

**А. Н. Акимов<sup>1</sup>, Р. Н. Бурак<sup>2</sup>, А. М. Людчик<sup>1</sup>, Е. А. Мельник<sup>2</sup>, П. Н. Павленко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы  
Белорусского государственного университета,  
Минск, Беларусь, e-mail: 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@hmc.by*

<sup>3</sup>*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь, e-mail: pavlenko\_pn@mail.ru*

## МЕЖГОДОВЫЕ ФЛУКТУАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В БЕЛАРУСИ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

**Аннотация.** Анализируются особенности в поведении приземного озона на территории Беларуси в январе 2021 и 2022 г. В 2022 г. зарегистрированы заметно более высокие концентрации озона на всех пунктах наблюдений по сравнению с 2021 г. Показано, что обсуждаемые различия не связаны с изменениями в уровне антропогенного загрязнения воздуха. Они обусловлены различием в метеорологических условиях в названные периоды. Определение причин таких различий важно для понимания особенностей климатологии приземного озона в Беларуси и выработки достоверного прогноза его поведения в будущем. Ранее было построено уравнение регрессии для описания поведения приземного озона на территории Беларуси, основной целью которого являлось объяснить высокие наблюдаемые концентрации в весенне-летний период. Коэффициенты уравнения определялись с учетом также и зимнего периода, однако при этом не учитывались важные для этого периода дополнительные объясняющие переменные. Обсуждается способность полученного уравнения адекватно воспроизвести результаты наблюдений в зимний период.

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

**A. N. Akimov<sup>1</sup>, R. N. Burak<sup>2</sup>, A. M. Liudchik<sup>1</sup>, E. A. Melnik<sup>2</sup>, P. N. Paulenka<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*National Ozone Monitoring Research Centre of the Belarusian State University,  
Minsk, Belarus, e-mail: liudchikam@tut.by*

<sup>2</sup>*Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring,  
Minsk, Belarus, e-mail: orap4@pogoda.by, kbb@hmc.by*

<sup>3</sup>*Belarusian National Technical University,  
Minsk, Belarus, e-mail: pavlenko\_pn@mail.ru*

## INTERANNUAL FLUCTUATIONS OF GROUND-LEVEL OZONE IN BELARUS IN THE WINTER PERIOD

**Abstract.** The features in the behavior of ground-level ozone on the territory of Belarus in January 2021 and 2022 are analyzed. In 2022, noticeably higher ozone concentrations were recorded at all observation points compared to 2021. It was shown that the discussed differences are not associated with changes in the level of anthropogenic air pollution. They are caused by differences in meteorological conditions during these periods. Determining the reasons for such differences is important for understanding the specifics of the climatology of ground-level ozone in Belarus and developing a reliable forecast of its behavior in the future. Previously, a regression equation was introduced to describe the behavior of ground-level ozone in Belarus, the main purpose of which was to explain the high observed concentrations in the spring-summer period. The coefficients of the equation were also determined taking into account the winter period. However, additional explanatory variables important for this period were not taken into account. The ability of this equation to adequately reproduce the results of observations in the winter period is discussed.

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

**А. М. Акімаў<sup>1</sup>, Р. М. Бурак<sup>2</sup>, А. М. Людчык<sup>1</sup>, Е. А. Мельнік<sup>2</sup>, П. М. Паўленка<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Нацыянальны навукова-даследчы цэнтр маніторынгу азонасферы  
Беларускага дзяржаўнага ўніверсітэта,  
Мінск, Беларусь, e-mail: liudchikam@tut.by*

<sup>2</sup>*Рэспубліканскі цэнтр па гідраметэаралогіі, кантролю радыяактыўнага забруджвання і маніторынгу  
навакольнага асяроддзя, Мінск, Беларусь,  
e-mail: orap4@pogoda.by, kbb@hmc.by*

<sup>3</sup>*Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь,  
e-mail: pavlenko\_pn@mail.ru*

## МІЖГАДОВЫЯ ФЛУКТУАЦЫІ ПРЫЗЕМНАГА АЗОНУ Ў БЕЛАРУСІ Ў ЗІМОВЫ ПЕРЫЯД

**Анотацыя.** Аналізуюцца асаблівасці ў паводзінах прыземнага азону на тэрыторыі Беларусі ў студзені 2021 і 2022 г. У 2022 г. зарэгістраваны прыкметна больш высокія канцэнтрацыі азону на ўсіх пунктах назіранняў у параўнанні з 2021 г. Паказана, што адрозненні, якія абмяркоўваюцца, не звязаныя са зменамі ва ўзроўні антрапагеннага забруджвання

паветра. Яны абумоўлены адрозненнем у метэаралагічных умовах у названыя перыяды. Вызначэнне прычын такіх адрозненняў важна для разумення асаблівасцей кліматалогіі прыземнага азону ў Беларусі і выпрацоўкі дакладнага прагнозу яго паводзін у будучым. Раней было пабудавана ўраўненне рэгрэсіі для апісання паводзін прыземнага азону на тэрыторыі Беларусі, асноўнай мэтай якога з'яўлялася растлумачыць назіраемыя высокія канцэнтрацыі ў вясенне-летні перыяд. Каэфіцыенты ўраўнення вызначаліся з улікам таксама і зімовага перыяду, аднак пры гэтым не ўлічваліся важныя для гэтага перыяду дадатковыя тлумачальныя пераменныя. Абмяркоўваецца здольнасць атрыманага ўраўнення адекватна перадаць вынікі назіранняў у зімовы перыяд.

**Ключавыя словы:** прыземны азон, антрапагеннае забруджванне паветра, метэаралагічныя ўмовы, ураўненне рэгрэсіі

**Введение.** Приземный озон – вторичный загрязнитель атмосферы, поскольку его повышенные концентрации образуются при наличии в воздухе других поллютантов естественного и антропогенного происхождения [1, 2]. Учитывая, что озон является загрязнителем первого класса опасности, оказывающим угнетающее влияние на живые организмы, исследования его поведения в условиях растущего антропогенного загрязнения воздуха и меняющегося климата становятся актуальными.

Цель работы – объяснить причины повышения концентрации приземного озона в городах Беларуси в январе 2022 г. по сравнению с январем 2021 г. (рис. 1, а, б). Убедительность объяснения может служить критерием правильности понимания климатологии приземного озона на территории Беларуси, его взаимодействия с антропогенными загрязнителями атмосферы и роли метеорологических условий в формировании наблюдаемой концентрации озона, а также критерием достоверности прогноза поведения приземного озона в будущем в зависимости от экологической обстановки и меняющегося климата.

