Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2023;3:16–30
Journal of the Belarusian State University. Ecology. 2023;3:16–30

УДК 504.3

СЕЗОННЫЙ ХОД КОНЦЕНТРАЦИЙ АНТРОПОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВОЗДУХА И ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В ГОРОДАХ БЕЛАРУСИ

***А. Н. АКИМОВ*[1]*, А. М. ЛЮДЧИК*[1]*, Е. А. МЕЛЬНИК*[2]*, П. Н. ПАВЛЕНКО*[3]**

[1]*Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы,*
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
[2]*Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю*
радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды,
пр. Независимости, 110, 220114, г. Минск, Беларусь
[3]*Белорусский национальный технический университет,*
пр. Партизанский, 77, 220107 г. Минск, Беларусь

На основании данных наблюдений Национальной системы мониторинга окружающей среды анализируются уровни антропогенного загрязнения воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси и Березинском биосферном заповеднике. Исследуются особенности суточного хода концентраций загрязнений. Рассчитаны среднемесячные значения концентраций в разные годы для каждого пункта наблюдений и определены их многолетние средние для каждого пункта наблюдений и средние месячные уровни загрязнений для городов с несколькими пунктами наблюдений. Анализируется изменение уровней загрязнения воздуха с годами и различия в уровнях загрязнения отдельных городов. Наблюдаемое различие обусловлено не только разными источниками загрязнений воздуха и их интенсивностью, но и различием в метеорологических условиях. Общие выводы могут быть сделаны в отношении сезонного хода концентраций загрязнений: почти все из них максимальны в феврале, затем падают к лету и растут в осенний период до следующего февраля. Только с летучими органическими соединениями четкой повторяющейся сезонной зависимости во всех пунктах наблюдений не выявлено. Общее снижение концентраций загрязнений в летнее время объясняется снижением вертикальной устойчивости атмосферы, интенсификацией ее вертикального перемешивания и разбавлением концентраций загрязнений в приземном слое воздуха. Выявленное снижение в последние годы концентраций антропогенных загрязнений в городах требует детального анализа для выяснения его причин. Две возможные причины – уменьшение выбросов промышленными предприятиями и меняющийся климат, приводящий к интенсификации очищения городского воздуха. По результатам исследования самый чистый воздух зафиксирован в Березинском заповеднике. Однако в Бресте, Могилеве и Гродно концентрации приземного озона в весенне-летний период оказываются выше, чем в заповеднике, несмотря на существенно более высокие концентрации антропогенных загрязнений в городах по сравнению с заповедником. Объяснение следует искать в различии метеоусловий и трансграничном переносе загрязнений и озона. Концентрации оксида углерода слабо различаются в отдельных городах: наиболее высокие – в Гомеле, наиболее низкие – в Минске. Что касается летучих органических соединений, то самые высокие – в Минске, самые низкие – в Гомеле. А по уровню загрязнения оксидами азота оба названных города являются лидерами среди областных центров республики.

Образец цитирования:
Акимов АН, Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН. Сезонный ход концентраций антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в городах Беларуси. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;3:16–30.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2023-3-16-30

For citation:
Akimov AN, Liudchik AM, Melnik EA, Paulenka PN. Seasonal course of anthropogenic air pollution and surface ozone concentrations in the cities of Belarus. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;3:16–30. Russian.
https://doi.org//10.46646/2521-683X/2023-3-16-30

Авторы:
Александр Николаевич Акимов – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник; заведующий лабораторией.
Александр Маркович Людчик – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией.
Елена Александровна Мельник – ведущий инженер-химик службы экологической информации.
Павел Николаевич Павленко – старший преподаватель кафедры безопасности технологических процессов в производстве.

Authors:
Aleksandr N. Akimov, PhD (physics and mathematics); senior researcher; head of the laboratory.
alex_akimov@mail.ru
Alexander M. Liudchik, PhD (physics and mathematics), docent; head of the laboratory.
liudchikam@tut.by
Alena A. Melnik, lead chemical engineer at the department of environmental information.
kbb@rad.org.by
Pavel N. Paulenka, senior lecturer at the department of safety of technological processes in production.
pavlenko_pn@mail.ru

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

Благодарность. Авторы выражают благодарность сотрудникам Белгидромета, предоставившим информацию для анализа и активно участвовавшим в ее обсуждении.

SEASONAL COURSE OF ANTHROPOGENIC AIR POLLUTION AND SURFACE OZONE CONCENTRATIONS IN THE CITIES OF BELARUS

***A. N. AKIMOV*[a], *A. M. LIUDCHIK*[a], *E. A. MELNIK*[b], *P. N. PAULENKA*[c]**

[a]*National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University,*
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus
[b]*Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring,*
110 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220114, Belarus
[c]*Belarusian National Technical University,*
77 Partyzanski Avenue, Minsk 220107, Belarus
Corresponding author: A. N. Akimov (alex_akimov@mail.ru)

Based on the data of the National Environmental Monitoring System, the levels of anthropogenic air pollution and surface ozone in the regional cities of Belarus and the Berezinsky Biosphere Reserve are analyzed. The features of the diurnal course of pollution concentrations are discussed. Monthly average values of concentrations in different years for each observation site were calculated and their long-term averages for each observation site and average monthly pollution levels for cities with several observation sites were determined. Changes in air pollution levels over the years and differences in pollution levels in individual cities are analyzed. The observed differences is due not only to different sources of air pollution and their intensity, but also to differences in meteorological conditions. General conclusions can be drawn regarding the seasonal course of pollution concentrations: almost all of them are maximum in February, then fall towards the summer and increase in the autumn period until the following February. Only with volatile organic compounds, no clear recurring seasonal dependence was found at all observation points. The general decrease in pollution concentrations in summer is explained by a decrease in the vertical stability of the atmosphere, intensification of its vertical mixing, and dilution of pollution concentrations in the surface air layer. The revealed decrease in concentrations of anthropogenic pollution in cities in recent years also requires a more detailed analysis to determine its causes. Two possible reasons are a reduction in emissions from industrial enterprises and, after all, a changing climate, leading to an intensification of urban air purification. According to the results of the study, the cleanest air is in the Berezinsky Reserve. However, in Brest, Mogilev and Grodno, the concentrations of ground-level ozone in the spring-summer period are higher than in the Reserve, despite significantly higher concentrations of anthropogenic pollution in cities compared to the Reserve. The explanation should be sought in the difference in weather conditions and the transboundary transport of pollution and ozone. The concentrations of carbon monoxide vary slightly in individual cities, the highest – in Gomel, the lowest – in Minsk. As for volatile organic compounds, the highest are in Minsk, the lowest are in Gomel. And in terms of nitrogen oxide pollution, both of these cities are leaders among the regional centers of the Republic.

***Keywords*:** surface ozone; meteorological conditions; anthropogenic air pollution.

Acknowledgments. The authors are grateful to the employees of Belhydromet, who provided information for analysis and actively participated in its discussion.

Введение

В современную эпоху антропогенное воздействие на атмосферу становится более интенсивным, масштабным и разнообразным. Это создает серьезную проблему в жизнедеятельности человека вследствие загрязнения воздуха.

Основные источники загрязнения воздуха, как правило, сосредоточены в крупных городах и промышленных центрах. Изначально самые загрязненные города были обнаружены на Американском континенте – Лос-Анджелес и Мехико [1] с высокой концентрацией приземного озона, генерируемого в условиях плотного городского смога. Озон – вторичный загрязнитель приземного воздуха, образующийся в присутствии высоких концентраций антропогенных загрязнений и солнечного излучения. Со временем «центр тяжести» загрязнения воздуха переместился через Тихий океан в Индию, Пакистан и Китай [2]. Частично это было обусловлено экологическими мероприятиями в Америке, но главную роль сыграло бурное развитие транспорта и промышленности на азиатском континенте.

Следует отметить, что в Европе не все благополучно с качеством воздуха, серьезные проблемы существуют в городах Италии, Германии и других стран. Например, в Польше 36 городов входят в список

50-ти самых загрязненных городов Европы [3]. В этом списке белорусский Новополоцк занимает шестое место[1]. Причина состоит в большом количестве промышленных предприятий, расположенных в его окрестностях.

В Беларуси значительное внимание уделяется качеству воздуха. В большинстве крупных городов и промышленных центров Белгидрометом в рамках Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) проводятся наблюдения за содержанием ряда загрязняющих веществ в воздухе. В настоящее время такие наблюдения осуществляются на автоматических станциях, где ведутся непрерывные измерения концентраций некоторых загрязнений, и на пунктах с дискретным (ручным) режимом отбора проб, заметно расширяющих список определяемых веществ. Обобщенные сведения о результатах наблюдений НСМОС регулярно публикуются Белгидрометом в «Ежегодниках состояния атмосферного воздуха»[2].

Одну из лидирующих позиций в перечне антропогенных источников загрязнений атмосферы [4] занимает транспорт, выбрасывающий такие соединения, как диоксид серы, оксид углерода, оксиды азота, летучие органические соединения, а также твердые частицы (сажу, пыль). Сжигание материалов и топлива и различные технологические процессы в промышленности и энергетике также являются источниками выбросов NO_x ($NO + NO_2$) и CO, а сжигание материалов бытовыми потребителями – источником выбросов CO. Существенным источником антропогенного загрязнения воздуха является строительство и сельское хозяйство.

Роль отдельных источников в загрязнении атмосферы часто трудно оценить по результатам мониторинга качества воздуха из-за меняющихся метеоусловий. Наиболее важными факторами, влияющими на очищение приземного воздуха, считаются скорость и направление ветра, а также вертикальная устойчивость атмосферы. В Беларуси скорость ветра в зимнее время в среднем увеличивается, что способствует очищению городского воздуха, а вертикальное перемешивание существенно тормозится из-за уменьшения вертикального градиента температуры. Как показывают результаты наблюдений, второй фактор более сильно влияет на загрязненность городского воздуха в зимнее время, которая обычно возрастает [5].

