

**В. В. Божкова<sup>1</sup>, Л. М. Болотько<sup>1</sup>, А. М. Людчик<sup>1</sup>, Н. С. Метельская<sup>2</sup>,  
С. Д. Умрейко<sup>1</sup>, А. П. Чайковский<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Институт физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь,  
e-mail: n.miatselskaya@dragon.bas-net.by.

### ПРИЧИНЫ «СТРАННОГО» ПОВЕДЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В АПРЕЛЕ 2019 г.

**Аннотация.** Анализируется необычное поведение приземного озона в городах Беларуси в апреле 2019 г.: в первой и третьей декадах месяца амплитуда суточного хода озона была высокая и резко уменьшилась во второй декаде. В качестве возможных причин рассматриваются изменение аэрозольной обстановки, меняющиеся метеорологические условия и уровни антропогенного загрязнения воздуха в городах. Результаты анализа указывают на то, что основной причиной «странного» поведения приземного озона явилось уменьшение вертикальной устойчивости атмосферы, которое привело к более интенсивному рассеянию загрязнений и снижению их концентраций в приземном воздухе. Это способствовало торможению процессов генерации и разрушения приземного озона.

**Ключевые слова:** приземный озон, аэрозольная оптическая толщина, метеорологические условия, антропогенные загрязнения

**V. V. Bozhkova<sup>1</sup>, L. M. Bolotsko<sup>1</sup>, A. M. Liudchik<sup>1</sup>, N. S. Miatelskaya<sup>2</sup>, S. D. Umreiko<sup>1</sup>, A. P. Chaikovsky<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus,  
e-mail: n.miatselskaya@dragon.bas-net.by

### ORIGINS OF “UNUSUAL” SURFACE OZONE BEHAVIOR IN APRIL’2019

**Abstract.** The unusual behavior of surface ozone revealed in April’19 over some Belarusian cities has been analyzed. Here, the first and third decades of the month were featured by a high amplitude of the diurnal ozone course, yet, in the second decade, its sharp decrease was observed. Among possible reasons for this occurrence, one has treated changes in aerosol amount, varying meteorological conditions and levels of anthropogenic air pollution in cities. The results of the analysis indicate that the main cause of the strange behavior of surface ozone was a decrease in the vertical stability of the atmosphere leading to a more intense dispersion of pollutants and, thus, to a decrease in their concentrations in surface air. This contributed to the inhibition of the processes of surface ozone generation and destruction.

**Keywords:** surface ozone, aerosol optical thickness, meteorological conditions, anthropogenic pollution

**В. В. Бажкова<sup>1</sup>, Л. М. Балацько<sup>1</sup>, А. М. Людчык<sup>1</sup>, Н. С. Мяцельская<sup>2</sup>, С. Дз. Умрэйка<sup>1</sup>, А. П. Чайкоўскі<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>Інстытут фізікі Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі, Мінск, Беларусь,  
e-mail: n.miatselskaya@dragon.bas-net.by

### ПРЫЧЫНЫ “НЕЗВЫЧАЙНЫХ” ПАВОДЗІНАЎ ПРЫЗЕМНАГА АЗОНУ Ў КРАСАВІКУ 2019 г.

**Анотацыя.** Аналізуюцца незвычайныя паводзіны прыземнага азону ў гарадах Беларусі ў красавіку 2019 г. Паводле назіранняў, у першай і трэцяй дэкадах месяца амплітуда сутачнага ходу азону была даволі высокая, але ў другой дэкадзе яна рэзка зменшылася. У якасці магчымых прычын разглядаюцца змяненне колькасці аэразоляў, нестабільныя метэаралагічныя ўмовы і ўзроўні антрапагеннага забруджвання паветра ў гарадах. Вынікі аналізу сведчаць пра тое, што асноўнай прычынай дзіўных паводзінаў прыземнага азону з’явілася памяншэнне вертыкальнай устойлівасці атмасферы, якое прывяло да больш інтэнсіўнага рассеявання забруджвання і зніжэння іх канцэнтрацый у прыземным паветры. Гэта, у сваю чаргу, паспрыяла запавольванню працэсаў генерацыі і разбурэння прыземнага азону.

