха, называется неустойчивым [10]. Генераторами таких движений являются термическая конвекция, турбулентность и орографические особенности местности при сильном ветре. Наоборот, если начавшиеся движения не развиваются, а затухают, то говорят об устойчивой стратификации. Эти движения более интенсивны при больших вертикальных градиентах температуры  $-\partial T/\partial h$  ( $T$  – температура,  $h$  – высота) и быстро затухают в слоях инверсии и инверсии.

На территории Беларуси измерения вертикального профиля температуры в настоящее время не проводятся. В Белгидромете для оценки величины вертикального градиента температуры в пограничном слое тропосферы используется глобальная численная модель Метеорологического бюро Великобритании UKMO (United Kingdom Meteorological Office) [16]. Исходные данные для расчетов предоставляются с интервалом 6 ч для Северного полушария от 20°W до 70° E в узлах широтно-долготной сетки с шагом 0,53° по долготе и 0,86° по широте, что примерно составляет 60 км в средних широтах, по вертикали – 38 уровней (до 20 гПа). В пограничном слое атмосферы на основании данных UKMO есть возможность оценить вертикальный градиент температуры в двух слоях: от высоты 2 м до уровня давления воздуха 925 гПа и от уровня 925 гПа до 850 гПа (значения давления приблизительно соответствуют высотам 800 и 1500 м).

В качестве параметра, характеризующего эффективность вертикального перемешивания, авторами использовано минимальное значение градиента температуры для двух названных слоев. Такой выбор объясняется тем, что вертикальный обмен сдерживается слоем воздуха, обладающим наибольшей устойчивостью, т.е. наименьшим вертикальным градиентом температуры. Иными словами, не важно, где образовалась температурная инверсия, а важно, что в результате резко тормозятся вертикальные движения, что препятствует перемешиванию приземного воздуха с воздухом из верхних слоев нижней тропосферы и рассеянию загрязнений.

В некоторых других публикациях отдается предпочтение границе высоты слоя перемешивания [2, 6–8]. Хотя эта высота не связана однозначной функциональной зависимостью с определенным выше минимальным градиентом температуры, качественно названные характеристики должны удовлетворительно коррелировать друг с другом, исходя из физических соображений.

Согласно сказанному, чем меньше значение градиента, тем более устойчива атмосфера, тем сильнее заторможены вертикальные движения воздуха. На рис. 1 показан суточный ход верти-