В отличие от загрязнений антропогенного происхождения, в основном озон образуется в стратосфере и является естественной составляющей атмосферы. Находящийся в верхних слоях атмосферы озон защищает биосферу планеты от вредного солнечного ультрафиолетового излучения, однако в приземном слое способен нанести определенный вред живым организмам. На концентрацию озона в нижней тропосфере оказывают влияние ветер, переносящий озон в горизонтальном направлении, термическая конвекция, способствующая переносу в вертикальном направлении, скорость осаждения на подстилающую поверхность [6], а также химические реакции с другими составляющими атмосферы, приводящие к генерации или разрушению озона. Для генерации озона в приземном слое необходимым условием является наличие ультрафиолетового солнечного излучения.

В Беларуси антропогенное загрязнение воздуха обычно приводит к снижению концентрации приземного озона [7]. Поэтому в больших городах при сильном ветре, приносящем более чистый воздух из сельской местности, она обычно повышается. Этому также способствует конвективное и инициированное ветром турбулентное перемешивание с вышележащими слоями тропосферы, как правило, содержащими более высокие концентрации озона [8].

В данной публикации рассматривается поведение антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси в сравнении с ситуацией в экологически чистом районе – Березинском биосферном заповеднике (далее – заповедник). Анализируется годовой ход концентраций загрязнений.

Материалы и методы исследования

Исследование базируется на наблюдениях за качеством воздуха автоматическими станциями Белгидромета, расположенными в областных городах и Березинском биосферном заповеднике и непрерывно измеряющими уровень загрязнения оксидом углерода, оксидом и диоксидом азота, озоном и летучими органическими веществами – бензолом, толуолом и ксилолом за 2012–2022 гг. При анализе имеющейся информации возникают отдельные проблемы, связанные в основном со значительными разрывами в рядах данных из-за сбоев в работе измерительного оборудования и недостаточного количества автоматических измерительных приборов.

Особенности суточного хода загрязнений воздуха. Суточный ход концентраций антропогенных загрязнений воздуха в городах Беларуси детально рассмотрен в [7; 9]. Установлено, что чаще всего их повышенные концентрации фиксируются в утреннее и вечернее время суток. При этом вечерний максимум

[1]Национальный доклад о состоянии окружающей среды Республики Беларусь / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, РУП «БелНИЦ «Экология». Минск: БелНИЦ «Экология»; 2019. 191 с.

[2]Ежегодник состояния атмосферного воздуха. [Электронный ресурс]. URL: https://rad.org.by/articles/vozduh/ (дата обращения: 12.01.2023).

сдвигается на более позднее время в весенне-летний сезон. Установлена причина такого сдвига: смещение во времени вечернего повышения вертикальной устойчивости пограничного слоя атмосферы. Помимо этого, анализ наблюдений подтверждает хорошо известный «эффект выходного дня» [10]: в выходные дни антропогенное загрязнение воздуха в городах уменьшается. Для подтверждения этого удобнее всего воспользоваться результатами статистической обработки наблюдений, как это делалось в [7; 9], поскольку существенное влияние на загрязнение воздуха оказывают метеорологические условия. В зависимости от них суточный ход концентраций загрязнений может существенно меняться, а ожидаемое их снижение в выходные дни маскироваться за счет меняющейся погоды. Более-менее удачный пример наблюдения реального снижения концентраций загрязнений в выходные дни в течение месяца представлен на рис. 1 для г. Гомеля.

В отличие от загрязнений антропогенной природы, концентрация приземного озона обычно растет в дневное время до максимума, наступающего после полудня, а затем начинает уменьшаться и падает до минимума ночью. Основной причиной такого поведения является фотохимическая генерация озона у поверхности земли в присутствии солнечного излучения, а также прекурсоров озона и его разрушение в ночное время суток. Этому способствует интенсификация вертикального перемешивания в дневное время, обеспечивающая приток повышенных концентраций озона из более высоких слоев атмосферы. В городах Беларуси дневному увеличению концентрации озона способствует усиление ветра, приносящего воздух из сельских районов, более чистый от антропогенных загрязнений и, следовательно, содержащий более высокие концентрации озона [7; 11].

Превышение предельно допустимых концентраций антропогенных загрязнений воздуха в областных центрах Беларуси обычно случается не часто и непродолжительное время в течение суток[3].

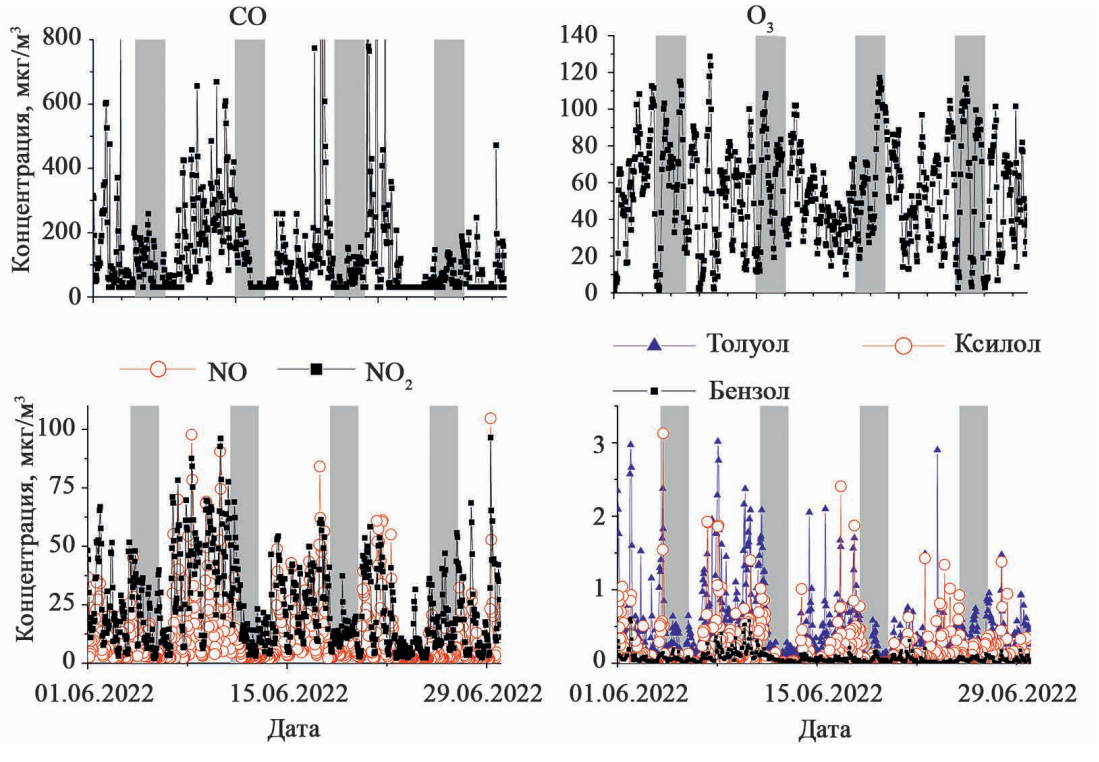

Рис. 1. Результаты измерений концентраций загрязнений воздуха в июне 2022 г. в Гомеле: в выходные дни (соответствующие периоды выделены серым цветом) концентрации антропогенных загрязнений обычно снижаются, а концентрация приземного озона повышается, при этом меняющиеся метеорологические условия маскируют этот эффект

Fig. 1. Results of measurements of air pollution concentrations in June 2022 in Gomel. It can be seen that on weekends (corresponding periods are highlighted in gray) the concentrations of anthropogenic pollution usually decrease, while the concentration of ground-level ozone increases. Changing meteorological conditions masks this effect

Среднемесячные концентрации загрязнений воздуха в разные годы. Среднемесячные значения концентраций на конкретном пункте наблюдений иногда существенно различаются в разные годы, и это вряд ли может быть связано с изменением климата. Климат, безусловно влияющий на уровень загрязнения городского воздуха, так быстро не меняется. К тому же, иногда наблюдаются тенденции разной направленности

[3]Ежегодник состояния атмосферного воздуха. [Электронный ресурс]. URL: https://rad.org.by/articles/vozduh/ (дата обращения: 12.01.2023).

в изменении концентраций отдельных загрязнений на пунктах одного города и в разных городах. Очевидно, что такие эффекты не могут быть интерпретированы названной причиной.

Возможными причинами также могут являться изменения в номенклатуре и интенсивности источников загрязнений. И эта причина представляется основной. В последние десятилетия развитие автомобильного транспорта оказывает существенный вклад в загрязнение воздуха. Качественный состав и относительный вклад отдельных выбрасываемых транспортом загрязнений практически одинаков во всех городах, поэтому разница в процентном соотношении концентраций отдельных антропогенных загрязнений между разными городами определяется не связанными с транспортом источниками. Иначе мы наблюдали бы только изменение абсолютных уровней загрязнений при сохранении относительных вкладов отдельных составляющих. Иными словами, наблюдаемые отличия в качественном составе загрязнений обусловлены исключительно изменением списка и производительности промышленных предприятий, функционирующих в конкретном городе или его окрестностях.

Анализ результатов наблюдений за загрязнениями воздуха в городах Беларуси основывается на их среднемесячных концентрациях, определенных за весь анализируемый период. В [12; 13] анализировались только те месяцы, в течение которых можно было получить данные о концентрациях полного списка загрязнений, регистрируемых на конкретном автоматическом пункте НСМОС. И это обосновывалось необходимостью использования полученной информации для исследования поведения приземного озона в условиях антропогенного загрязнения воздуха. В настоящей работе мы отказались от такого ограничения, что позволило заметно увеличить объем данных в отношении каждого отдельного загрязнения или их группы. Здесь и далее используется нумерация автоматических пунктов наблюдений, принятая в Белгидромете. То, что в статье упоминаются только пункты 04 и 06 в Могилеве, не означает, что не рассмотрены данные с пунктов 01–03, 05 и т. д.: других автоматических станций в этом городе нет.