**Ключавыя словы:** прыземны азон, аэразольная аптычная таўшчыня, метэаралагічныя ўмовы, антрапагеннае забруджванне

**Введение.** В апреле 2019 г. наблюдения за приземным озоном на территории Беларуси показали весьма необычные результаты: в первой и третьей декадах месяца наблюдались высокие дневные концентрации озона и низкие ночные, однако во второй декаде максимальные дневные концентрации заметно снизились и повысились минимальные ночные (рис. 1, цифры у городов обозначают номера пунктов, где проводились измерения).

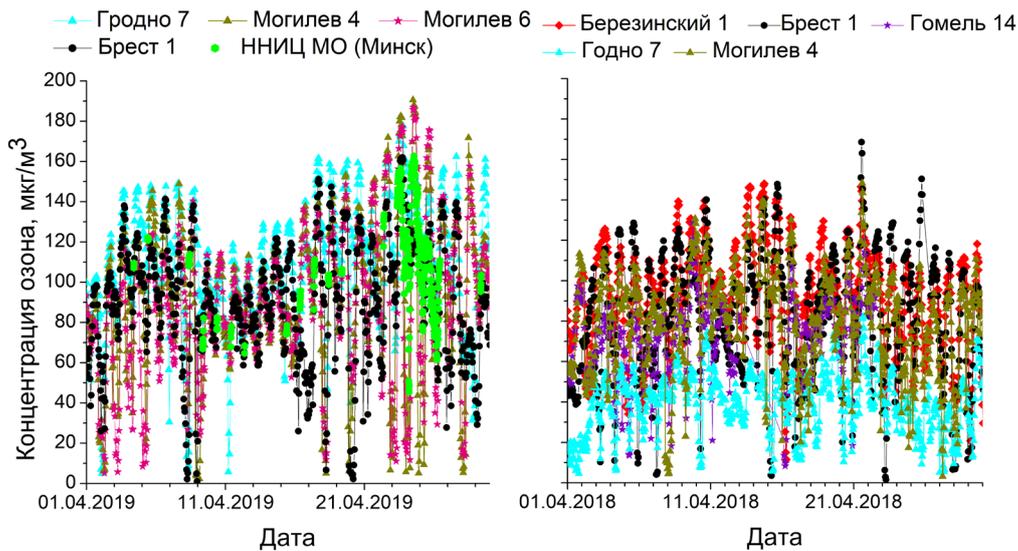


Рис. 1. Концентрация приземного озона, зарегистрированная в апреле 2019 г. в городах Беларуси. Для сравнения приведены данные наблюдений за апрель 2018 г.

В этот период также существенно изменялась оптическая толщина атмосферных аэрозолей вследствие переноса пыли из Северной Африки или пожаров в Беларуси и близких к ней регионов. Результаты измерений аэрозольной оптической толщины на длине волны 380 нм на минской станции AERONET [1] показаны на рис. 2. Выбранная длина волны излучения приблизительно соответствует спектральной области солнечного фотохимически активного излучения в приземном слое атмосферы, приводящего к фотолизу загрязнителей атмосферы и последующей генерации озона. В связи с этим можно предположить, что «странное» поведение приземного озона непосредственно обусловлено произошедшими в течение месяца изменениями в оптической толщине атмосферы, например, за счет изменения уровня фотохимически активного солнечного излучения у поверхности земли.

Аэрозольные частицы также способны принимать участие в химических процессах с участием озона и таким образом влиять на его концентрацию [2]. Концентрации твердых аэрозольных частиц у поверхности земли в апреле 2019 г., по данным пунктов мониторинга атмосферного воздуха «Гидрометеоцентра» в Минске, Бресте и Могилеве также снижаются во второй декаде месяца, как и аэрозольная оптическая толщина атмосферы (рис. 3). Это косвенно свидетельствует

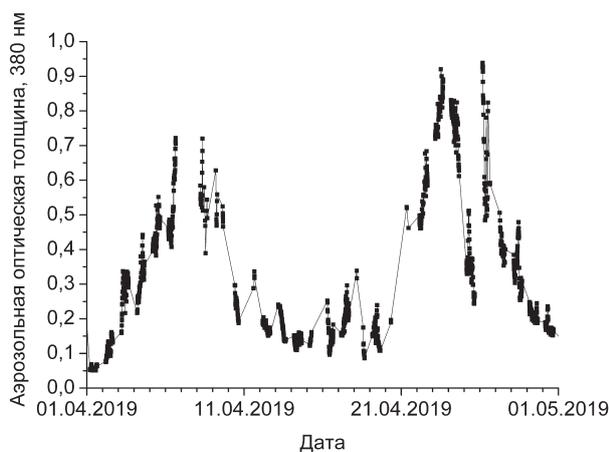


Рис. 2. Аэрозольная оптическая толщина на длине волны 380 нм в апреле 2019 г. над Минском