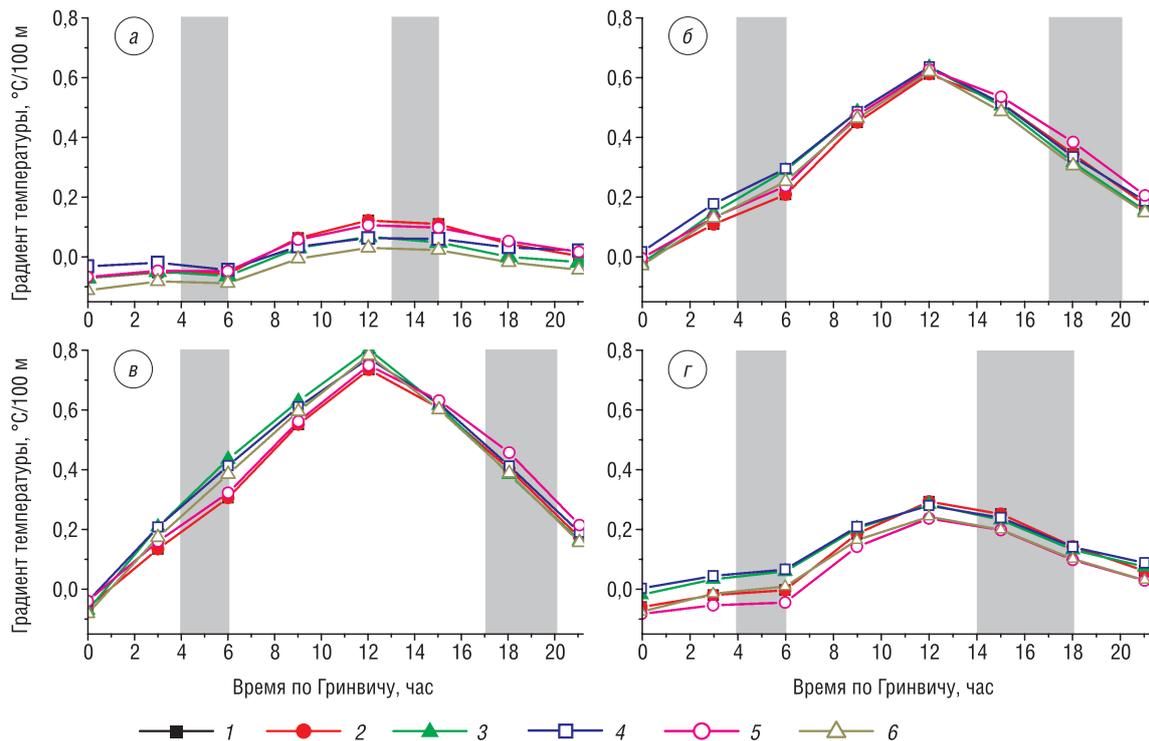


Рис. 1. Средний суточный ход вертикального градиента температуры в пограничном слое тропосферы в разные сезоны: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. 1 – Брест, 2 – Гомель, 3 – Могилев, 4 – Витебск, 5 – Гродно, 6 – Минск. Закрашены интервалы времени, отвечающие наибольшей частоте появления повышенных концентраций антропогенных загрязнений

кального градиента температуры в различные сезоны в областных городах Беларуси. Результаты получены путем усреднения доступных данных расчетов по модели УКМО в каждый из сезонов за 2013–2015 гг. для Минска и Витебска, за 2014–2016 гг. для Гомеля и Гродно и за 2013–2016 гг. для Бреста и Могилева. Видно, что наиболее высока устойчивость атмосферы в зимнее время. При этом она слабо зависит от времени суток. Весной и летом устойчивость повышается в ночные часы и падает в дневное время. Минимум устойчивости (максимум вертикального градиента температуры) обычно наступает в послеполуденное время (около 12 ч по Гринвичу).

В осенний период параметр устойчивости приобретает промежуточное положение между зимними и весенне-летними значениями. Согласно приведенным данным, во все сезоны пики повышенных концентраций загрязнений (серые области на графиках) отвечают пониженным, однако не минимальным (а зимой – даже несколько повышенным) значениям вертикального градиента температуры. Поэтому нельзя утверждать, что именно этот параметр оказывает определяющее влияние на сезонный сдвиг вечернего максимума загрязнений и на постоянство утреннего. Об этом также свидетельствует незначительное изменение градиента в течение суток в зимнее время.

Рис. 1 демонстрирует очень слабую зависимость минимального градиента температуры в пограничном слое тропосферы от региона страны. Одной из вероятных причин можно было предположить низкое пространственное разрешение расчетов, однако анализ ежедневных (неусредненных по длительности сезонов и годам) данных опровергает это предположение: результаты показывают существенную разницу в вертикальном градиенте температуры в зависимости от региона в отдельные дни (рис. 2). Следовательно, близость кривых на рис. 1 является результатом усреднения по совокупности дней и лет. Иными словами, климатические нормы суточного хода вертикальной устойчивости атмосферы почти одинаковы на территории Беларуси, несмотря на возможные существенные различия в вертикальной устойчивости в отдельных регионах в конкретный день конкретного года.