**Появление и разрушение озона в приземном воздухе.** Основная масса озона образуется за счет фотолиза молекулярного кислорода солнечным излучением и находится в стратосфере. Именно это защищает все живое на Земле от губительного коротковолнового ультрафиолетового солнечного излучения, которое практически полностью поглощается на высотах стратосферы в процессах разрушения молекулярного кислорода на атомарный. Образовавшиеся атомы кислорода соединяются с его молекулами и образуется озон. Озон в свою очередь сильно поглощает солнечное излучение в более длинноволновой части ультрафиолетового диапазона. Совершенно другие механизмы приводят к появлению озона в приземном слое воздуха.

В результате стратосферно-тропосферного обмена часть озона из стратосферы попадает в тропосферу [3], вертикальное перемешивание которой вследствие прохождения атмосферных фронтов, термической конвекции и турбулентности способствует перемещению части стратосферного озона к поверхности земли.

Озон также может образовываться непосредственно в приземном воздухе в результате фотохимических реакций с участием малых газовых составляющих атмосферы [1, 2]. К ним в первую очередь относятся оксиды азота и летучие органические соединения антропогенного и естественного происхождения. В присутствии таких соединений и достигающего поверхности ультрафиолетового солнечного излучения происходят процессы генерации и разрушения озона в приземном слое воздуха. Существенным стоком озона является его осаждение на поверхность земли и растительность.

В условиях Беларуси, как правило, антропогенное загрязнение воздуха приводит к разрушению озона [4]. Поэтому концентрация приземного озона в сельской местности обычно выше, чем в городе. Результаты измерений концентрации приземного озона на двух пунктах контроля атмосферного воздуха в Могилеве (рис. 1), подтверждают сказанное. Пункт 04 находится в промышленном районе города, а пункт 06 – в спальном, характеризующимся меньшей степенью антропогенного загрязнения (данные об уровнях загрязнения оксидом углерода, оксидами азота и некоторыми летучими органическими соединениями приведены и обсуждаются ниже). Из рис. 1 видно, что концентрация приземного озона в «грязном» районе ниже по сравнению с «чистым». Следует обратить внимание также на то, что ночные концентрации озона в загрязненных районах обычно заметно ниже, чем в «чистых». Этому есть простое объяснение: в отсутствие солнечного излучения процессы генерации озона затормаживаются, а эффективность его разрушения увеличивается с ростом концентраций загрязнителей, взаимодействующих с ним.

Утверждение об уменьшении концентрации приземного озона в воздухе, содержащем антропогенные загрязнения, не всегда верно. Как показали наблюдения [1], загрязнение воздуха в ряде случаев приводит к интенсивной генерации озона. Для этого нужны определенные условия: в первую очередь высокие концентрации летучих органических соединений, высокая температура воздуха и интенсивное солнечное излучение. По всем названным параметрам Беларусь «отстает» от мест, где впервые были зарегистрированы опасные концентрации приземного озона – Лос-Анджелеса и Мехико [1]. Однако генерация озона возможна также и в присутствии летучих органических соединений естественного происхождения – терпенов и изопренов, продуктов производимых лесами [2].

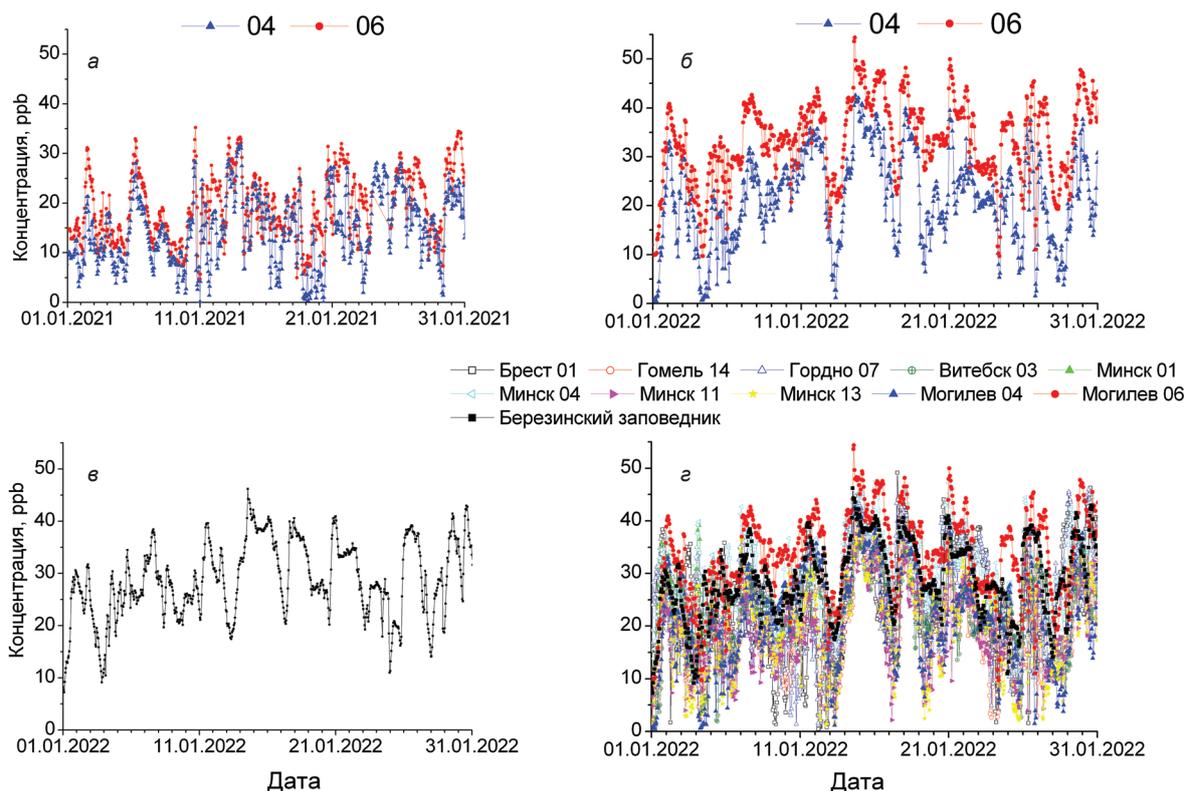


Рис. 1. Концентрации приземного озона, зарегистрированные на пунктах 04, 06 Могилева в январе 2021 г. (а) и январе 2022 г. (б), концентрации озона в Березинском биосферном заповеднике (в) и концентрации во всех областных городах Беларуси (г) (указаны номера пунктов наблюдений) в январе 2022 г.

Иногда по утрам на солнечных лесных полянах чувствуется сильный запах озона. Ощущение запаха озона означает, что его концентрация значительно превышает предельно допустимую. Но такие ситуации возникают крайне редко.