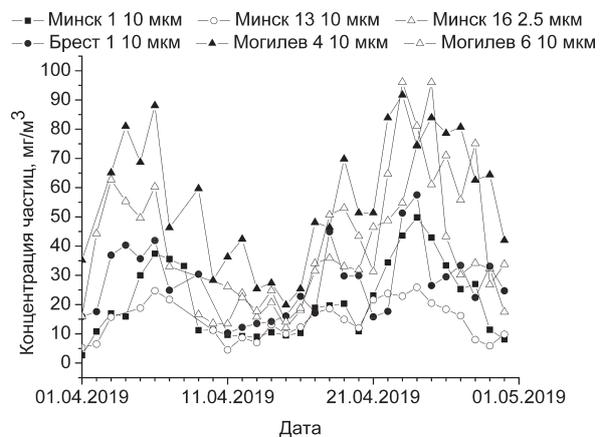
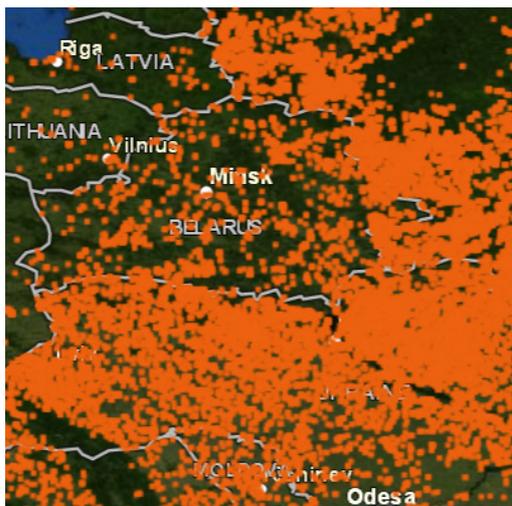
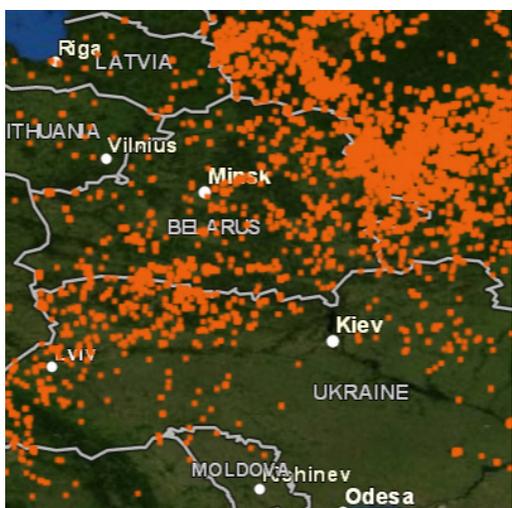
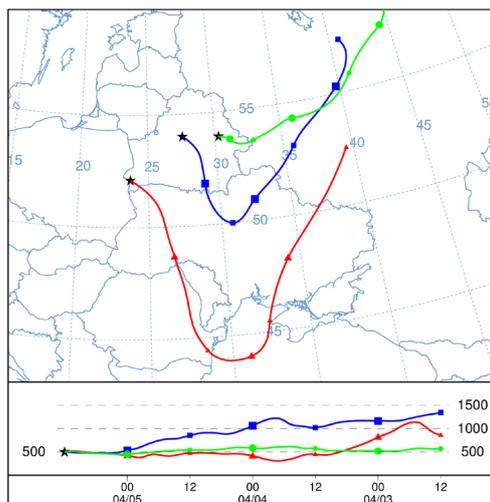