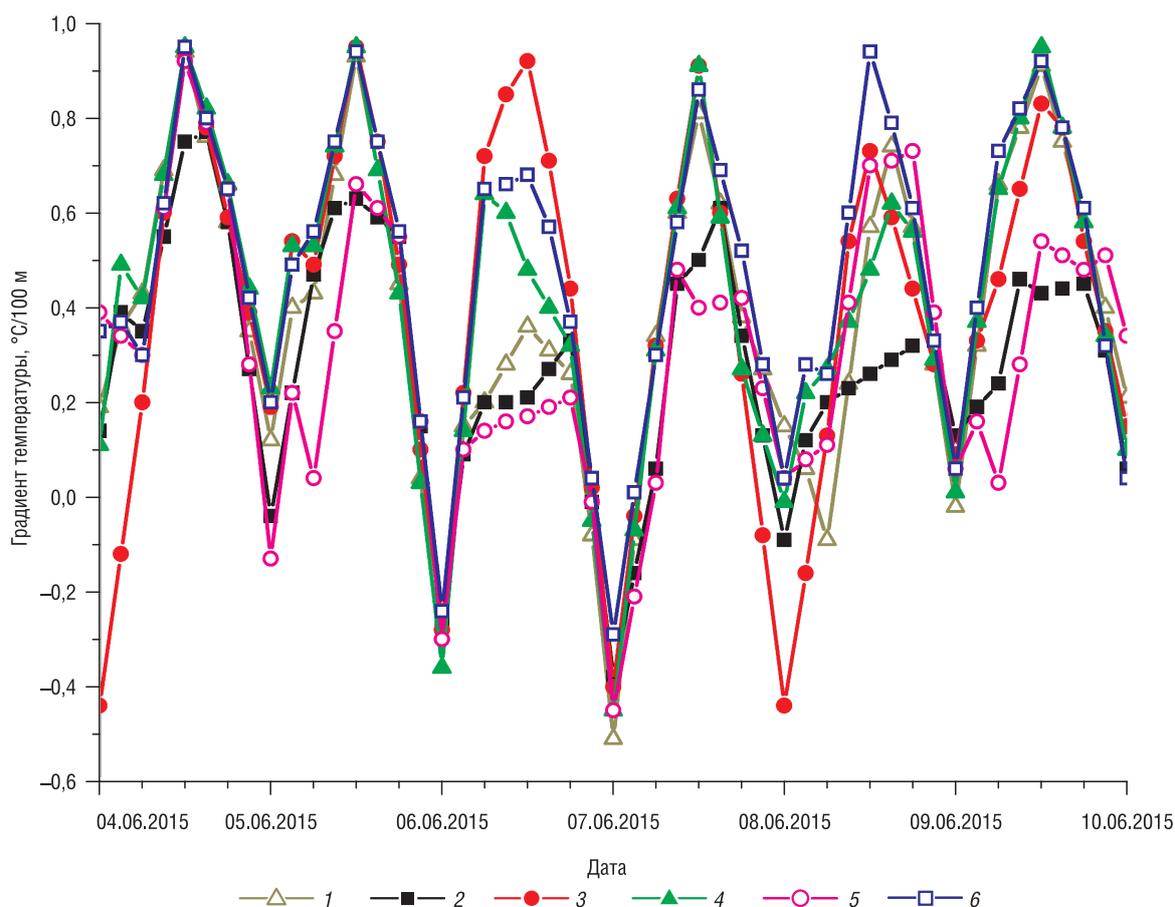


Рис. 2. Суточный ход вертикального градиента температуры в областных городах Беларуси за несколько дней июня 2015 г.: 1 – Брест, 2 – Гомель, 3 – Могилев, 4 – Витебск, 5 – Гродно, 6 – Минск.

**Скорость ветра.** Динамическая климатическая норма скорости ветра для областных городов Беларуси в зависимости от сезона и времени суток определена в работе [17] на основании данных наблюдений на городских метеостанциях за период 1985–2015 гг. Оказывается, что климатическая норма суточного хода скорости ветра во всех городах, несмотря на различия в абсолютной величине, повсеместно растет в дневное время и снижается к ночи. Так же как и в случае вертикального градиента температуры, зимой эти изменения незначительны, а в другие сезоны весьма существенны.

Таким образом, суточный ход скорости ветра и вертикальной стратификации пограничного слоя тропосферы способствуют рассеянию загрязнений и снижению их концентраций в приземном слое воздуха в дневное время.

Время вечернего пика частоты повышенных концентраций загрязнений следует за сезонным смещением минимума скорости ветра (рис. 3). Кривые построены на даты 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября. Заметно, что весной и летом вечернее снижение скорости ветра происходит несколько позже, чем зимой и осенью.

**Заключение.** С учетом приведенных сведений можно утверждать, что при условии постоянной в течение суток интенсивности источников антропогенных загрязнений повышенная вертикальная устойчивость атмосферы и снижение скорости ветра в ночное время способствуют росту концентраций загрязнений в воздухе в этот период суток.