На приземный озон существенное влияние оказывают метеорологические условия. При этом важную роль играет место наблюдений. В частности, в городах, являющихся мощным источником антропогенного загрязнения воздуха, усиление ветра приводит к снижению концентраций загрязнений за счет их выдувания и в условиях Беларуси – к увеличению концентрации приземного озона. В сельской местности ветер может приносить загрязнения из городов и «городские» (пониженные) концентрации озона.

Вертикальное перемешивание атмосферы также влияет на приземный озон. В условиях слабой вертикальной устойчивости атмосферы происходит очищение приземного слоя воздуха от загрязнений и приток из вышележащих слоев атмосферы более чистого воздуха с более высокой концентрацией озона [3]. Температура воздуха сказывается на скорости химических реакций генерации и разрушения озона. Существенную роль в процессах с участием озона играет и влажность воздуха. В частности, во время дождей концентрация озона снижается [5]. И, наконец, озон может переноситься с воздушными массами, проходящими над исследуемым регионом. Следовательно, в общем случае концентрация приземного озона может зависеть от направления и скорости ветра в месте наблюдений и меняться при прохождении фронтов, разделяющих соседние воздушные массы [6].

В качестве примера влияния погоды на приземный озон на рис. 1, б и в приведены результаты наблюдений в январе 2022 г. в двух районах Могилева, различающихся уровнем загрязнения воздуха, и на большом расстоянии от Могилева – Березинском биосферном заповеднике, практически свободном от антропогенных загрязнений. Аналогичное сравнение для января 2021 г. провести не удастся из-за отсутствия данных о приземном озоне в заповеднике. Видно, что основные особенности поведения приземного озона воспроизводятся на обоих рисунках. Эти особенности, как показано на рис. 1, г, наблюдаются во всех областных городах Беларуси. Следовательно, их происхождение не связано с антропогенным загрязнением воздуха, специфичным для каждого города [7, 8], а обусловлено характерным для всей территории Беларуси изменением метеорологических условий. В следующем разделе приводятся дополнительные аргументы в пользу этого вывода.

**Влияние антропогенных загрязнений на приземный озон.** В результатах измерений, представленных на рис. 1, присутствует суточный ход концентрации приземного озона [9]. Во второй половине дня она обычно достигает максимума и падает ночью, когда тормозится вертикальное перемешивание атмосферы и прекращаются фотохимические реакции, приводящие к образованию озона, а реакции разрушения озона при взаимодействии с другими загрязнителями и осаждение его на поверхность продолжают работать. К тому же специфическими особенностями обладает также и суточный ход концентраций антропогенных загрязнений воздуха [9, 10]. Это затрудняет анализ, поэтому логично перейти к рассмотрению среднесуточных значений загрязнений и метеорологических параметров. Далее приводятся усредненные по суткам данные измерений. Следует заметить, что предварительно проведенный нами анализ с более высоким временным разрешением не противоречит представленным ниже выводам.

На рис. 2 показаны среднесуточные концентрации приземного озона в январе 2021 и 2022 гг. для двух пунктов наблюдений в Могилеве. Отмечены также особенности в поведении озона, причины которых авторам хотелось бы выяснить. Это минимумы среднесуточных значений 4, 13, 17 и 28 января и максимумы 11, 14 и 21 января 2022 г. Эти особенности отмечены также и на всех последующих рисунках. Как и в случае непосредственных измерений (рис. 1, а, б), видно увеличение среднесуточных концентраций приземного озона в январе 2022 г. по сравнению с январем 2021 г. Особенно это заметно для пункта 06 из «чистого» района, и оказывается менее значительным для пункта 04.

В Могилеве параллельно с измерениями концентрации озона в январе 2021 и 2022 гг. регистрировались также концентрации антропогенных загрязнений воздуха: оксида углерода, оксида и диоксида азота, бензола, толуола, ксилола. Ниже приводятся результаты этих измерений, которые позволяют обосновать исключение антропогенного фактора из списка возможных причин обсуждаемых особенностей в поведении приземного озона и повышения его концентрации в январе 2022 г. по сравнению с январем предыдущего года.

Данные наблюдений за оксидами азота (рис. 3) подтверждают более высокую загрязненность воздуха в районе пункта 04 по сравнению с пунктом 06 и не обнаруживают существенной разницы в уровнях загрязнения в январе 2021 и 2022 гг., кроме заметного выброса на пункте 04 19 января в 2021 г. Поэтому оксиды азота не могут быть причиной повышения концентрации озона в январе 2022 г.

В январе 2021 г. концентрация оксида углерода на пункте 04 была почти такой же, как и в 2022 г., а на пункте 06 заметно выше и практически совпадала с результатами измерений на «грязном» пункте 04 (рис. 4). Поскольку концентрации озона в январе 2022 г. повысились по сравнению с январем 2021 г. на обоих пунктах наблюдений, причиной такого повышения не могут быть отмеченные изменения в уровнях загрязнения воздуха оксидом углерода.

Наконец, на рис. 5 показаны концентрации бензола, толуола и ксилола в те же периоды времени. Что касается пункта 06, то существенных изменений между январями 2021 и 2022 гг. не произошло. Однако на пункте 04 в январе 2021 г. концентрации летучих органических соединений были значительно выше, чем в январе 2022 г. Поэтому с учетом отрицательного коэффициента корреляции летучих органических соединений с озоном [9] следовало бы ожидать увеличения концентрации приземного озона в 2022 г. только в районе пункта 04, но не на обоих пунктах сразу (рис. 1, 2). Такого

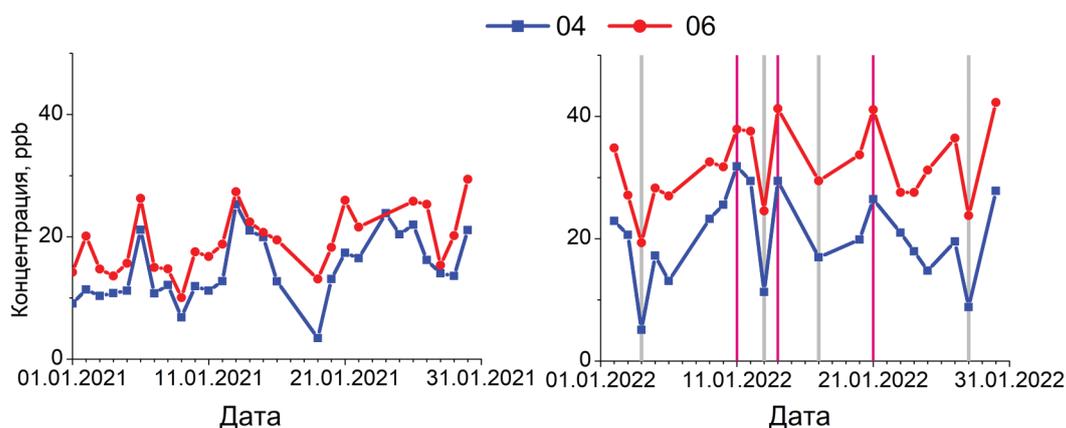


Рис. 2. Среднесуточные концентрации приземного озона на пунктах 04 и 06 Могилева, зарегистрированные в январе 2021 и 2022 гг. Вертикальными линиями отмечены события, обсуждаемые далее. Серый цвет – понижение, розовый – повышение среднесуточной концентрации озона