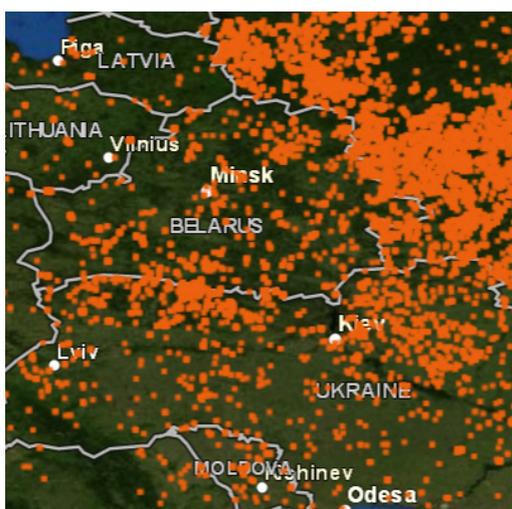
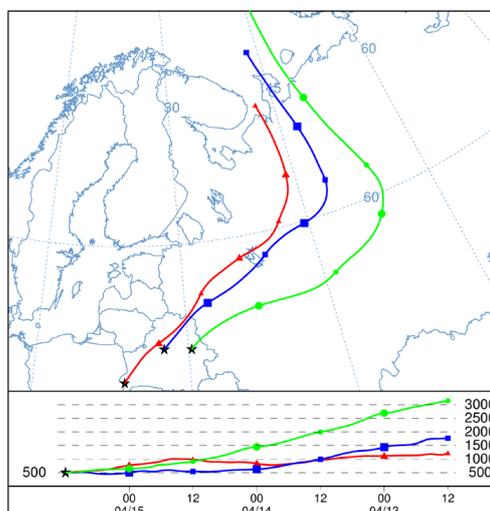
Рис. 3. Среднесуточные концентрации твердых частиц в апреле 2019 г. в приземном воздухе в Минске, Бресте и Могилеве. Указаны номера пунктов наблюдений и размеры регистрируемых частиц



2–9  
апреля



11–18  
апреля



21–28  
апреля

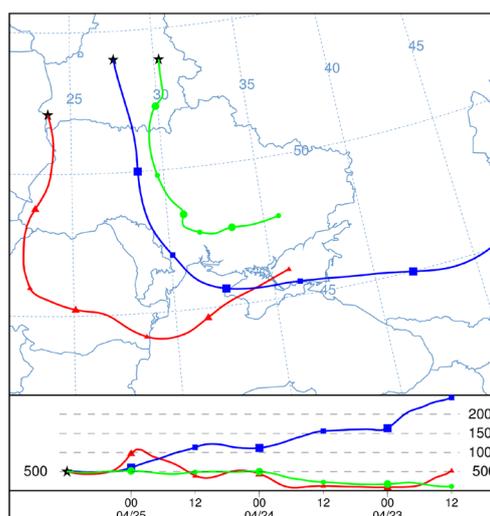


Рис. 4. Интенсивность пожаров в апреле 2019 г.

Рис. 5. Обратные траектории движения воздуха в апреле 2019 г. для Бреста, Минска и Могилева

о том, что оптическая толщина аэрозолей в течение месяца над всей территорией Беларуси изменялась приблизительно так же как и в Минске.

Активность пожаров [3] – возможных источников увеличения аэрозольной оптической толщины – на территории Беларуси и в прилегающих регионах демонстрирует рис. 4. Судить о роли пожаров и переноса африканской пыли можно только с учетом направления движения воздуха в планетарном слое атмосферы. Данные о расчетах обратных траекторий [4] движения воздуха в приземном слое атмосферы в первой, второй и третьей декадах апреля приведены на рис. 5.

Безусловно, на концентрацию приземного озона (по крайней мере на ее региональную составляющую [5]) влияет природа воздушной массы, находящейся над территорией страны. На формирование наблюдаемой концентрации приземного озона оказывают влияние также метеорологические условия в месте наблюдений [6–8]. А также следует указать на роль прекурсоров озона естественного и антропогенного происхождения, способствующих или препятствующих генерации озона в приземном слое атмосферы в зависимости от абсолютных значений и соотношения их концентраций [9–12]. При этом весьма маловероятно, что используемые для анализа концентрации антропогенных загрязнений в областных городах, являющихся их интенсивным источником, существенно меняются с приходом разных воздушных масс.

Таким образом, существует совокупность возможных причин происходящего в апреле 2019 г. поведения приземного озона. Цель данной работы – ответить на три вопроса: в чем причина увеличения аэрозольной оптической толщины в первой и третьей декадах апреля и ее снижения во второй; являлось ли увеличение аэрозольного загрязнения причиной столь странного поведения приземного озона; что явилось причиной изменений концентрации приземного озона в течение месяца.