Однако интенсивность источников достоверно падает ночью и концентрации загрязняющих веществ в воздухе, как показывают наблюдения, действительно снижаются. Поэтому эффекты торможения рассеяния загрязнений проявляются только утром и вечером, когда еще достаточно эффективны причины, их вызывающие, а интенсивность источников уже (утром) или

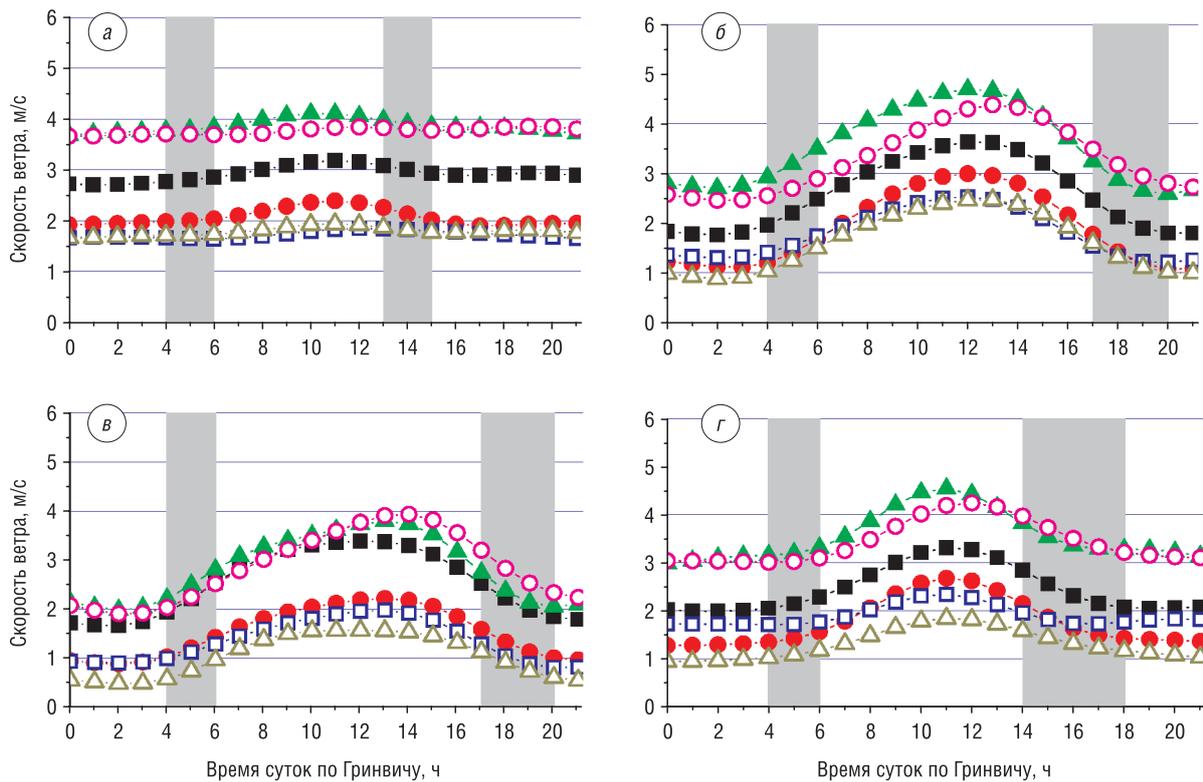


Рис. 3. Климатические нормы суточного хода скорости ветра в областных центрах Беларуси. Обозначения те же, что и на рис. 1

еще (вечером) велика. Иными словами, снижение концентраций загрязнений в городском воздухе после их вечернего пика обусловлено снижением интенсивности выбросов, несмотря на уменьшение эффективности рассеяния загрязнений. Точно так же увеличение загрязненности воздуха в утренние часы следует связывать с повышением активности источников выбросов, а нарастающие процессы рассеяния окончательно формируют утренний пик, обеспечивая последующее снижение концентраций загрязнений. В меньшей степени этот вывод относится к зимнему сезону, где суточный ход вертикальной устойчивости атмосферы и скорости ветра незначителен, и оба метеопараметра действуют в противофазе: устойчивость велика и скорость ветра тоже велика, однако утренний и вечерний пики концентраций загрязнений по-прежнему наблюдаются [1, 14].

Сказанное подводит нас к выводу, что главной причиной появления утреннего и вечернего пиков загрязнения воздуха в городах являются выбросы автомобильного транспорта, начало и конец интенсивного движения которого коррелируют со временем максимальных концентраций загрязнений воздуха и следуют тем же сезонным изменениям. Суточный ход метеопараметров, оказывающих влияние на рассеяние загрязнений, также играет существенную, но не определяющую роль.