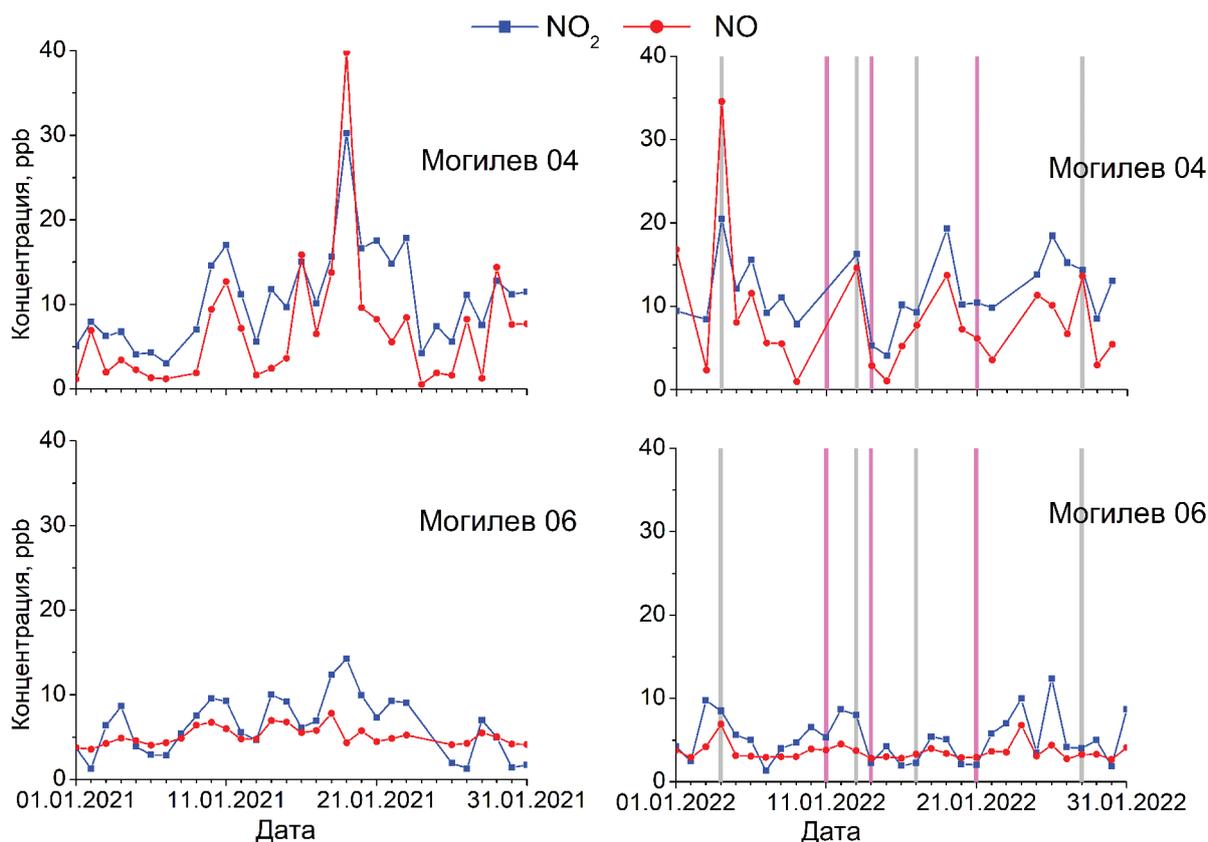


Рис. 3. Концентрации оксидов азота, зарегистрированные на пунктах 04, 06 Могилева в январе 2021 и 2022 гг.

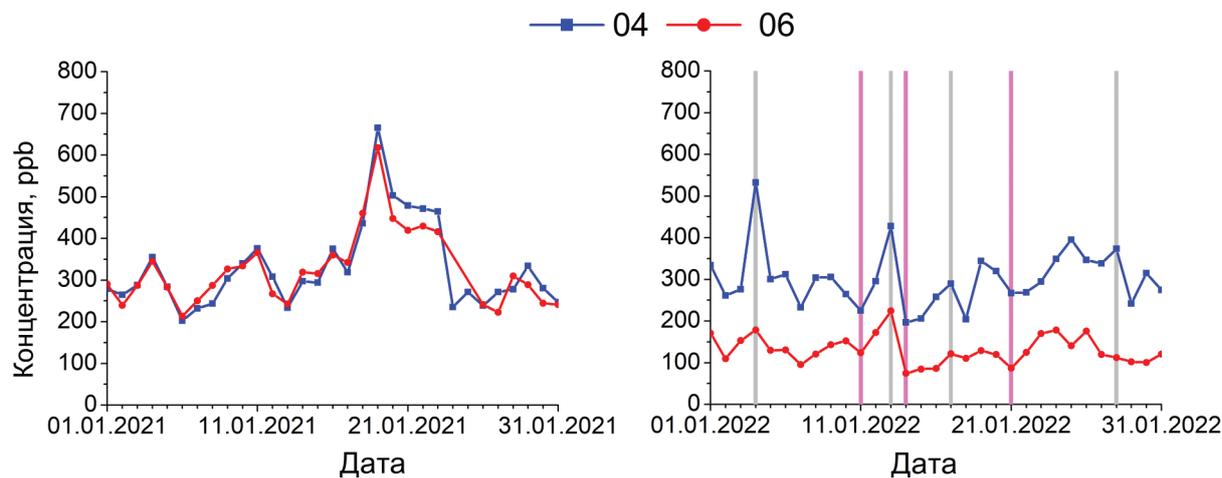


Рис. 4. Концентрации оксида углерода, зарегистрированные на пунктах 04, 06 Могилева в январе 2021 и 2022 гг.

не произошло. Следовательно, изменения в уровне загрязнения воздуха бензолом, толуолом и ксилолом не являются причиной роста концентрации приземного озона в январе 2022 г. по сравнению с январем 2021 г.