Далее представлены результаты обработки среднемесячных данных о следующих загрязнениях или их группах: приземный озон, оксид углерода, оксид и диоксид азота, летучие органические соединения (сумма концентраций бензола, толуола и ксилола) в единицах ppb.

Дополнительных пояснений требует процедура расчета средних. На первом этапе результаты наблюдений усредняются около метеорологических сроков (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 ч по Гринвичу). Процедура усреднения работает, если данных наблюдений в интервале (срок −1 ч) – (срок +1 ч) не менее 2-х. Иначе считается, что данные на заданный срок отсутствуют. Далее на основании данных, относящихся к суточным срокам, рассчитываются среднесуточные значения, если число сроков с данными превышает 6. Среднемесячные значения рассчитываются на основе среднесуточных, если получено не менее 20 среднесуточных значений, иначе среднемесячное значение не формируется. Такая процедура используется с целью обеспечения корректного учета суточного и сезонного хода концентраций загрязнений при расчете их среднемесячных значений.

Результаты, представленные на рис. 2–8, требуют краткого пояснения. Во-первых, среднемесячные значения концентрации конкретного загрязнения не всегда получены для каждого месяца заданного года. Поэтому многолетние месячные средние определены для каждого месяца на основании разного числа лет наблюдений. Иногда количество таких лет очень мало.

Во-вторых, на рисунках среднемесячных концентраций заметны существенные межгодовые различия. Одной из возможных причин таких различий являются меняющиеся метеорологические условия. Другой – меняющиеся источники загрязнения воздуха и их интенсивность. Третьей возможной причиной может быть низкое качество измерений.

На рис. 2–8 каждая кривая относится к отдельному году и обозначена уникальными символами и цветами в соответствии с табл. 1. На всех последующих рисунках концентрации приведены в единицах ppb. Это логично, поскольку эффективность участия в химических реакциях отдельных загрязнений в первую очередь зависит от количества их молекул в единице объема, а не от веса этих молекул. В нормальных условиях концентрации 1 мкг/м^3 рассматриваемых веществ соответствует 0.86 ppb CO, 0.52 ppb NO2, 0.8 ppb NO, 0.5 ppb O3, 0.31 ppb бензола, 0.26 ppb толуола, 0.23 ppb ксилола. После перевода в единицы ppb суммарные концентрации бензола, толуола и ксилола обозначаются как ЛОС (летучие органические соединения).

В заповеднике (рис. 2) концентрации антропогенных загрязнений воздуха значительно ниже городских. Поэтому масштаб по осям ординат для антропогенных загрязнений на этом рисунке существенно увеличен. Заметное повышение концентрации оксида углерода в зимнее время объясняется интенсификацией печного отопления в деревнях на территории и в окрестностях заповедника, торможением термической конвекции и интенсификацией регионального переноса. Следует также обратить внимание на снижение концентраций оксидов азота и летучих органических соединений в последние годы. Сведения об оксиде углерода в заповеднике для начала рассматриваемого периода, к сожалению, отсутствуют. Слабая изменчивость сезонного хода концентраций оксида углерода и тенденции снижения с годами концентраций оксидов азота и ЛОС характерны также и для более высоких их концентраций в областных городах

(рис. 3–8). Концентрации приземного озона в заповеднике – одни из самых высоких из-за практически отсутствующих антропогенных загрязнений, способствующих разрушению озона в условиях Беларуси.

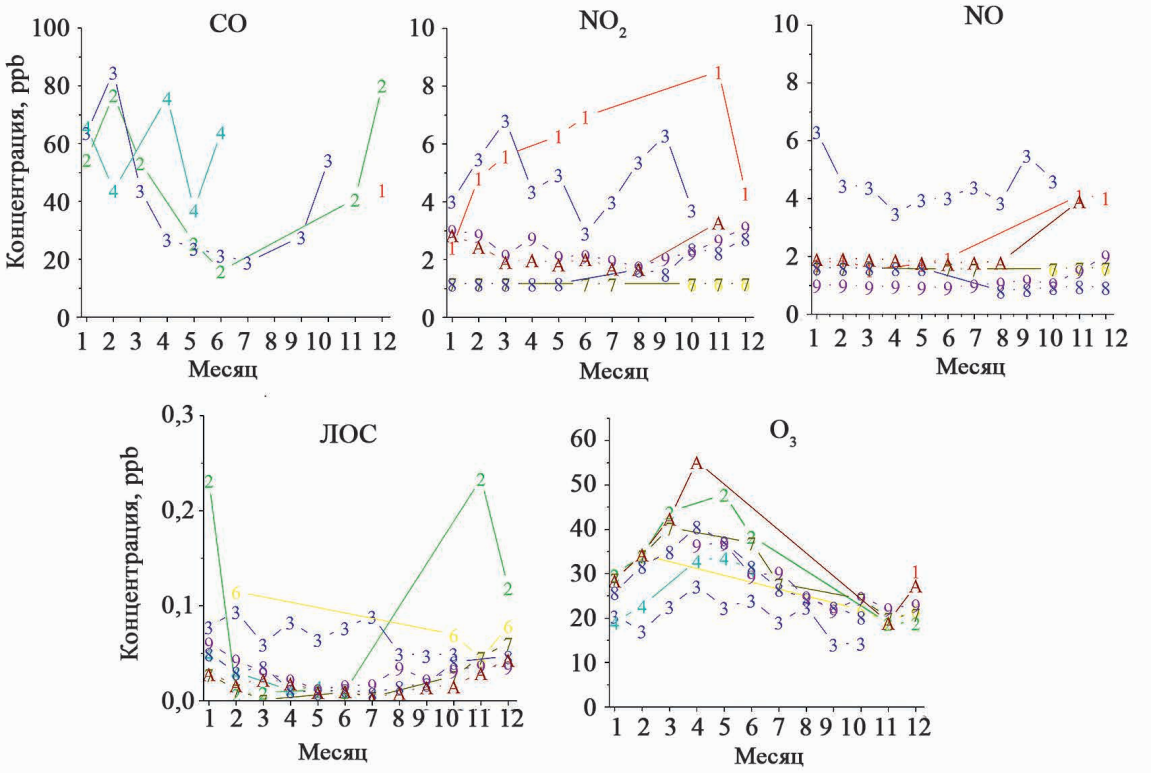

Рис. 2. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO_2) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O_3) в разные годы в Березинском биосферном заповеднике, пункт 01

Fig. 2. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2), nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC), and concentrations of ground-level ozone (O_3) in the Berezinsky Biosphere Reserve, site 01

Таблица 1

Соответствие между годом и обозначением кривых на рис. 2–8

Table 1

Correspondence between year and designation of curves in fig. 2–8

Год	Символ	Цвет
2012	0	Черный
2013	1	Красный
2014	2	Зеленый
2015	3	Синий
2016	4	Голубой
2017	5	Пурпурный
2018	6	Желтый
2019	7	Темно-желтый
2020	8	Темно-синий
2021	9	Фиолетовый
2022	A	Винный

В Бресте (рис. 3) концентрации антропогенных загрязнений существенно выше, чем в заповеднике. Среднемесячные концентрации оксида углерода не сильно меняются от года к году (2015 г. несколько выпадает из общей картины). Заметно некоторое снижение концентраций диоксида азота и летучих органических соединений в последние два года. Среднемесячные концентрации приземного озона слабо меняются с годами.

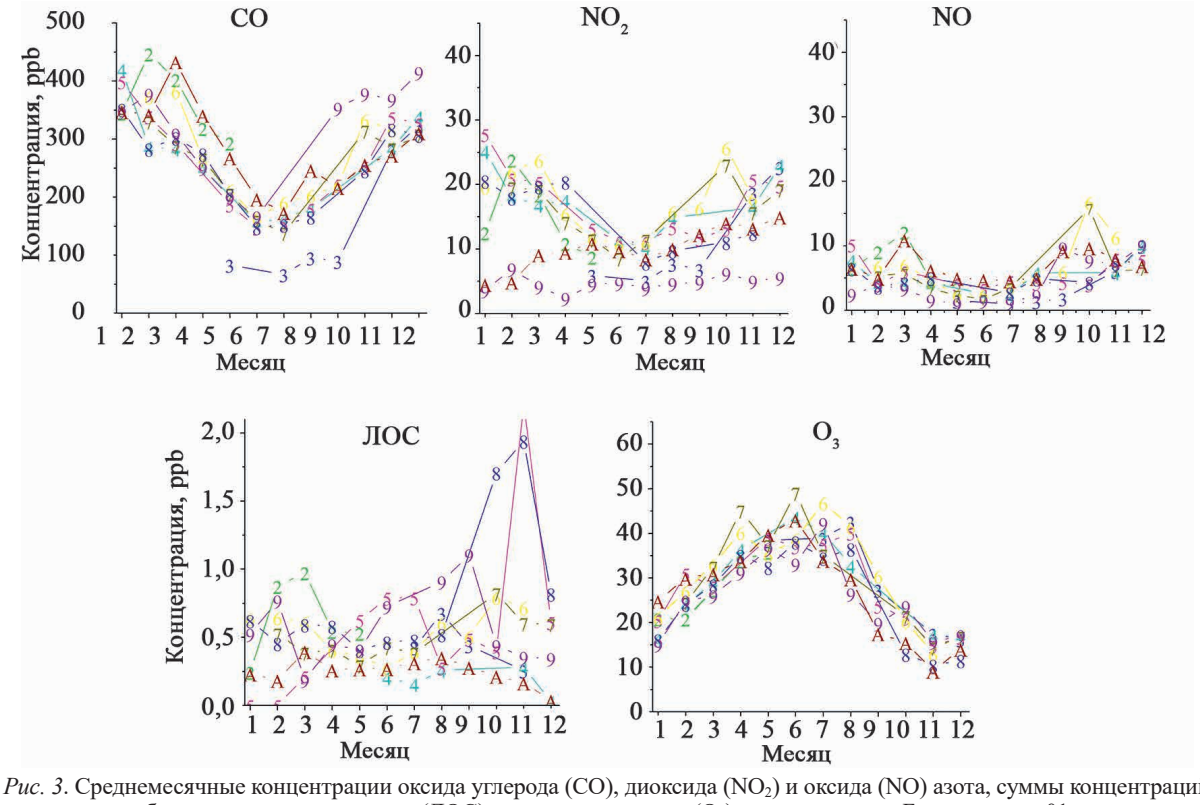

Рис. 3. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO_2) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O_3) в разные годы в Бресте, пункт 01