В качестве подтверждения уместно привести результаты наблюдений в удаленном от источников антропогенных выбросов Березинском биосферном заповеднике (рис. 4). Приведен усредненный по сезонам в 2014 и 2015 г. суточный ход концентраций некоторых антропогенных загрязнений. ЛОС означает сумму концентраций бензола, толуола и ксилола, переведенных в единицы ppb.

Концентрации загрязнений в заповеднике значительно ниже, чем в городах, и в основном определяются переносом ветром загрязненного воздуха. Поэтому практически отсутствует суточный ход концентраций, несмотря на такой же, как в городах, суточный ход устойчивости атмосферы и скорости ветра. Вертикальное перемешивание не приводит к изменениям ввиду однородности состава тропосферы по высоте в хорошо перемешанном воздухе, и точно так же ветер приносит воздух с теми же концентрациями загрязнений.

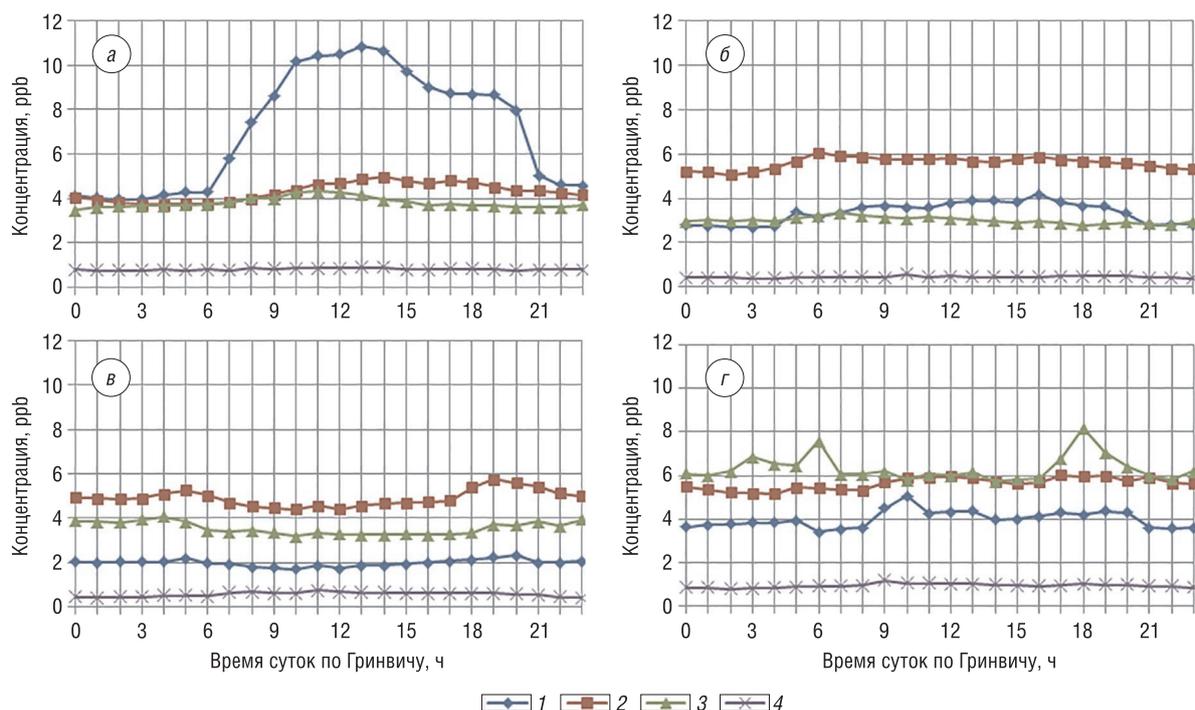


Рис. 4. Суточный ход концентраций загрязнений в Березинском биосферном заповеднике в разные сезоны: а – зима, б – весна, в – лето, г – осень. 1 – CO/10, 2 – NO<sub>2</sub>, 3 – NO, 4 – ЛОС·10.

В отношении одного из загрязнителей – углерода оксида, следует заметить, что в зимний период времени в заповеднике имеется свой источник угарного газа – выбросы из отопительных печей в деревнях, расположенных на территории или в непосредственной близости от заповедника. Этим объясняется повышение концентрации CO зимой и ее специфический суточный ход (рис. 4).