На приведенных выше рисунках с данными об антропогенном загрязнении воздуха можно обнаружить незначительное снижение их концентраций в дни, когда концентрация озона повышалась. И наоборот, пониженным концентрациям озона соответствуют повышенные концентрации антропогенных загрязнений. Это особенно заметно на графике с концентрацией оксида углерода (рис. 4) и на графике с концентрациями летучих органических соединений на пункте 04 (рис. 5). Скорее всего,

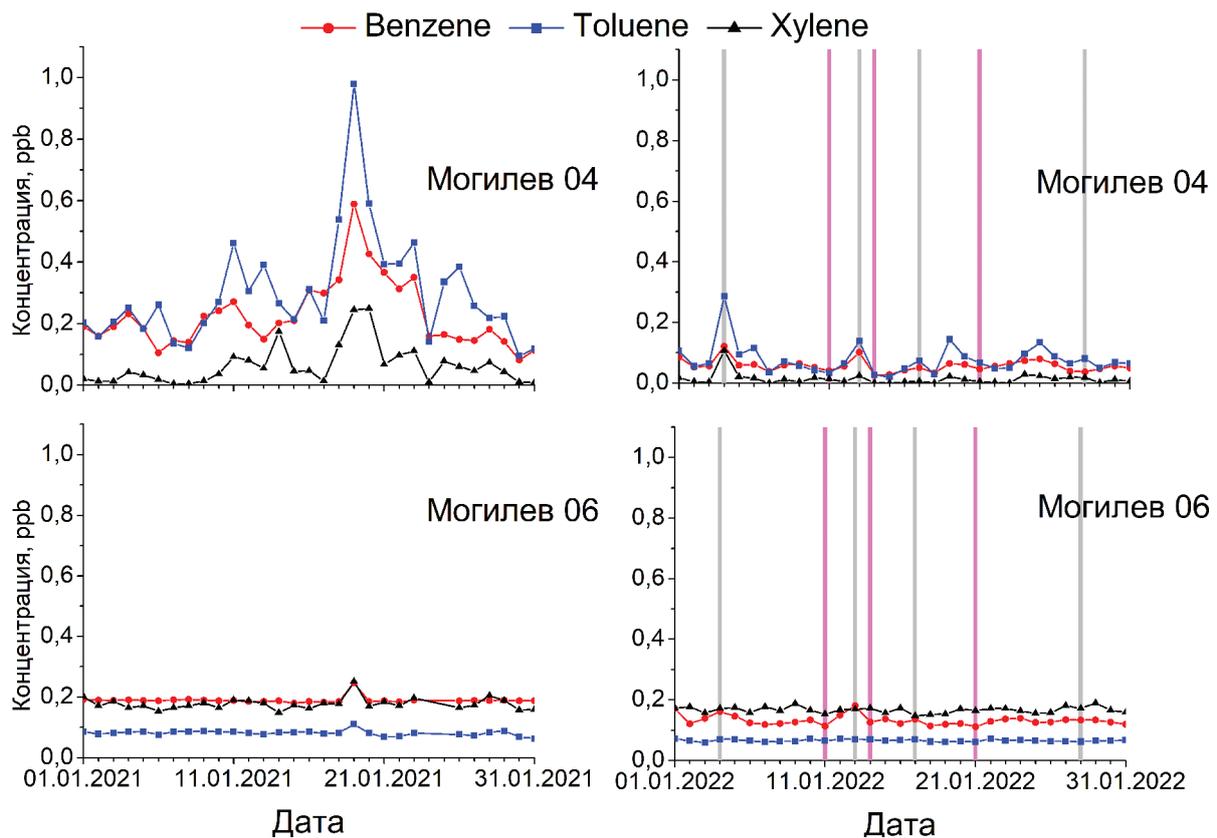


Рис. 5. Концентрации летучих органических соединений в январе 2021 и 2022 гг. на двух пунктах наблюдений Могилева

причиной отмеченных особенностей являются метеорологические условия, способствующие или препятствующие выносу загрязнений из приземного слоя воздуха.

**Влияние метеорологических условий на приземный озон.** Перейдем теперь к анализу метеорологических условий в обсуждаемые периоды времени. На рис. 6 приведены данные о температуре воздуха, скорости ветра, влажности, облачности, давлении воздуха и вертикальном градиенте температуры воздуха в нижнем слое тропосферы в Могилеве в январе 2021 и 2022 гг.

Вертикальный градиент температуры воздуха характеризует устойчивость атмосферы. Речь идет о величине  $-\partial T/\partial h$ , где  $T$  – температура воздуха,  $h$  – высота. Чем выше значение этой величины, тем менее устойчива атмосфера, тем эффективнее ее вертикальное перемешивание за счет термической конвекции. В настоящее время в Беларуси измерения вертикального распределения температуры в тропосфере производят только на метеостанциях Брест и Минск в срок 00 UTC, поэтому градиент температуры для Могилева определялся на основе выходной продукции модели ICON (икосаэдрическая негидростатическая модель немецкой службы погоды). Расчет градиентов производился в двух слоях атмосферы: 2 м – до высоты, отвечающей давлению 925 гПа, и от высоты 925 гПа – до высоты, отвечающей давлению 850 гПа.

В работе [11] для оценки вертикальной устойчивости атмосферы использовалось минимальное из значений для двух слоев. Возможно, это не совсем верный выбор. На рис. 6 представлены среднесуточные градиенты, определенные по значениям только из нижнего слоя тропосферы. Результаты демонстрируют отсутствие корреляции с отмеченными особенностями поведения приземного озона. Оценки по старой схеме [11] также свидетельствуют об отсутствии корреляции.

Вертикальное перемешивание улучшается также за счет турбулентности, генерируемой горизонтальными ветрами. Однако изменений в скорости ветра, коррелирующих с поведением приземного озона в январе 2022 г., не обнаруживается. А также не обнаруживается существенной разницы в скорости ветра по сравнению с предыдущим годом (кроме заметного усиления ветра во второй декаде января 2022 г.). Логично ожидать, что определяющая причина обсуждаемых особенностей поведения приземного озона должна одинаково проявляться для случаев сильного понижения концентрации озона и резко отличаться в случаях его повышенной концентрации. Ничего подобного не

