

УДК 551.588:504.054

## ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА АНТРОПОГЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОЗДУХА В ГОРОДАХ БЕЛАРУСИ

*В.В. Божкова*<sup>1,2</sup>, *Р.Н. Бурак*<sup>3</sup>, *Б.Б. Козерук*<sup>3</sup>,  
*А.М. Людчик*<sup>1,2</sup>, *Е.А. Мельник*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь;*

<sup>2</sup>*Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы,  
г. Минск, Республика Беларусь;*

<sup>3</sup>*Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного  
загрязнения и мониторингу окружающей среды, г. Минск, Республика Беларусь  
kbb@rad.org.by, liudchikam@tut.by*

Анализируется сезонный и суточный ход концентраций антропогенных загрязнений, а также приземного озона в городах Беларуси в отдельные годы (2014–2016 гг.). Иллюстрируются связи уровней загрязнения воздуха в отдельных городах страны и Березинском биосферном заповеднике со скоростью ветра и вертикальным градиентом температуры в атмосферном пограничном слое, которые в совокупности определяют дневное снижение концентраций загрязнений воздуха по сравнению с устойчивыми утренним и вечерним пиками. В отличие от антропогенных загрязнений, концентрация приземного озона в дневное время достигает суточного максимума; в последние годы эпизоды высоких концентраций озона в приземном воздухе городов Беларуси не зафиксированы.

*Ключевые слова:* антропогенное загрязнение воздуха, приземный озон, метеорологические условия.

### Введение

Атмосфера Земли является частью среды, в которой существует биосфера и от которой зависит ее существование. На качество воздуха влияют естественные и антропогенные выбросы загрязняющих веществ, и можно ожидать, что даже в пределах одного города концентрации антропогенных загрязнений сильно различаются в зависимости от месторасположения пункта наблюдений и близости источников выбросов. В качестве примера в таблице приведены данные, полученные в четырех районах [8] г. Минска за 2014 г. и в Березинском заповеднике за 2015 г., о среднегодовых концентрациях CO, NO<sub>2</sub>, NO и летучих органических соединений (ЛОС) антропогенного происхождения: суммарной концентрации бензола, толуола, ксилола.

Тем не менее роль отдельных источников в загрязнении атмосферы часто трудно определить по результатам мониторинга качества воздуха из-за существенного влияния метеоусловий. Транспорт занимает

лидирующие позиции в перечне наиболее масштабных источников загрязнений атмосферы [9]. Сжигание материалов в промышленности также является источником выбросов  $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$  и  $\text{CO}$ , а сжигание материалов бытовыми потребителями – источником выбросов  $\text{CO}$  [9]. При добыче нефти и газа происходят интенсивные выбросы в атмосферу ЛОС,  $\text{NO}_x$ , и  $\text{CO}$ . Все упомянутые вещества входят в состав так называемых прекурсоров озона, способных участвовать в фотохимических реакциях его образования в приземном слое атмосферы при определенных условиях.

**Таблица.** Среднегодовые концентрации загрязнений в различных районах г. Минска и в Березинском биосферном заповеднике

Пункт наблюдений	Концентрация, млрд <sup>-1</sup>				
	CO	NO <sub>2</sub>	NO	O <sub>3</sub>	ЛОС
Минск 1	109,9	14,6	4,4	20,0	0,8
Минск 4	443,4	23,4	26,9	18,2	1,5
Минск 11	242,1	24,2	14,3	24,5	2,7
Минск 13	132,4	12,1	11,1	23,2	4,6
Березинский заповедник	49	4,4	4,8	27	0,06

Повышению концентрации прекурсоров помимо местных выбросов способствует перенос ветром загрязненного воздуха от удаленных источников. Ветер может вызывать и противоположный эффект – выдувание загрязненного воздуха и, следовательно, уменьшение концентрации загрязнений. Очевидно, что для загрязненной атмосферы больших городов последний процесс оказывается определяющим. В формировании наблюдаемых концентраций загрязнений немаловажную роль играет также термическая конвекция, способствующая выносу загрязненного приземного воздуха в верхние слои тропосферы.