Во введении отмечено, что полученные результаты базируются исключительно на статистических характеристиках суточного хода концентраций загрязнений и определяющих эффективность их рассеяния метеорологических параметров. В связи с этим можно предположить, что действие выявленных физических механизмов, управляющих концентрацией антропогенных загрязнений городского воздуха, также проявляется только в статистическом смысле. Однако эти механизмы отнюдь не статистического характера, несмотря на то что для обнаружения их влияния на загрязненность воздуха использован статистический подход с усреднением по сезонам и ряду лет. Меняющиеся ото дня ко дню и в течение дня интенсивность источников выбросов и метеоусловия могут вносить существенные изменения в описанную выше среднюю картину: включение мощного источника, разрушение инверсии или усиление ветра быстро приводят к изменению уровня загрязнения городского воздуха в любой день года и в любое время суток. Ход концентраций загрязнений в этом случае отличается от среднесуточного, однако причинами его изменения по-прежнему остаются интенсивность выбросов, ветер и термическая конвекция.

#### Список использованных источников

1. Air quality in cities / P. J. Sturm – New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. – P. 31–50.
2. Almbauer, R. A. Analysis of the daily variations of wintertime air pollution concentrations in the city of Graz, Austria / R. A. Almbauer [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. – 2000. – Vol. 65. – P. 79–87.
3. Bronnimann, St. Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions / St. Bronnimann, Urs Neu // Atmospheric Environment. – 1997. – Vol. 31, N 8. – P. 1127–1135.
4. Chen, W. Diurnal, weekly and monthly spatial variations of air pollutants and air quality of Beijing / W. Chen, H. Zhao // Atmospheric Environment. – 2015. – Vol. 119. – P. 21–34.

5. *Finardi, S.* Systematic analysis of meteorological conditions causing severe urban air pollution episodes in the Central Po valley / S. Finardi, U. Pellegrini // Proceedings of the 9th Int. conf. on harmonization within atmospheric dispersion modeling for regulatory purposes. – June 1 – 4, 2004. – Garmisch-Partenkirchen, Germany. – P. 250–254.
6. Mixing layer height as an indicator for urban air quality? / A. Gei [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2017. – Vol. 10. – P. 2969–2988.
7. Variations of traffic related air pollution on different time scales in Szeged, Hungary and Freiburg, Germany / L. Makra [et al.] // Physics and Chemistry of the Earth. – 2010. – Vol. 35. – P. 85–94.
8. Influences of meteorological parameters and mixing layer height upon air pollutant concentrations in urban area / K. Schäfer [et al.] // Proceedings of the 9th international conference on air quality science and application. – 24–28 March 2014. – Garmisch-Partenkirchen, Germany. – P. 140.
9. *Verma, S. S.* / Effect of Meteorological Conditions on Air Pollution of Surat City / S. S. Verma, B. Desai // J. Int. Environmental Application & Science. – 2008. – Vol. 3. – P. 358–367.
10. Курс метеорологии / под ред. проф. П. Н. Тверского. – Л.: Гидрометеоиздат, 1951. – 888 с.
11. *Jacob D. J.* Introduction to atmospheric chemistry / D. J. Jacob – Princeton, NJ, Princeton University Press, 1999. – P. 267.
12. Meteorological and urban landscape factors on severe air pollution in Beijing / L. Han [et al.] // Journal of the Air & Waste Management Association – 2015. – Vol. 65. – P. 782–787.
13. Выявление источников загрязнения атмосферы на основе данных мониторинга и обратных траекторий / В. П. Кабашников [и др.] // Природные ресурсы. – 2011. – № 1. – С. 97–106.
14. Антропогенное загрязнение воздуха и приземный озон в городах Беларуси / В. В. Божкова [и др.] // Природные ресурсы. – 2018. – № 1. – С. 46–55.
15. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК / К. Рипдал [и др.]. – Япония, ИГЕС, 2006. – 333 с.
16. Metoffice. – <http://www.metoffice.gov.uk>. – Дата доступа: 13.08.2017.
17. *Людчик, А. М.* Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. I: температура и скорость ветра / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин, В. Я. Венчиков // Природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 85–92.

Поступила 13.11.2017