Fig. 3. Average monthly concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O_3) in different years in Brest, site 01

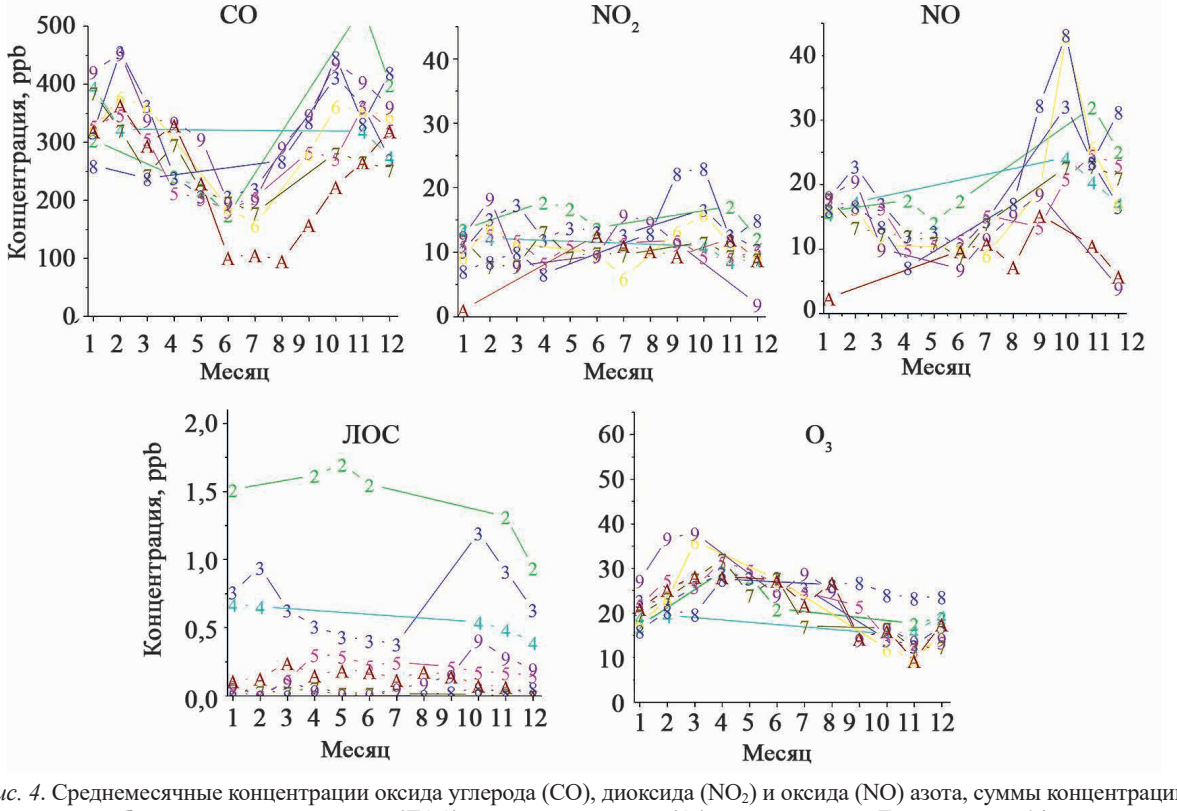

Рис. 4. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO_2) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O_3) в разные годы в Гомеле, пункт 14

Fig. 4. Average monthly concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O_3) in different years in Gomel, site 14

В Гомеле (рис. 4) в последние годы почти не выражен сезонный ход концентрации оксида азота и ЛОС (отсутствует летнее снижение), четко заметно снижение концентрации ЛОС с годами. Концентрации озона низки по сравнению с другими городами, и практически отсутствует весенне-летний максимум. Скорее всего, эти особенности обусловлены специфическими метеорологическими условиями в Гомельской обл. В качестве примера можно указать на повысившуюся частоту пыльных бурь в последние годы.

Среднемесячные концентрации антропогенных загрязнений в Гродно в разные годы приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание заметное увеличение концентрации оксида углерода во второй половине 2021 г. и первой половине 2022 г., а также сильные флуктуации концентрации ЛОС в 2022 г. на фоне тенденции ее снижения с годами. Среднемесячные концентрации приземного озона в разные годы в основном слабо отличаются друг от друга.

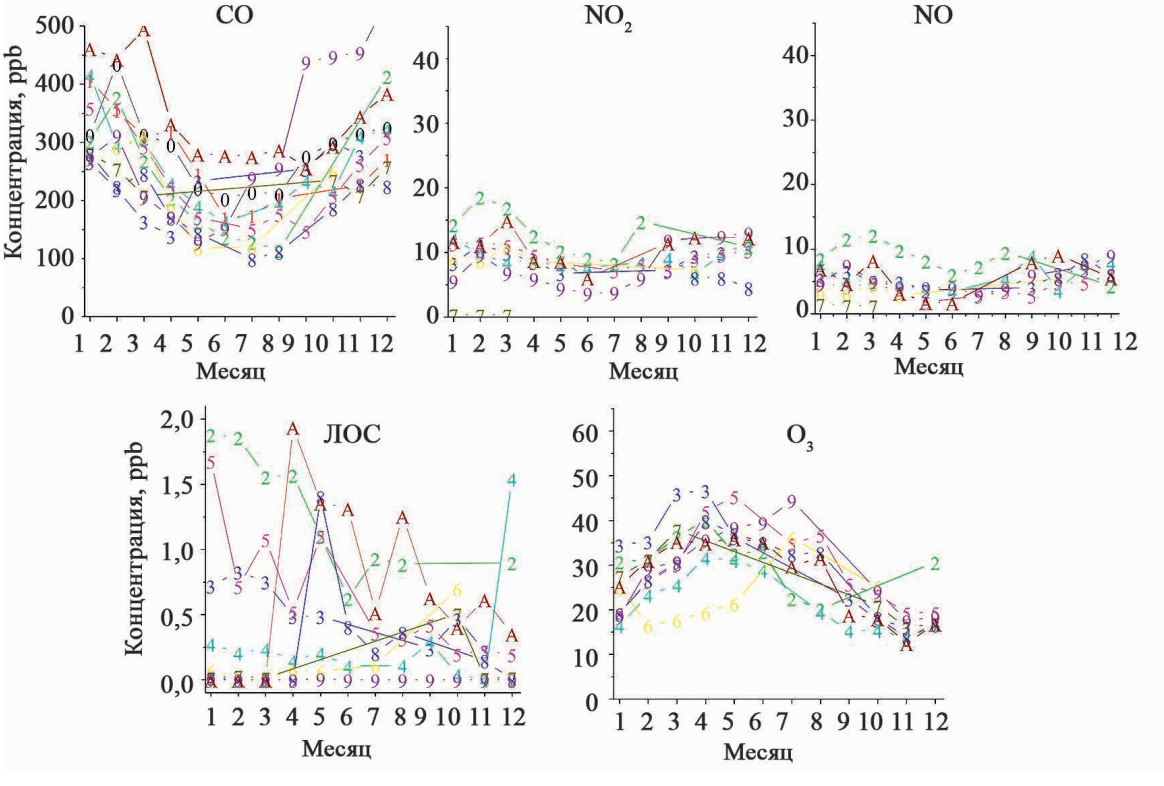

Рис. 5. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO_2) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O_3) в разные годы в Гродно, пункт 07

Fig. 5. Average monthly concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O_3) in different years in Grodno, site 07

В Могилеве на пункте 04 (рис. 6) заметно снижение концентраций всех загрязнений с годами за исключением оксида углерода: его концентрации незначительно изменяются от года к году. То же самое можно сказать и о концентрациях приземного озона за исключением 2013 г. Есть основания предполагать, что данные по озону за этот год не соответствуют действительности: во-первых, они резко отличаются от слабо меняющихся среднемесячных в другие годы, а во-вторых, они намного превышают значения 2013 г. в «чистом» районе города. Пункт 04 расположен в промышленном районе города, и там концентрации антропогенных загрязнений обычно выше, а приземного озона – ниже, чем на пункте 06, находящемся в «спальном» районе Могилева (рис. 6, 7).

Также не понятны причины «странного поведения» оксида углерода на пункте 06, концентрации которого в 2019 и 2020 г. выросли по сравнению с 2012, 2013 гг., а затем начали резко снижаться. Существенные изменения в концентрациях CO с годами на пункте 04 в промышленном районе можно было бы объяснить, сославшись на преобразования в производстве, однако для пункта в «спальном районе» они действительно выглядят странно.

В последние годы концентрации оксидов азота и летучих органических соединений на обоих пунктах наблюдений снизились и слабо меняются с годами. Концентрации приземного озона на пункте 06 заметно выше, чем на пункте 04, что является следствием меньшего уровня антропогенного загрязнения воздуха в этом районе.