В отличие от прекурсоров озона, которые являются загрязнителями преимущественно антропогенного происхождения, основная масса озона образуется в стратосфере и является естественной составляющей атмосферы. На концентрацию озона в нижней тропосфере оказывают влияние ветер, переносящий озон в горизонтальном направлении, термическая конвекция, способствующая переносу в вертикальном направлении, и скорость осаждения на подстилающую поверхность.

Кроме того, увеличению концентрации приземного озона способствует его фотохимическая генерация в присутствии прекурсоров. Чаще всего антропогенное загрязнение воздуха приводит к разрушению озона. На это указывает множество публикаций, в которых отмечается обычно пониженная концентрация озона в загрязненном воздухе городов по сравнению с сельской местностью [4, 10], и поэтому

концентрация приземного озона в больших городах при сильном ветре обычно повышается. Этому же способствует инициированное ветром турбулентное перемешивание с более высокими слоями тропосферы. В частности, статистическая обработка данных наблюдений указывает на то, что для Минска корреляция между концентрацией озона и скоростью ветра положительна [7]. Для образования озона в приземной области необходимы достаточный уровень солнечного излучения, высокая температура, низкая влажность воздуха, слабый ветер и определенное соотношение концентраций прекурсоров [12, 13].

Помимо «классических» примеров Лос-Анджелеса и Нью-Мехико [12], где высокие концентрации озона наблюдались в летнее жаркое время, зафиксированы случаи его эффективной генерации в верховьях реки Грин (Upper Green river, штат Вайоминг) и в бассейне реки Уинты (Uintah river, штат Юта) в зимне-весенний период [11]. В этих двух удаленных друг от друга бассейнах местные выбросы прекурсоров обусловлены интенсивной добычей нефти и газа. Снежный покров, присутствующий в зимний сезон, обладает высоким альбедо, что способствует увеличению плотности солнечного излучения и образованию сильных температурных инверсий в нижней тропосфере. В результате в безветренную погоду создаются условия для накопления прекурсоров, фотохимической генерации озона и его медленного разрушения на заснеженной поверхности.

В данной публикации анализируются особенности антропогенного загрязнения воздуха городов Беларуси, влияние метеоусловий на концентрации загрязнений и влияние загрязнений на наблюдаемую концентрацию озона. В настоящее время пункты контроля качества воздуха Республиканского Гидрометцентра действуют во всех областных центрах Беларуси и ряде других городов, а также в Березинском биосферном заповеднике. Круглосуточные наблюдения ведутся за аэрозольными частицами, диоксидом серы ( $\text{SO}_2$ ), оксидом углерода (CO), оксидом и диоксидом азота ( $\text{NO}_x$ ), озоном ( $\text{O}_3$ ) и концентрациями таких летучих органических соединений, как бензол, толуол и ксилол.

В исследовании использованы данные измерений концентраций веществ, представленных в таблице, с автоматических пунктов наблюдений в шести областных городах и Березинском заповеднике. В Минске функционируют пять пунктов (результаты наблюдений с четырех из них приведены в табл. 1). Для измерения концентраций загрязняющих веществ (озон, оксиды азота и углерода) на пунктах мониторинга атмосферного воздуха используются газоанализаторы серии ML (фирма-изготовитель компания Monitor (Europe) Ltd, Великобритания, погрешность измерений  $\pm 5$  млрд<sup>-1</sup>), а также газоанализаторы серии AP-370 (фирма-изготовитель HORIBA, Япония, относительная погрешность не превышает  $\pm 25$  %). Концентрации

летучих органических соединений измеряются газовыми хроматографами Syntech Spectras (Нидерланды, относительная погрешность <2 %).

Система контроля качества воздуха на территории Беларуси находится в стадии развития, и не всегда возможно получение качественных и непрерывных рядов наблюдений с отдельных пунктов. Поэтому для анализа использованы данные за 2014 г. для Минска и Витебска, за 2015 г. – для Березинского заповедника, за 2016 г. – для Бреста, Гомеля, Гродно и Могилева.