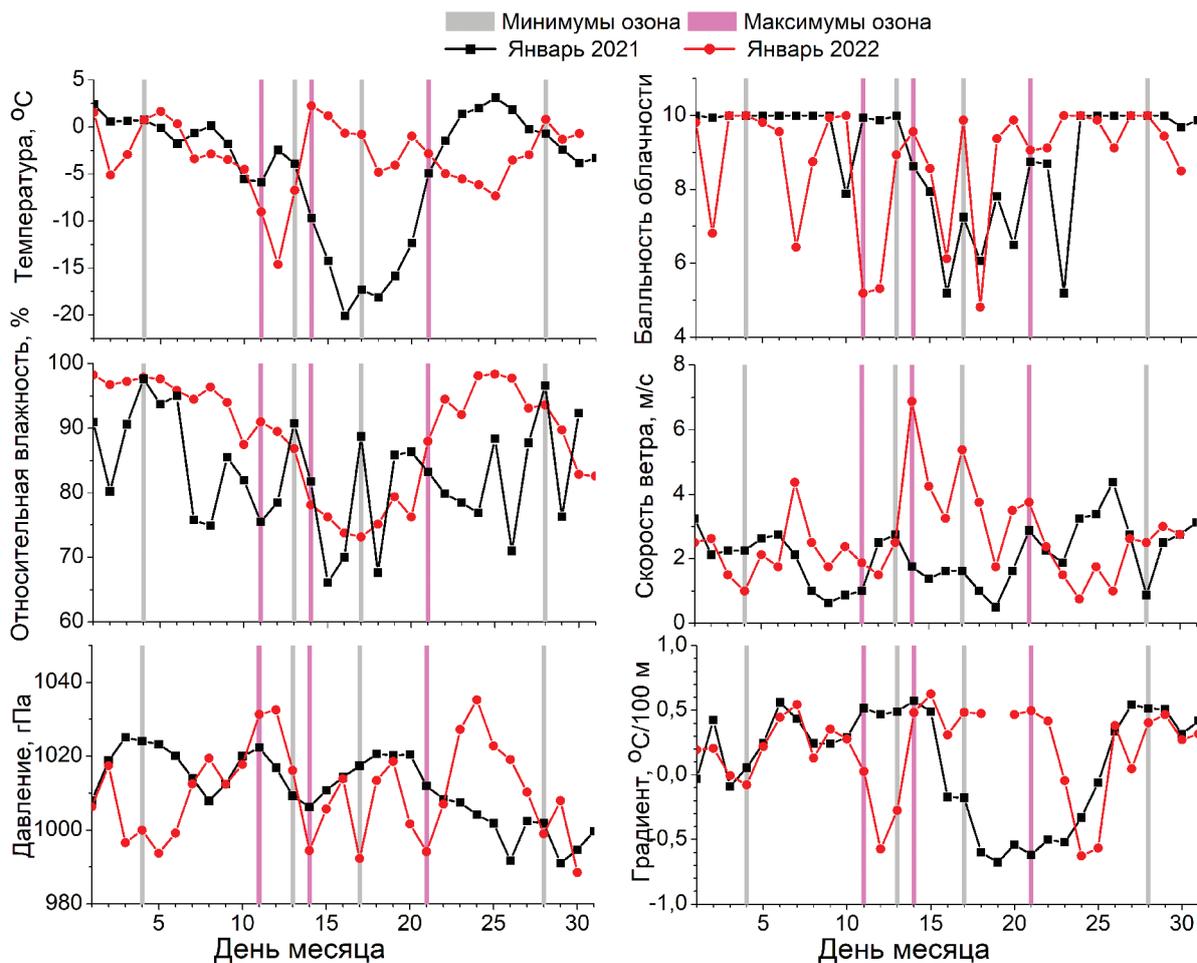


Рис. 6. Среднесуточные значения метеопараметров в январе 2021 и 2022 гг. (Могилев)

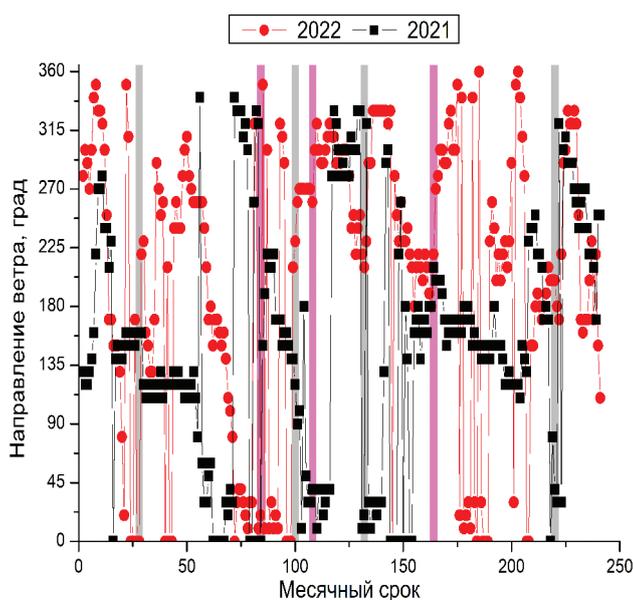


Рис. 7. Направление ветра в январе 2021 и 2022 гг. в Могилеве. Значениям «0» и «360» отвечает ветер с севера, «90» – с востока. По оси абсцисс указаны номера месячных метеорологических сроков (интервал между сроками – 3 ч). Вертикальными линиями выделены середины суток обсуждаемых особенностей в поведении приземного озона

выявлено. Следовательно, и поведение этих метеопараметров не может быть причиной обсуждаемых особенностей.

Направление ветра в некоторой степени характеризует происхождение воздушных масс, приходящих на территорию Беларуси и приносящих «свой» приземный озон и другие загрязнения воздуха (рис. 7). Повышению концентрации озона соответствует в основном ветер из северо-западного сектора, а понижению – из юго-западного. Возможно, эта особенность и является причиной произошедших в январе флуктуаций среднесуточных концентраций приземного озона. Однако это не объясняет повышение его среднемесячных значений в январе 2022 г. по сравнению с январем предыдущего года. Авторы старались не ссылаться на результаты описания зависимости приземного озона от влияющих на него факторов, полученные ранее с помощью уравнения регрессии [11–13]. В названных публикациях показано, что приземный озон в Беларуси отрицательно коррелирует со всеми обсуждаемыми здесь антропогенными загрязнителями атмосферы. Поскольку анализ отдельных возможных причин изменения концентрации озона не выявил основной, следует проверить возможность коллективного влияния всей совокупности факторов. Полученное уравнение регрессии допускает такую возможность, поскольку частично учитывает совокупное (синергетическое) воздействие различных факторов посредством включения в уравнение членов в виде произведений объясняющих переменных, а также и более сложных их комбинаций. Правда, в работе [13] отмечалось, что уравнение позволяет объяснить всего лишь около 60 % дисперсии концентрации приземного озона и потому не обеспечивает полного совпадения результатов расчетов с измеренными значениями.

На рис. 8 приведено сравнение расчетов по уравнению регрессии, полученному в [12], с измерениями для обоих пунктов наблюдений в Могилеве. Следует обратить внимание, что расчетные данные не обнаруживают принципиальных различий между январями 2021 и 2022 гг., хотя такие различия имеют место для измеренных значений. Здесь речь идет не о незначительных колебаниях среднесуточной концентрации озона в течение месяца, а о средней величине концентрации за месяц. Особенно это заметно для «чистого» пункта наблюдений 06, где измеренные концентрации озона в 2022 г. оказались существенно выше, чем в 2021 г.