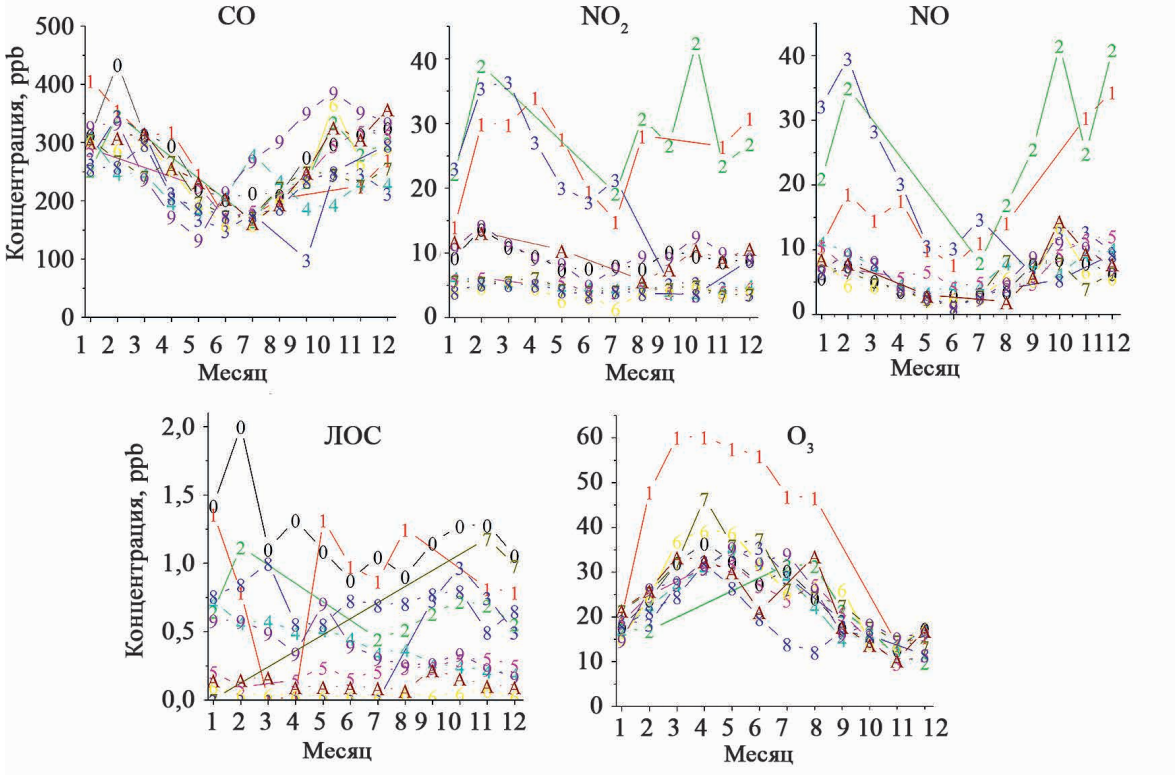

Рис. 6. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO_2) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O_3) в разные годы в Могилеве, пункт 04

Fig. 6. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O_3) in different years in Mogilev, site 04

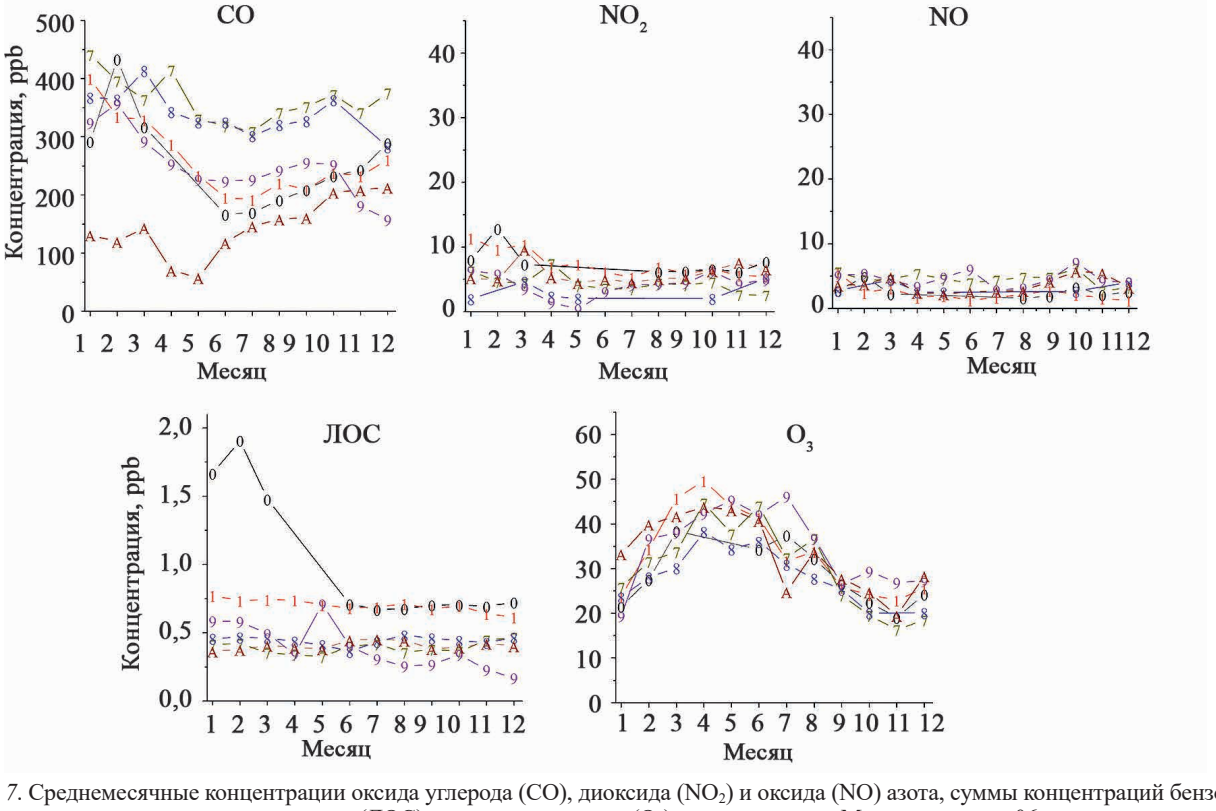

Рис. 7. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO_2) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O_3) в разные годы в Могилеве, пункт 06

Fig. 7. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O_3) in different years in Mogilev, site 06

В Витебске среднемесячные значения (рис. 8) определены для небольшого числа лет наблюдений, однако охватывают почти весь период 2012–2022 гг. Концентрации оксида углерода в течение этого периода слабо менялись. Наблюдается более существенный разброс в среднемесячных значениях за разные годы концентраций оксидов азота, и заметно снижение в последние годы концентраций ЛОС. Также заметно снизились концентрации приземного озона в последние годы.

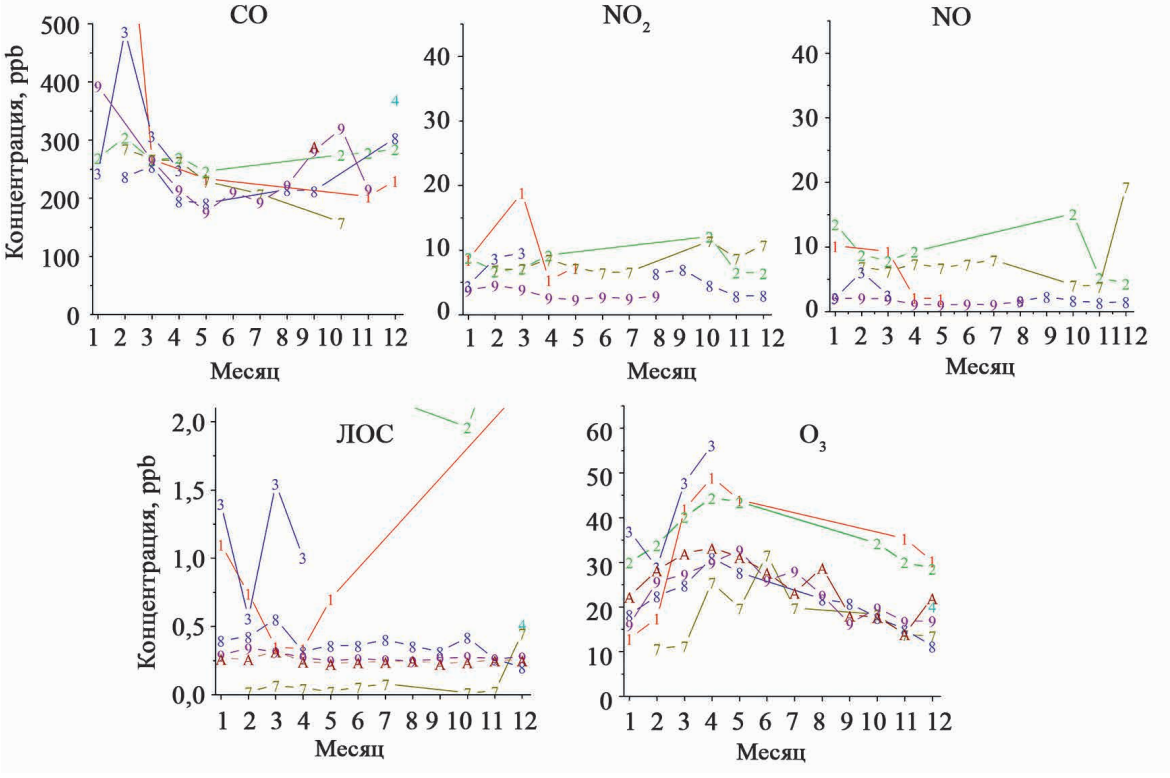

Рис. 8. Среднемесячные концентрации оксида углерода (CO), диоксида (NO_2) и оксида (NO) азота, суммы концентраций бензола, толуола и ксилола (ЛОС) и приземного озона (O_3) в разные годы в Витебске, пункт 03

Fig. 8. Monthly average concentrations of carbon monoxide (CO), nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen oxide (NO), the sum of concentrations of benzene, toluene and xylene (VOC) and concentrations of ground-level ozone (O_3) in different years in Vitebsk, site 03

В Минске функционируют 5 автоматических пунктов наблюдений за качеством воздуха, однако количество данных наблюдений мало, и поэтому рисунки со среднемесячными значениями за отдельные годы не приводятся. Больше всего наблюдений проведено на пункте 11, по которым можно судить о заметном снижении загрязнения воздуха оксидами углерода и азота за обсуждаемый период. О концентрациях летучих органических соединений такое сказать нельзя из-за ограниченного объема данных.