Сведения о скорости ветра взяты из [1]. Вертикальная устойчивость атмосферы (эффективность термической конвекции) оценивалась на основании прогнозных расчетов вертикального градиента температуры в пограничном слое атмосферы по методике, описанной в [7].

Концентрации бензола, толуола и ксилола в большинстве случаев коррелируют между собой, что свидетельствует об общих источниках выбросов. Поэтому далее рассматривается суммарная концентрация этих веществ в миллиардных долях и обозначается как ЛОС. Концентрации остальных веществ также представлены в единицах млрд<sup>-1</sup>.

### **Сезонная динамика воздушных загрязнений**

На рис. 1 приведены среднemesячные концентрации антропогенных загрязнений и озона в течение 2016 года в Бресте, Гродно и Могилеве. Концентрация СО на рисунке уменьшена в 10 раз, а концентрация ЛОС – увеличена в 10 раз. Качественно похожие картины характерны и для других городов Беларуси.

Исключением является Березинский биосферный заповедник, где фиксируются низкие концентрации всех антропогенных загрязнений воздуха и относительно высокие – озона (таблица). Березинский заповедник сильно отличается от других регионов также незначительным сезонным ходом концентраций антропогенных загрязнений.

Концентрации плавно повышаются к зиме и понижаются к лету с незначительными флуктуациями. Повышение концентраций зимой частично обусловлено увеличением выбросов загрязнений в связи с отопительным периодом. И достаточно сильное влияние на сезонный ход концентраций загрязнений и озона оказывают метеорологические условия.

Термическая конвекция является одним из основных механизмов обмена приземным воздухом со свободной тропосферой (второй механизм – турбулентность, вызванная ветром). Судить об интенсивности термической конвекции можно по величине вертикального градиента температуры в пограничном слое: чем больше градиент, тем меньше вертикальная устойчивость атмосферы и тем эффективнее термическая конвекция.

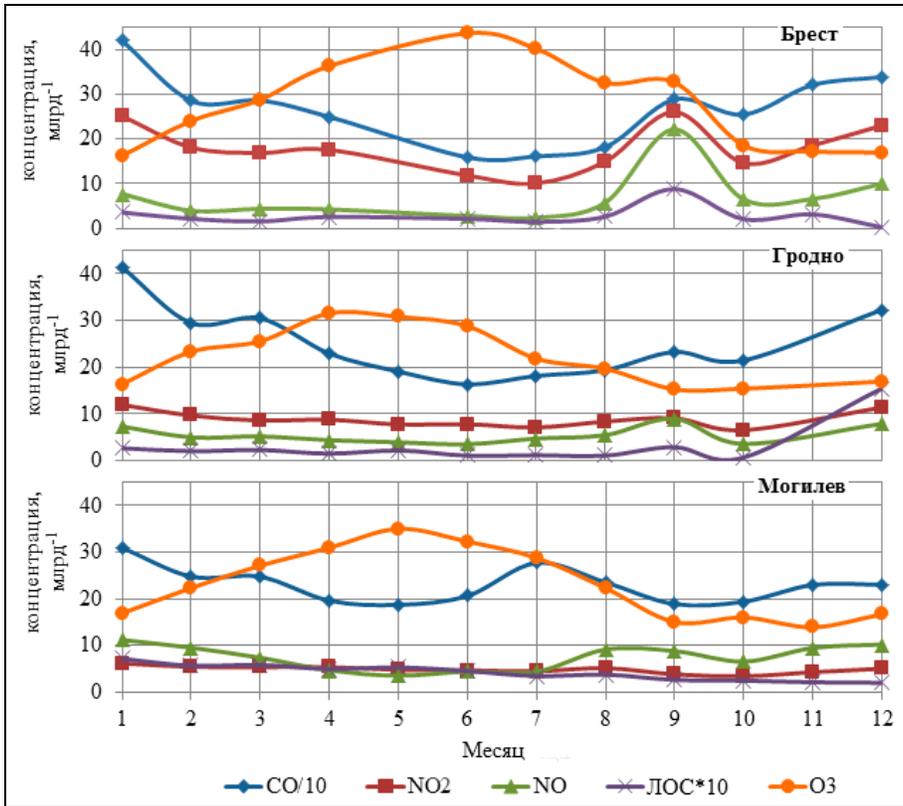
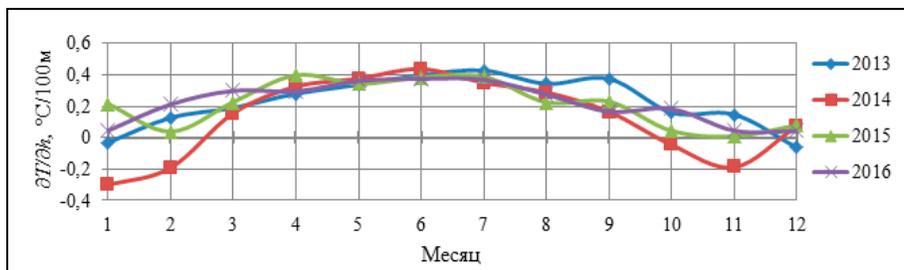