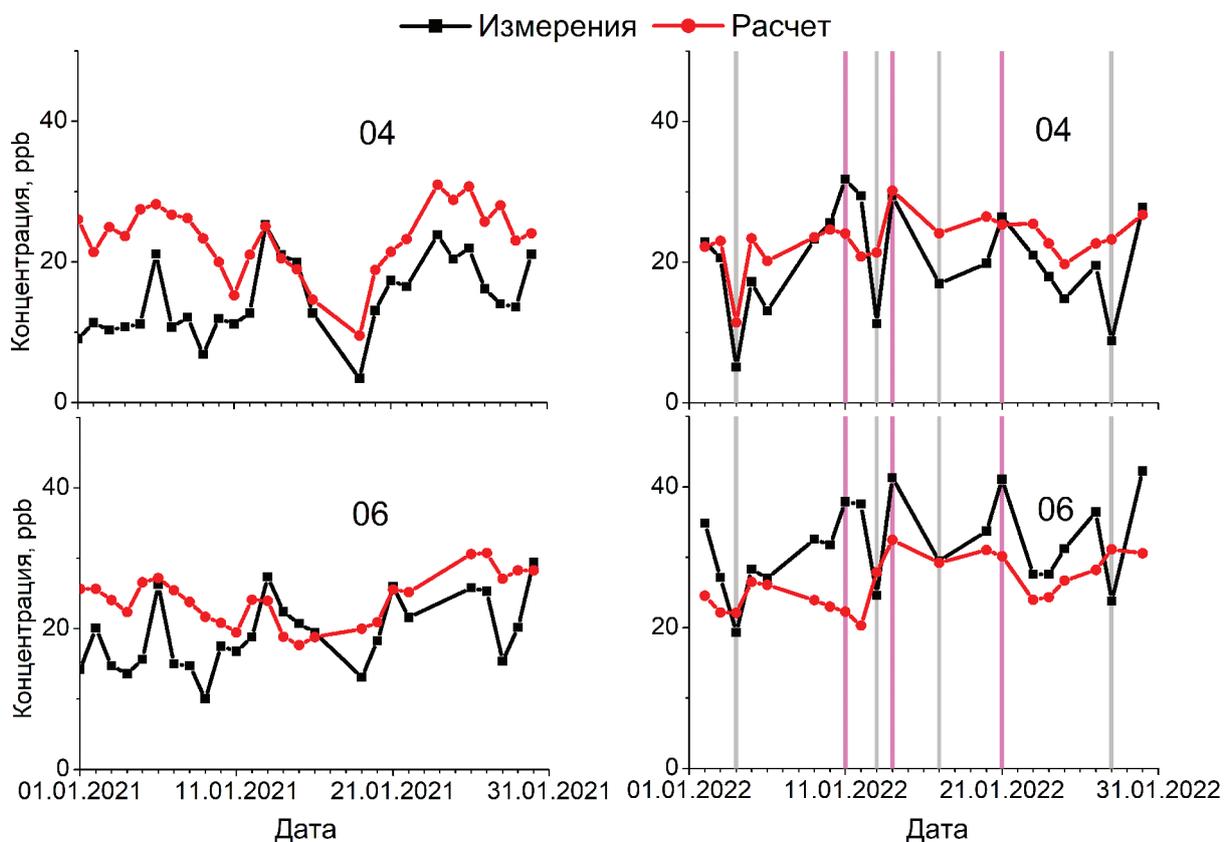


Рис. 8. Сравнение расчетов концентрации приземного озона по уравнению регрессии с измеренными значениями на пунктах 04, 06 Могилева

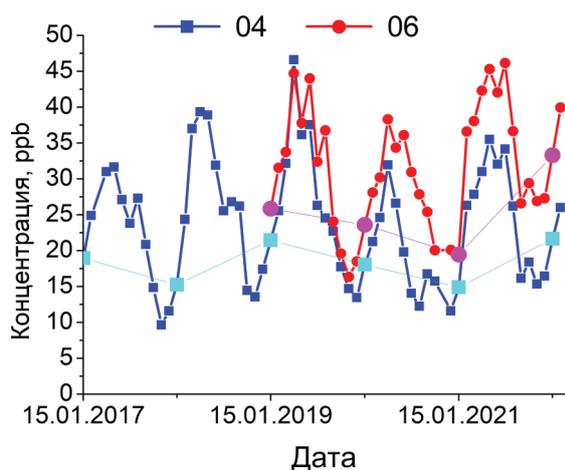


Рис. 9. Среднемесячные значения концентрации приземного озона, зарегистрированные на пунктах наблюдений 06, 04 Могилева в 2017–2022 гг. Январские значения выделены более светлыми и укрупненными значками

снежного покрова [15–17]. Известно, что осаждение озона на заснеженной поверхности происходит гораздо медленнее, чем на бесснежной [16, 17]. Данные наблюдений отвергают такую причину: и в 2021, и в 2022 гг. январь был заснеженным по всей территории страны. В частности, зимой 2021 г.: «в первой-второй декадах января по всей территории страны образовался устойчивый снежный покров, местами достигший высоты 30–58 см» [18]. При этом станциями Белгидромета зафиксированы весьма интенсивные снегопады. В январе 2022 г. «в первой половине месяца снежный покров по большей части территории Беларуси также неоднократно образовывался и разрушался. Во второй половине по большей части страны залегание снежного покрова носило устойчивый характер» [19]. Еще одна возможная причина – осадки, способствующие разрушению озона [5]. Однако анализ их местных особенностей вряд ли способен объяснить ситуацию, поскольку речь идет об изменениях концентрации озона над всей территорией страны в течение длительного периода.

**Заключение.** Проанализированы возможные причины различия в концентрациях приземного озона над всей территорией Беларуси в январе 2022 г. по сравнению с январем предыдущего года. Для этого использовали наблюдения во всех областных городах Беларуси. Единственным пунктом наблюдений, который можно отнести к сельской местности (в соответствии с общепринятой классификацией), является Березинский биосферный заповедник.

Повышенные по сравнению с 2021 г. концентрации приземного озона в январе 2022 г. регистрировались на всех пунктах наблюдений (рис. 1). Это позволило заключить, что загрязнения антропогенного происхождения, различающиеся для разных городов и даже для разных районов одного города, не являются причиной анализируемой ситуации. Следовательно, объяснение нужно искать в общих для всей территории страны метеорологических особенностях обсуждаемых периодов. Для этого были исследованы все доступные метеорологические параметры для Могилева, и не было обнаружено их корреляции с концентрацией приземного озона за исключением направления ветра. Только оно реально коррелирует с флуктуациями озона в январе 2022 г. Однако этот параметр никак не объясняет повышенные среднемесячные концентрации озона по всей территории страны по сравнению с предыдущим годом.