Многолетние средние месячных концентраций загрязнений. Полученные среднемесячные значения использованы для расчета многолетних средних для данного месяца и пункта наблюдений. В табл. 2 представлено количество лет, на основании которых было определено многолетнее среднее месячное значение концентрации каждого загрязнения воздуха на каждом пункте наблюдений. В колонках, относящихся к отдельным загрязнениям, последовательно указаны количества лет, за которые удалось рассчитать многолетние средние их концентраций для каждого месяца года на конкретном пункте наблюдений. Можно заметить, что на некоторых пунктах наблюдений количество лет, использованных для расчета среднего, весьма невелико. Иногда встречаются и нулевые значения. А самые полные данные получены на пункте 04 г. Могилева.

На рис. 9, 10 приводятся многолетние средние месячные значения концентраций для городов, в которых имеются несколько пунктов наблюдений. Значения получены посредством усреднения месячных данных с разных пунктов наблюдений города и представляют усредненные характеристики загрязнения городского воздуха.

Из рис. 9 следует, что наиболее высокий уровень загрязнения воздуха оксидом углерода в Минске фиксируется на пунктах 04 (бывший Радиаторный завод) и 16 (Уручье), оксидами азота – на пунктах 04 и 11 (Курасовщина), а летучими органическими соединениями – на пунктах 11 и 13 (Дражня). Самые высокие концентрации приземного озона определяются на пункте 01 (Обсерватория), самом чистом в отношении почти всех исследуемых антропогенных загрязнений. Это еще раз подтверждает сказанное ранее о том, что специфика и уровень антропогенного загрязнения воздуха в городах Беларуси не способствуют генерации повышенных концентраций озона, а подавляют ее.

Таблица 2

Количество лет наблюдений, использованных для расчета многолетних средних месячных концентраций загрязнений воздуха на пунктах наблюдений (последовательно по месяцам года)

Table 2

Number of years of observations used to calculate long-term average monthly air pollution concentrations at observation sites (successively by months of the year)

Город, пункт	CO	NO_2, NO	ЛОС	O_3
Заповедник 01	3,3,2,2,3,3,1,0,1,1,1,2	6,6,6,4,5,5,4,4,3,5,6,5	7,8,6,5,6,7,5,4,4,6,5,7	6,7,5,5,5,6,4,3,3,5,5,6
Брест 01	7,8,8,7,8,7,7,6,5,6,8,7	7,8,8,7,7,6,8,7,5,6,8,6	6,7,7,6,7,7,7,7,5,6,8,6	7,8,8,7,8,7,8,7,5,6,8,7
Гомель 14	9,7,7,6,6,7,6,3,5,7,9,9	9,7,6,5,4,7,6,3,5,6,8,9	9,8,7,7,6,7,6,3,5,8,9,9	9,8,7,6,4,7,5,3,4,8,9,9
Гродно 07	9,9,9,8,8,4,6,6,5,8,7,7	8,8,8,7,6,5,3,4,5,6,5,6	9,9,9,8,8,5,6,6,5,7,7,7	9,9,9,8,8,5,6,5,4,8,7,7
Могилев 04	11,10,9,9,10,10,11,10, 10,10,10,11	11,11,8,9,10,9,10,10,9, 10,10,11	11,10,8,9,9,9,10,9,9,9,11,11	11,11,9,10,10,10,10,10,10, 10,10,11
Могилев 06	6,6,6,5,5,6,6,6,6,6,5,6	6,5,6,5,5,4,4,5,5,6,5,6	6,6,6,5,5,6,6,6,6,6,6,6	6,6,6,5,5,6,6,6,6,6,5,6
Витебск 03	4,5,6,5,5,1,2,2,3,3,3,4	4,4,5,4,3,2,2,2,1,3,3,3	6,7,7,7,6,4,4,3,3,5,5,7	6,7,7,7,6,3,3,3,3,4,5,6
Минск 01	3,2,3,1,1,0,1,2,2,2,2,1	1,1,1,1,2,1,1,2,1,1,0,1	3,3,3,2,2,1,1,2,1,2,2,2	5,5,4,3,3,2,2,2,2,4,3,4
Минск 04	1,2,3,4,5,1,1,1,2,2,2,2	1,2,2,1,1,1,1,2,1,1,1,1	1,4,4,3,4,2,2,3,2,2,2,3	4,6,7,5,6,3,3,4,3,4,5,4
Минск 11	6,5,5,5,5,4,5,4,4,6,6,6	5,5,5,5,5,4,5,2,2,5,4,5	3,4,3,3,3,2,3,2,2,3,2,2	6,6,6,5,5,5,5,4,4,6,6,6
Минск 13	3,3,4,3,4,1,2,3,3,2,1,2	1,0,1,2,3,1,1,2,1,0,0,1	4,2,2,3,4,2,2,4,2,2,1,3	6,5,5,3,6,4,4,6,5,5,4,5
Минск 16	3,3,3,2,2,3,2,3,2,4,4,4	2,2,2,2,2,2,2,2,2,4,4,4	3,3,3,2,2,1,1,1,2,3,3,4	0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0

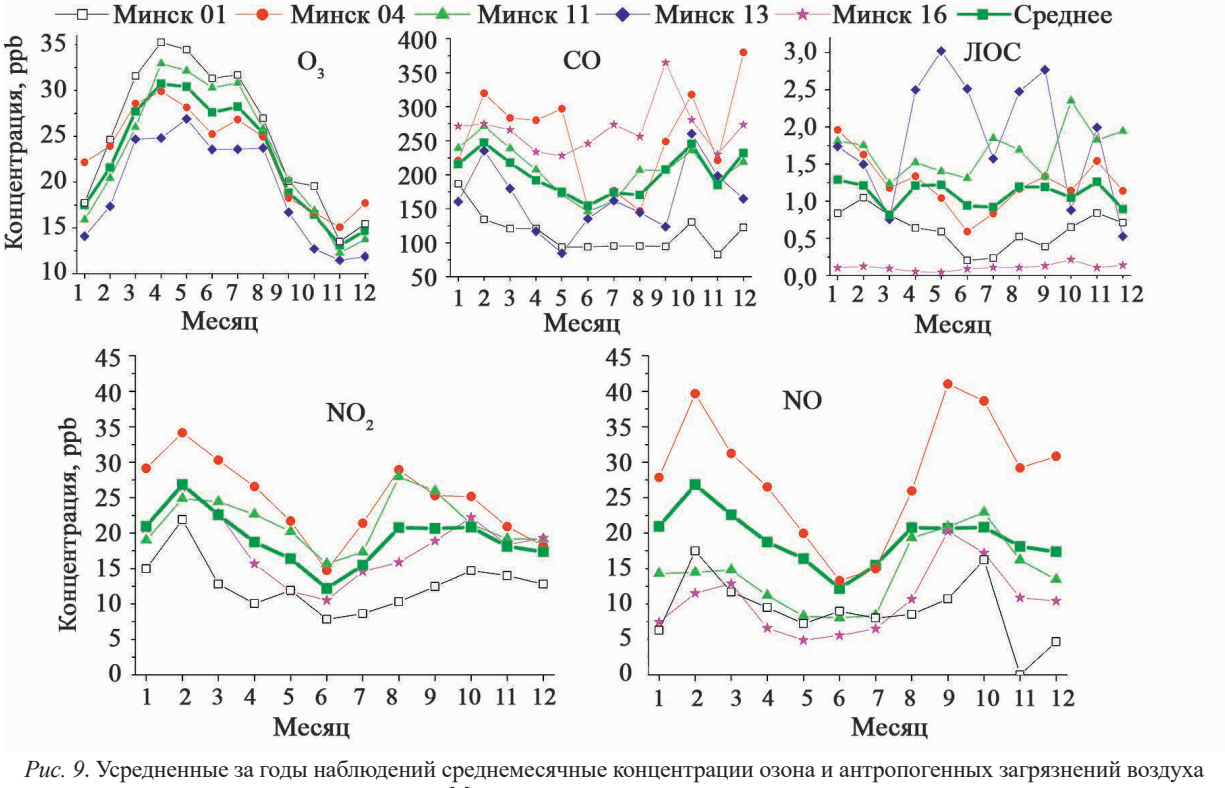

Рис. 9. Усредненные за годы наблюдений среднемесячные концентрации озона и антропогенных загрязнений воздуха на разных пунктах в г. Минске, а также результат усреднения по всем пунктам

Fig. 9. Monthly average concentrations of ozone and anthropogenic air pollution averaged over the years of observations at different sites in Minsk, as well as the result of averaging over all sites

Аналогичные результаты представлены и на рис. 10 для г. Могилева. В городе имеются 2 пункта наблюдений: один (04) расположен в промышленном районе, второй (06) – в «спальном». Среднемесячные концентрации CO и летучих органических соединений не сильно различаются, хотя более высокие концентрации оксида углерода зарегистрированы на «чистом» пункте. Концентрации оксидов азота в спальном районе оказываются значительно ниже, чем в промышленном. А концентрации приземного озона заметно выше.