Рис. 1. Сезонная динамика среднемесячных концентраций антропогенных загрязнений и озона.

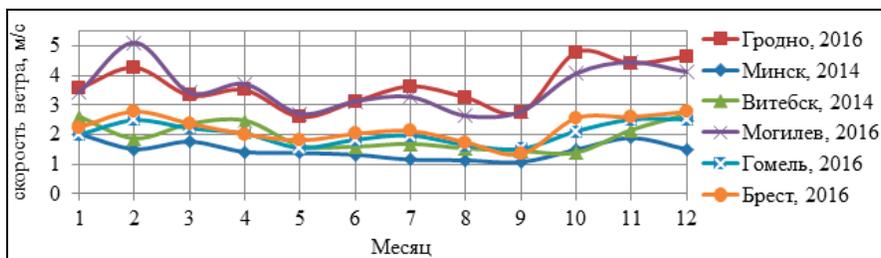
На рис. 2 показан годовой ход среднемесячных значений вертикального градиента температуры  $\partial T/\partial h$ , где  $T$  – температура,  $h$  – высота, в пограничном слое атмосферы в г. Бресте в разные годы. Летом при больших значениях градиента (слабой вертикальной устойчивости) происходит интенсивное перемешивание слоев воздуха и, как следствие, быстрое рассеивание загрязнений. Частые температурные инверсии (малые значения градиента) в зимнее время препятствуют выносу загрязненного воздуха в более высокие слои атмосферы. В течение суток устойчивость атмосферы тоже меняется: она максимальна в ночное время и минимальна в послеполуденное.

Другим важным метеорологическим фактором является скорость ветра, который способствует переносу загрязняющих веществ в горизонтальном направлении и оказывает существенное влияние на их концентрацию. Поскольку речь идет о городах с повышенным уровнем загрязнения воздуха, ветер способствует снижению концентраций загрязнений [2].



**Рис. 2.** Сезонная динамика среднемесячных значений вертикального градиента температуры в планетарном пограничном слое атмосферы. Брест, 2013–2016 гг.

На рис. 3 представлены среднемесячные значения скорости ветра в городах Беларуси. Приведенные результаты близки к климатическим нормам ветра, определенным для названных городов в [5]. Как правило, скорость ветра максимальна в зимний период и минимальна летом. Зимнее повышение скорости в некоторой степени компенсирует интенсификацию источников загрязнений и торможение конвективных процессов и способствует некоторому очищению городского воздуха.