Использованное уравнение регрессии также не объясняет наблюдаемой разницы. На рис. 9 приведены среднемесячные значения концентрации озона, зарегистрированные на могилевских пунктах наблюдений, начиная с января 2017 г. Рис. 9 показывает, что межгодовые флуктуации среднемесячных концентраций озона – обычное явление. Они происходят постоянно. В частности, оказалось, что январские концентрации 2019 и 2020 гг. также превышают значения 2021 г. (таблица). Таким образом, на самом деле следовало бы искать объяснение некоторого понижения концентрации приземного озона в январе 2021 г., по сравнению с 2019, 2020 и 2022 гг. Об этом также свидетельствует хорошее соответствие расчёта с измерениями в 2022 г., и заметно худшее в 2021 г. Следует признать, что в настоящее время не все факторы, влияющие на поведение приземного озона в Беларуси, определены и требуется поиск недостающих.

Уравнение регрессии учитывает почти все рассмотренные выше факторы, способные повлиять на концентрацию приземного озона. Только направление ветра не входит в число объясняющих переменных уравнения. Однако использовать этот параметр удается лишь для объяснения средне-суточных колебаний концентрации приземного озона, но не разницы в среднемесячных значениях для двух рассматриваемых периодов времени. В связи с этим можно утверждать, что в проведенном рассмотрении, а также в списке объясняющих переменных уравнения регрессии отсутствует переменная, имеющая определяющее значение на обсуждаемую разницу в поведении озона в 2021 и 2022 гг. Таких переменных действительно много, и поэтому даже «правильное» уравнение (в смысле точности описания зависимости исследуемой величины от неполного набора объясняющих переменных) никогда не обеспечит точного совпадения с результатами измерений [14].

Одной из неучтенных в уравнении регрессии переменных является наличие или отсутствие

## Январские среднемесячные концентрации озона в 2020–2022 гг., ррб

Пункт	Годы		
	2020	2021	2022
04	18,0	14,9	21,6
04 расчет	–	23,3	20,1
06	23,6	19,4	33,3
06 расчет	–	24,1	31,8

**Благодарности.** Авторы благодарны независимому исследователю-аналитику О. Титаренко за инициативу прокомментировать отмеченное различие в январском озоне 2021–2022 гг., что послужило поводом для проведения исследования.

## Список использованных источников

1. Sillman, S. Tropospheric Ozone and Photochemical Smog / S. Sillman // Elsevier Science. – 2003. – 648 p.
2. Монин, А. С. Климат как проблема физики / А. С. Монин, Ю. А. Шишков // УФН. – 2000. – Т. 170, № 4. – С. 419–445.
3. Effect of stratosphere-troposphere exchange on the future tropospheric ozone trend / W. J. Collins [et al.] // J. Geophys. Res. – 2003. – Vol. 108, N 12. – P. 13-1–13-10. DOI: 10.1029/2002JD002617
4. Покаташкин, В. И. Оценка влияния некоторых антропогенных загрязнителей на концентрацию приземного озона в условиях Минска / В. И. Покаташкин, А. М. Людчик // Природные ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 87–92.
5. Ozone and aerosols over the Tibetan Plateau / J. Ma [et al.] // Asian Atmospheric Pollution. Chapter 15. – Elsevier. – 2022. – P. 287–302. ISBN 9780128166932
6. Measurements of NO<sub>x</sub> and aerosol particles at NY-Alesund Zeppelin mountain station on Svalbard: influence of regional and local pollution sources / H. J. Beine [et al.] // Atmospheric Environment. – 1996. – Vol. 30, N 7. – P. 1067–1079.
7. Антропогенное загрязнение воздуха оксидом углерода и оксидами азота в городах Беларуси / А. М. Людчик, Е. А. Мельник, П. Н. Павленко // Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века: материалы 22-й Международ. науч. конф., г. Минск, 19–20 мая 2022 г.: в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова БГУ; редкол.: А. Н. Батян [и др.]; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, канд. техн. наук, доцента М. Г. Герменчук. – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 155–158.
8. Антропогенное загрязнение воздуха бензолом, толуолом и ксилолом в городах Беларуси / А. М. Людчик [и др.] // Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века: материалы 22-й Международ. науч. конф., г. Минск, 19–20 мая 2022 г.: в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова БГУ; редкол.: А. Н. Батян [и др.]; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, канд. техн. наук, доцента М. Г. Герменчук. – Минск: ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 145–158.
9. Антропогенное загрязнение воздуха и приземный озон в городах Беларуси / В. В. Божкова [и др.] // Природные ресурсы. – 2018. – № 1. – С. 92–101.
10. Bozhkova V. V. Influence of meteorological conditions on urban air pollution / V. V. Bozhkova, A. M. Liudchik, S. D. Umreirka // Acta Geographica Silesiana. – 2020. – Vol. 14. – P. 5–22.
11. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон / А. М. Людчик [и др.] // Природные ресурсы. – 2015. – № 1. – С. 96–106.
12. Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси / В. В. Божкова [и др.] // Природные ресурсы. – 2019. – № 2. – С. 98–107.
13. Божкова В. В. луктуации поля приземного озона в Беларуси, обусловленные метеорологическими условиями и антропогенным загрязнением воздуха / В. В. Божкова, А. М. Людчик, Е. А. Мельник // Природные ресурсы. – 2020. – № 1. – С. 80–91.
14. Влияние диоксида серы на приземный озон в городах Беларуси / А. М. Людчик [и др.] // Природные ресурсы. – 2021. – № 2. – С. 22–29.
15. Role of Ozone Deposition in the Occurrence of the Spring Maximum / A. Liudchik [et al.] // Atmosphere-Ocean. – 2015. – Vol. 53, N 1. – P. 42–49.
16. Evaluation of the flux gradient technique for measurement of ozone surface fluxes over snowpack at Summit, Greenland / F. Bocquet [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 14. – P. 2305–2321.
17. The role of ozone atmosphere-snow gas exchange on polar boundary-layer tropospheric ozone – a review and sensitivity analysis / D. Helmig [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2007. – Vol. 7. – P. 15–30.
18. Климатическая характеристика зимы 2020–2021 года. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-karakteristika-zimy-2020-2021-godov-3830-2021/>
19. Климатическая характеристика зимы 2021–2022 года. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-karakteristika-zimy-2021-2022-goda-5149-2022/>

Поступила 05.07.2022