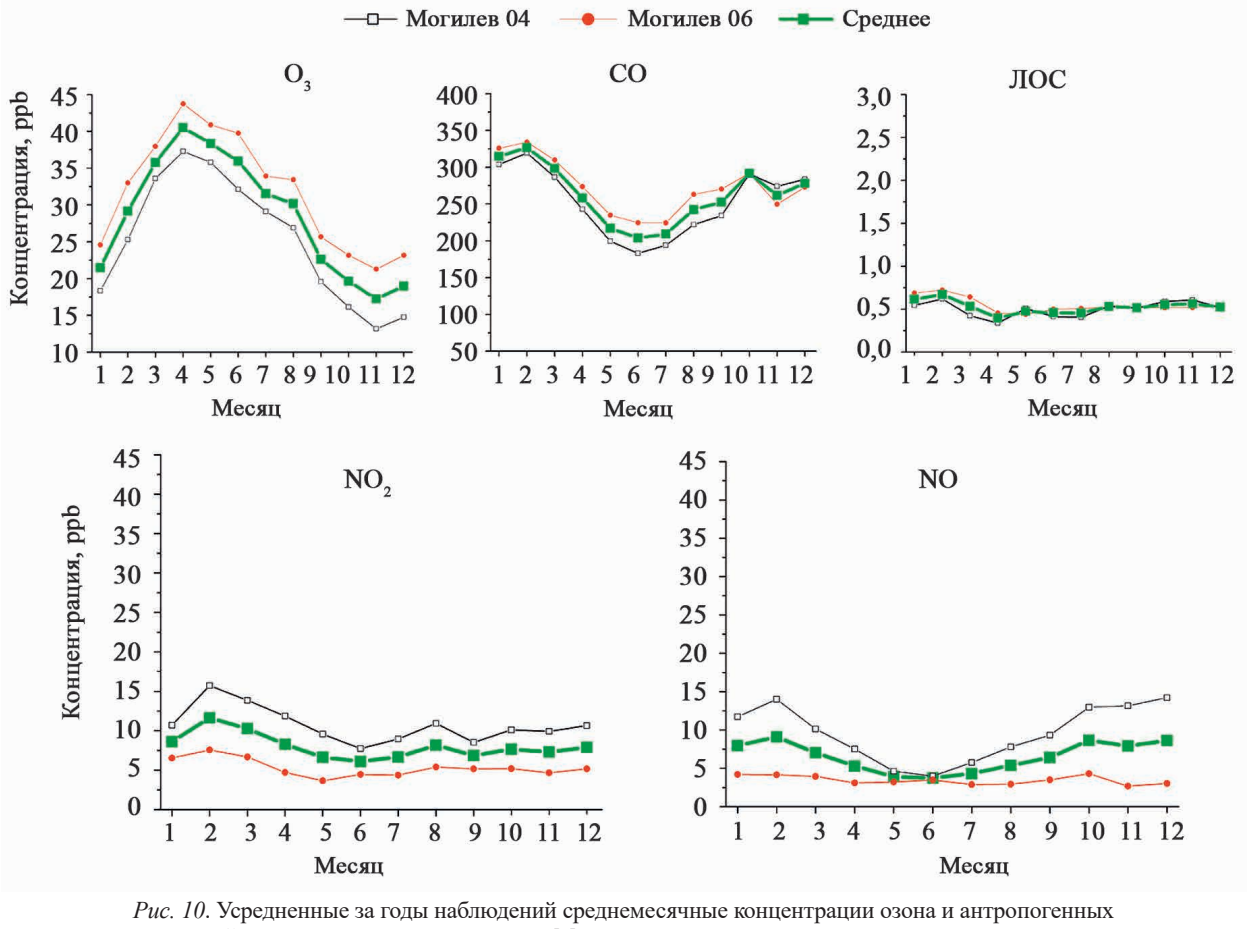

Рис. 10. Усредненные за годы наблюдений среднемесячные концентрации озона и антропогенных загрязнений воздуха на разных пунктах в г. Могилеве, а также результат усреднения по всем пунктам

Fig. 10. Monthly average concentrations of ozone and anthropogenic air pollution averaged over the years of observations at different sites in the city of Mogilev, as well as the result of averaging over all sites

На рис. 11 представлен осредненный за время наблюдений сезонный ход концентраций рассматриваемых антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси и Березинском биосферном заповеднике. Осреднение проведено также и по пунктам наблюдений, если их в городе больше одного. Как и следовало ожидать, самый чистый воздух – в Березинском биосферном заповеднике. Однако можно заметить, что в Бресте, Могилеве и Гродно концентрации приземного озона в весенне-летний период оказываются выше, чем в заповеднике, несмотря на существенно более высокие концентрации антропогенных загрязнений в городах по сравнению с заповедником. Объяснение следует искать в различии метеоусловий и трансграничном переносе загрязнений и озона.

Концентрации оксида углерода слабо различаются в отдельных городах, наиболее высокие – в Гомеле, наиболее низкие – в Минске. Что касается летучих органических соединений, то здесь все наоборот: самые высокие – в Минске, самые низкие – в Гомеле. А по уровню загрязнения оксидами азота оба названных города являются лидерами среди областных центров республики.

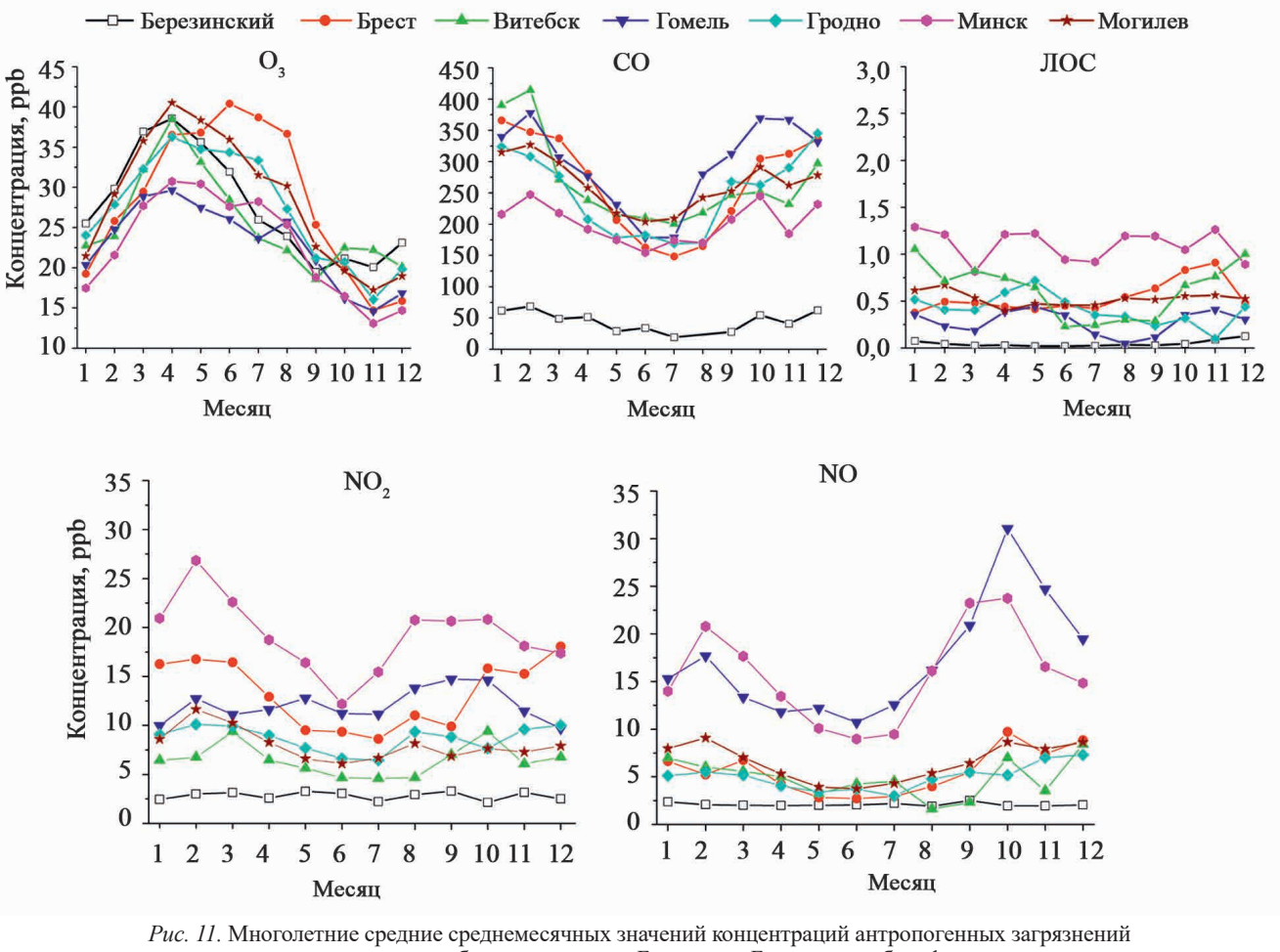

Рис. 11. Многолетние средние среднемесячных значений концентраций антропогенных загрязнений воздуха и приземного озона в областных городах Беларуси и Березинском биосферном заповеднике

Fig. 11. Long-term averages of average monthly values of concentrations of anthropogenic air pollution and ground-level ozone in the regional cities of Belarus and the Berezinsky Biosphere Reserve

Заключение

Основным недостатком проведенного анализа следует считать неполноту данных наблюдений о загрязнении воздуха (табл. 2). Это обусловлено нехваткой измерительных приборов, проблемами их калибровки, слабыми связями с международными институтами и программами, осуществляющими сбор и анализ данных мониторинга качества воздуха, регламентирующими вопросы аппаратурного обеспечения мониторинга и аттестации приборов.