**Рис. 3.** Сезонная динамика среднемесячной скорости ветра в городах Беларуси.

Сезонная динамика озона противоположна динамике прекурсоров: концентрация озона повышается к лету и понижается к зиме. Аналогичное поведение характерно также и для Лондона [3]. Зимой атмосфера устойчива, и прирост концентрации озона за счет обмена воздухом со свободной тропосферой минимален. Обычно плотная облачность в этот период [6] существенно снижает интенсивность приходящей солнечной радиации. Это подавляет процессы фотохимического производства озона в приземном слое несмотря на высокую отражательную способность снежного покрова, низкую скорость разрушения озона на заснеженной поверхности и повышенную концентрацию прекурсоров.

Устойчивость атмосферы летом низкая, что способствует поступлению озона из верхних слоев тропосферы [4]. Летом растет интенсивность ультрафиолетового солнечного излучения, способного приводить

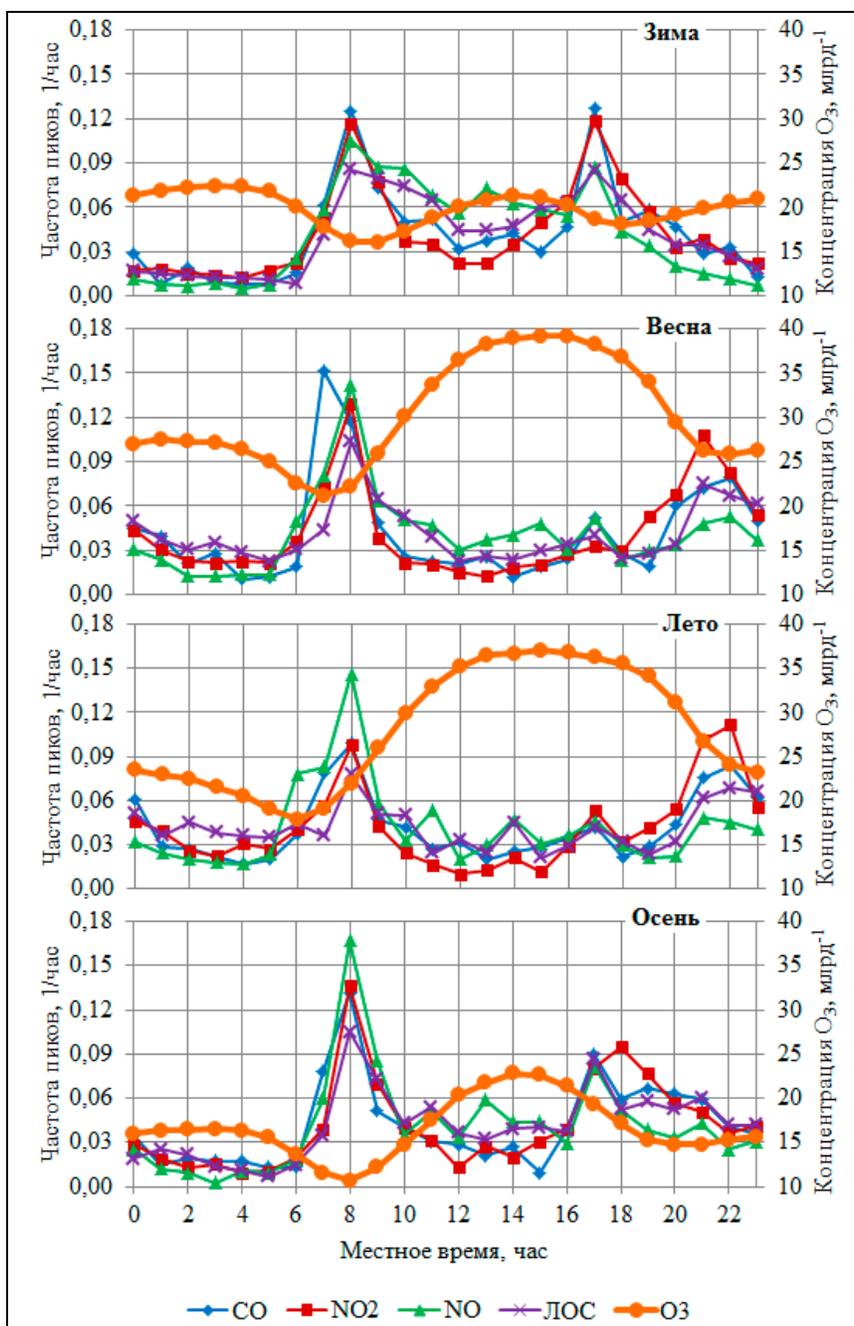
к генерации озона в приземном загрязненном слое воздуха. Для этого необходимы специфические метеорологические условия, высокие концентрации прекурсоров, а также их определенное соотношение. Обычно концентрации прекурсоров озона в летнее время на территории Беларуси невелики, и обнаружить непродолжительные эпизоды повышения концентрации озона за счет фотохимических реакций, анализируя усредненные характеристики воздуха и метеоусловий, не удастся.