Общие выводы могут быть сделаны в отношении сезонного хода концентраций загрязнений: почти все из них максимальны в феврале, затем падают к лету и растут в осенний период до следующего февраля. Только с ЛОС четкой повторяющейся сезонной зависимости во всех пунктах наблюдений не выявлено. Общее снижение концентраций загрязнений в летнее время объясняется уменьшением вертикальной устойчивости атмосферы, интенсификацией ее вертикального перемешивания и разбавлением концентраций загрязнений в приземном слое воздуха.

Выявленное снижение в последние годы концентраций антропогенных загрязнений в городах также требует более детального анализа для выяснения его причин. Две возможные причины – уменьшение выбросов промышленными предприятиями и постоянно меняющийся климат, приводящий к интенсификации очищения городского воздуха.

Объяснению особенностей загрязнения воздуха в отдельных городах может помочь анализ информации об источниках загрязнений и их интенсивности. Если основной вклад в выбросы оксида углерода и оксидов азота вносит транспорт, то с летучими органическими соединениями ситуация более сложная, поскольку их мощными источниками могут быть и отдельные промышленные предприятия.

Альтернативный вариант заключается в разработке методики приведения результатов наблюдений за загрязнениями воздуха к одинаковым метеорологическим условиям. В таком случае их можно

непосредственно сравнивать для разных городов, отвлекаясь от возможных различий в метеорологических условиях. Это весьма перспективный подход, открывающий широкие возможности анализа экологической обстановки в городах Беларуси и выработки рекомендаций по ее улучшению. В этом направлении в ННИЦ МО в последние годы ведутся интенсивные исследования. В частности, построено уравнение регрессии, определяющее зависимость концентрации приземного озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений [11; 14]. Уравнение позволяет объяснить более 60 % изменчивости озона. С его помощью была определена климатическая норма приземного озона в «условно чистой» от антропогенных загрязнений воздуха атмосфере на основании наблюдений в «грязных» городах [14; 15]. Безусловно, построенное уравнение требует улучшения. Однако такой подход по нивелированию влияния меняющихся метеоусловий на концентрации антропогенных загрязнений воздуха весьма перспективен и позволит объективно оценивать влияние источников загрязнения воздуха без скрупулезного мониторинга их производительности.

Библиографические ссылки

1. Sillman S. Tropospheric Ozone and Photochemical Smog. *Treatise on Geochemistry*; 2003;9:407–431.
2. Air quality and pollution city ranking (AQI) – IQAir [Internet, cited 2022 June 14]. Available from: https://www.iqair.com › world-air-quality-ranking.
3. Смог в Польше [Интернет, процитировано 14 июня 2022]. URL: https://tsn.ua/ru/blogi/themes/world/cmog-v-polshe-1491591.html.
4. Precursors and Indirect Emissions. In: Eggleston HS, et al, editors. IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Hayama (Japan): Institute for Global Environmental Strategies (IGES); 2008.16 p.
5. Liudchik A, Pakatashkin V, Umreika S, Girgzdiene R. Role of Ozone Deposition in Occurrence of the Spring Maximum. *Atmosphere-Ocean.* 2013;53(1):42–49.
6. Zvyagintsev AM, Kuznetsova IN, Shalygina IY., Brusova NE, Arkhangelskaya AA, Lapchenko VA, Tereb NV, Lezina EA. Causes and factors of positive surface ozone anomalies in the Moscow region and on the southeastern coast of the Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2016; 29(6):551–560. https://doi.org/10.1134/S1024856016060178.
7. Божкова ВВ, Бурак РН, Козерук ББ, Людчик АМ, Мельник ЕА. Антропогенное загрязнение воздуха и приземный озон в городах Беларуси. *Природные ресурсы.* 2018;1:92–101.
8. Bozhkova VV, Liudchik AM, Umreika SD. Influence of meteorological conditions on urban air pollution. *Acta Geographica Silesiana.* 2020;14(4):5–21.
9. Brönnimann ST, Neu U. Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment.* 1997;31(8):1127–1135.
10. Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН. Антропогенное загрязнение воздуха оксидом углерода и оксидами азота в городах Беларуси. В: *Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века. Часть 2.* Минск: ИВЦ Минфина; 2022. с. 155–158.
11. Людчик АМ, Мельник ЕА, Павленко ПН, Сычевский АО. Антропогенное загрязнение воздуха бензолом, толуолом и ксилолом в городах Беларуси. В: *Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века. Часть 2.* Минск: ИВЦ Минфина; 2022. с. 145–148.
12. Болотько ЛМ, Людчик АМ, Покаташкин ВИ, Павленко ПН. Флуктуации поля концентрации приземного озона, обусловленные меняющимися метеоусловиями и степенью загрязнения воздуха. *Экологический вестник.* 2016;3:45–52.
13. Людчик АМ, Покаташкин ВИ, Болотько ЛМ, Бурак РН, Павленко ПН, Умрейко СД. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон. *Природные ресурсы.* 2015;1:95–105.
14. Божкова ВВ, Болотько ЛМ, Людчик АМ, Павленко ПН, Умрейко СД. Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси. *Природные ресурсы.* 2019;2:98–107.
15. Божкова ВВ, Людчик АМ, Мельник ЕА. Флуктуации поля приземного озона в Беларуси, обусловленные метеорологическими условиями и антропогенным загрязнением воздуха. *Природные ресурсы.* 2020;1:80–91.

References

1. Sillman S. Tropospheric Ozone and Photochemical Smog. *Treatise on Geochemistry*; 2003;9:407–431.
2. Air quality and pollution city ranking (AQI) – IQAir [Internet, cited 2022 June 14]. Available from: https://www.iqair.com › world-air-quality-ranking.
3. *Smog v Polshe* [Smog in Poland] [Internet, cited 2022 June 14]. Available from: https://tsn.ua/ru/blogi/themes/world/cmog-v-polshe-1491591.html. Russian.
4. Precursors and Indirect Emissions. In: Eggleston HS, et al, editors. IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. Hayama (Japan): Institute for Global Environmental Strategies (IGES); 2008.16 p.
5. Liudchik A, Pakatashkin V, Umreika S, Girgzdiene R. Role of Ozone Deposition in Occurrence of the Spring Maximum. *Atmosphere-Ocean.* 2013;53(1):42–49.
6. Zvyagintsev AM, Kuznetsova IN, Shalygina IY., Brusova NE, Arkhangelskaya AA, Lapchenko VA, Tereb NV, Lezina EA. Causes and factors of positive surface ozone anomalies in the Moscow region and on the southeastern coast of the Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2016; 29(6):551–560. https://doi.org/10.1134/S1024856016060178.
7. Bozhkova VV, Burak RN, Kozeruk BB, Lyudchik AM, Melnik EA. *Antropogennoye zagryazneniye vozdukha i prizemnyy ozon v gorodakh Belarusi* [Anthropogenic air pollution and ground-level ozone in the cities of Belarus]. *Prirodnyye resursy*. 2018;1:92–101. Russian.

8. Bozhkova VV, Liudchik AM, Umreika SD. Influence of meteorological conditions on urban air pollution. *Acta Geographica Silesiana.* 2020;14(4):5–21.

9. Brönnimann ST, Neu U. Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment.* 1997;31(8):1127–1135.

10. Liudchik AM, Melnik EA, Pavlenko PN. *Antropogennoe zagryaznenie vozduha oksidom ugleroda i oksidami azota v gorodah Belarusi* [Anthropogenic air pollution with carbon monoxide and nitrogen oxides in the cities of Belarus]. In: *Saharovskie chtenia 2022 goda: ekologicheskie problemy XXI veka. Chast 2.* Minsk: IVTs Minfina; 2022. p. 155–158. Russian.

11. Liudchik AM, Melnik EA, Pavlenko PN, Sychevskiy AO. *Antropogennoe zagryaznenie vozduha benzolom, toluolom i kcilolom v gorodah Belarusi* [Anthropogenic air pollution with benzene, toluene and xylene in the cities of Belarus]. In: *Saharovskie chtenia 2022 goda: ekologicheskie problemy XXI veka. Chast 2.* Minsk: IVTs Minfina; 2022. p. 145–148. Russian.

12. Bolotsko LM, Liudchik AM, Pokatashkin VI, Pavlenko PN. *Fluctuacii polya koncentracii prizemnogo ozona, obuslovlennye menyaschemisya meteouslovyami i stepeniu zagryaznenia vozduha* [Fluctuations in the ground-level ozone concentration field due to changing weather conditions and the degree of air pollution]. *Ekologicheski vestnik.* 2016;3:45–52. Russian.

13. Liudchik AM, Pokatashkin VI, Bolotsko LM, Burak RN, Pavlenko PN, Umreika SD. *Statisticheskaya ocenka antropogennovo vozdeistvia na prizemny ozon* [Statistical assessment of anthropogenic impact on ground-level ozone]. *Prirodnye resursy.* 2015;1:95–105. Russian.

14. Bozhkova VV, Bolotsko LM, Lyudchik AM, Pavlenko PN, Umreika SD. *Klimaticheskaya norma prizemnogo ozona v chistoi atmosphere Belarusi* [Climatic norm of ground-level ozone in the clean atmosphere of Belarus]. *Prirodnye resursy.* 2019;2:98–107. Russian.

15. Bozhkova VV, Liudchik AM, Melnik EA. *Fluctuacii polia prizemnogo ozona v Belarusi, obuslovlennye meteorologicheskimi usloviami i antropogennym zagriaznennem vozduha* [Fluctuations in the ground-level ozone field in Belarus due to meteorological conditions and anthropogenic air pollution]. *Prirodnye resursy.* 2020;1:80–91. Russian.

Статья поступила в редколлегию 05.07.2023.
Received by editorial board 05.07.2023.