### **Суточный ход концентраций загрязняющих веществ**

Влияние метеорологических условий на уровень загрязнения воздуха и концентрацию приземного озона особенно четко проявляется при сравнении их суточного хода и суточного хода метеопараметров. Высокие концентрации загрязнений любого типа в течение суток, чаще всего в городах, проявляются в виде кратковременных сильных повышений концентраций относительно более гладкого «фонового» уровня. Поэтому для анализа были определены частоты появления таких случаев. Использованы все данные наблюдений в шести областных центрах Беларуси за указанные во введении периоды времени. Отбирались наблюдения, в ходе которых концентрации отдельных загрязнений превышали в полтора раза соответствующее среднемесячное значение, и фиксировалось время появления каждого такого случая. Далее количество случаев, попавших в часовой интервал времени, нормировалось на их общее число. Результаты для разных сезонов приведены на рис. 4.

В течение суток первый пик частоты для всех загрязнений в районе 8 часов утра обусловлен началом автомобильного движения и работы предприятий. Днем активность источников загрязнений не уменьшается, однако частота событий снижается. Приземный воздух очищается за счет ветра и конвекции, скорость и интенсивность которых днем увеличиваются. Когда ветер и конвекция ослабевают вечером, снова начинается рост концентраций антропогенных загрязнений, который быстро прекращается вместе с затуханием человеческой активности. Интересной особенностью является сезонное перемещение вечернего пика в соответствии с длительностью светового дня. Установление непосредственной причины этого явления требует более детальных исследований.

Частота появления повышенных концентраций загрязнений достигает минимума в 5 часов утра. Постепенное ее снижение, несмотря на уменьшение скорости ветра и ослабление термической конвекции, обусловлено, скорее всего, сокращением выбросов загрязняющих веществ. На этот процесс влияет также и то, что большие города представляют собой так называемые «острова тепла». В ночное безветренное время теплый городской воздух поднимается вверх, а на его место прибывает более холодный и более чистый воздух из окрестностей.



**Рис. 4.** Распределение частоты появления повышенных концентраций антропогенных загрязнений по времени суток и суточный ход концентрации озона в разные сезоны.

Максимум скорости ветра в течение суток приходится на послеполуденное время во все сезоны. Зимой суточный ход климатической нормы скорости ветра практически отсутствует [5], поэтому снижение концентрации загрязнителей днем менее значительно.

Озон антикоррелирует с прекурсорами, достигая высоких показателей днем, низких – ночью. Тот факт, что повышенные концентрации прекурсоров озона в утренние и вечерние часы соответствуют низкой концентрации озона в это время, свидетельствует о разрушении последнего в загрязненном городском воздухе. Зимой увеличивается количество выбросов антропогенных загрязнителей в связи с отопительным сезоном. Сохранение относительно высокой концентрации озона ночью в благоприятных условиях (малой скорости разрушения на заснеженной поверхности и заторможенной конвекции) и последующее ее снижение утром также, вероятно, связано с началом фотохимического разрушения озона в это время.

### **Заключение**

Местоположение источников антропогенных загрязнений городского воздуха и их интенсивность оказывают определяющее влияние на качество воздуха в месте наблюдений. Однако существенную роль играют также и метеорологические условия в момент наблюдения, изменчивость которых заметно проявляется в сезонном и суточном поведении концентраций загрязнений. Наиболее важными атмосферными процессами, влияющими на концентрацию загрязнений, являются ветер и термическая конвекция. Поскольку метеорологические условия сильно влияют на уровень загрязненности воздуха, по результатам мониторинга его качества нельзя судить об интенсивности и объеме антропогенных выбросов от местных источников. Для этого необходимы данные об эмиссиях отдельных источников.

Содержание озона в приземном слое атмосферы определяют конвекция и атмосферный перенос, осаждение на поверхность и разрушение под действием оксидов азота, углерода и ЛОС. Загрязненный воздух городов способствует более быстрому разрушению озона. Эпизоды генерации озона в городском воздухе в ходе проведенного исследования не найдены. Вероятно, это объясняется низким уровнем антропогенных загрязнений и их составом, а также весьма высокой влажностью воздуха.

*Поступила в редакцию 28.06.2017 г.*

## Список использованных источников

1. Архив погоды. – <http://tr5.by> (дата обращения: 10.06.2017).
2. Еланский Н.Ф. и др. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Известия РАН. ФАО. 2015. Т. 51, № 1. С. 39-51.
3. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Тарасова О.А., Шалыгина И.Ю. Изменчивость концентраций основных загрязнителей воздуха в Лондоне // Оптика атмосферы и океана. – 2014. Т. 27. № 5. С. 424-434.
4. Звягинцев А.М. и др. Причины и факторы положительных аномалий приземной концентрации озона в Московском регионе и на юго-восточном побережье Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 493-502.
5. Людчик А.М., Покаташкин В.И., Венчиков В.Я. Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. I: Температура и скорость ветра // Природные ресурсы. 2017. № 1. С. 85-92.
6. Людчик А.М., Умрейко С.Д. Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. II: Влажность воздуха и облачность // Природные ресурсы. 2017. №1. С. 101-107.
7. Людчик А.М. и др. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон // Природные ресурсы. 2015. № 1. С. 96-106.
8. Покаташкин В.И., Людчик А.М. Отрицательный тренд приземного озона в г. Минске // Труды ИОФАН. 2015. Т. 71. С. 138-146.
9. Рундал К. и др. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК. Т. 1. Япония: ИГЕС, 2006. 333 p.
10. Arnell J. et al. EMEP Assessment. Part 1. Oslo, 2004. P. 77-106.
11. Oltman S. et al. Anatomy of winter-time ozone associated with oil and natural gas extraction activity in Wyoming and Utah // Elementa: Science of the Anthropocene. 2014. 15 p.
12. Sillman. S. Ozone production efficiency and loss of NO<sub>x</sub> in power plant plums: photochemical model and interpolation of measurements in Tennessee // J. Geoph. Res. 2000. Vol. 105. P. 9189-9202.
13. Silman. S. Tropospheric ozone, smog and ozone-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivity // Treatise on Geochemistry. Elsevier Ltd, 2003. Vol. 9. P. 407-431.

## SUMMARIES

**Influence of meteoconditions on anthropogenic air pollution in cities of Belarus** / Bozhkova V.V., Burak R.N., Kozeruk B.B., Liudchik A.M., Melnik E.A. // Proceedings of the Hydrometcentre of Russia. 2017. Vol. 365. P. 46-55.

The seasonal and diurnal course of concentrations of both anthropogenic pollution and surface ozone in the cities of Belarus are analyzed for some years (2014–2016). One has explicitly illustrated the links of air pollution levels in individual cities of the country and the Berezina Biosphere Reserve with the wind speed and the vertical temperature gradient in the atmospheric boundary layer, which, in combination, determine the daytime decrease in air pollution concentrations if compared to the stable morning and evening peaks. Unlike the anthropogenic pollution, the concentration of surface ozone reaches its daily maximum in the daytime. In recent years, episodes of high ozone concentrations in the surface air of Belarusian cities have not been detected.

*Keywords:* anthropogenic air pollution, ground-level ozone, meteorological conditions.