Далее последовательно обсуждаются все доступные хотя бы для приближенного анализа гипотезы о возможных причинах событий и их состоятельность. Здесь также следует отметить, что формально вопрос о природе существенного изменения аэрозольной оптической толщины в течение месяца никак не связан с вопросом о влиянии аэрозолей на приземный озон.

Для анализа можно было бы ограничиться только г. Минском, поскольку именно здесь измерялась оптическая толщина аэрозолей. Однако в Минске в апреле не проводились измерения концентрации приземного озона за исключением непродолжительных измерений в Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы (НИЦ МО), но имеются данные о погоде и других загрязнителях атмосферы. Поэтому были рассмотрены также Брест и Могилев, где в апреле пункты мониторинга атмосферного воздуха регистрировали всю совокупность загрязнений: твердые частицы, CO, NO<sub>2</sub>, NO, летучие органические соединения (ЛОС – бензол, толуол, ксилол) и приземной озон.

**Пожары.** Данные о пожарах показывают, что в первой декаде месяца их интенсивность была велика на юго-востоке в ближайших к Беларуси регионах, однако заметно снизилась в третьей декаде. Напомним, что в эти декады воздух в пограничном слое перемещался в Беларусь именно с юго-востока (рис. 5). В течение второй декады воздух двигался с северо-востока, где интенсивность пожаров была невелика.

Аэрозольные оптические толщины в первой и третьей декадах были велики, а интенсивность пожаров вдоль траектории переноса воздуха в третьей декаде заметно уменьшилась, хотя оценить количественно это уменьшение по рисункам не удастся. Поэтому можно заключить, что роль пожаров незначительна в формировании аэрозольной оптической толщины над Беларусью в рассматриваемый период, несмотря на то, что уменьшение интенсивности пожаров в северо-восточном направлении коррелирует с уменьшением оптической толщины во второй декаде месяца. А повышение пожароопасности на территории Беларуси в третьей декаде месяца (см. далее) коррелирует с увеличением аэрозольного загрязнения. По крайней мере, это так происходило в апреле 2019 г. Безусловно, дымы от пожаров вносят вклад в содержание аэрозолей над местом наблюдений, однако этот вклад, скорее всего, не является определяющим. Следовательно, именно приход воздушных масс из африканского региона, содержащих много сахарной пыли, обусловил увеличение количества аэрозолей над Беларусью.

Возможно, другие характеристики состояния атмосферы, непосредственно влияющие на озон, зависели от аэрозолей. Поэтому имеет смысл исследовать все доступные сведения о состоянии и составе атмосферы в этот период.

**Погода.** По данным Белгидромета среднемесячная температура воздуха в апреле 2019 г. была на 0,5–2,5 град. выше климатической нормы. Таким теплым апрель бывает в среднем один раз в 10 лет. Преобладание антициклональных процессов обусловило недобор осадков. Дожди отмечались редко и были небольшими. Из-за высоких температур и дефицита осадков в начале третьей декады по югу страны, а в последней пятидневке на большей части территории республики наблюдалась высокая пожароопасность (4-й класс горения лесов). Более детальные сведения о погоде приведены в табл. 1 и на рис. 6, 7.

Таблица 1. Периоды антициклонов и преимущественное направление ветра в апреле 2019 г.

Период	1–7	10–20	22–26	28–30
Направление ветра	Юго-восточный	Северо-восточный	Юго-восточный	Восточный

Так, дневные и ночные температуры воздуха растут с начала апреля, но резко опускаются во второй декаде месяца. В третьей декаде рост температур с незначительными вариациями продолжает тенденции, характерные для первой. Существенное снижение атмосферного давления в конце первой, начале третьей декады и в конце месяца соответствует периодам смены воздушных масс над территорией страны.

Особых изменений в скорости ветра в течение месяца в трех городах не произошло. Однако в Могилеве во второй декаде скорость была заметно выше, чем в Бресте и Минске, и редко падала до нуля в ночное время. Преимущественное направление ветра в первой и третьей декадах – юго-восточное (менее 180 град.), во второй – северо-восточное (менее 60 град.).

Относительная влажность воздуха (рис. 7) не претерпела за месяц существенных изменений, а небольшое ее увеличение в дневное время во второй декаде (на графике относительной

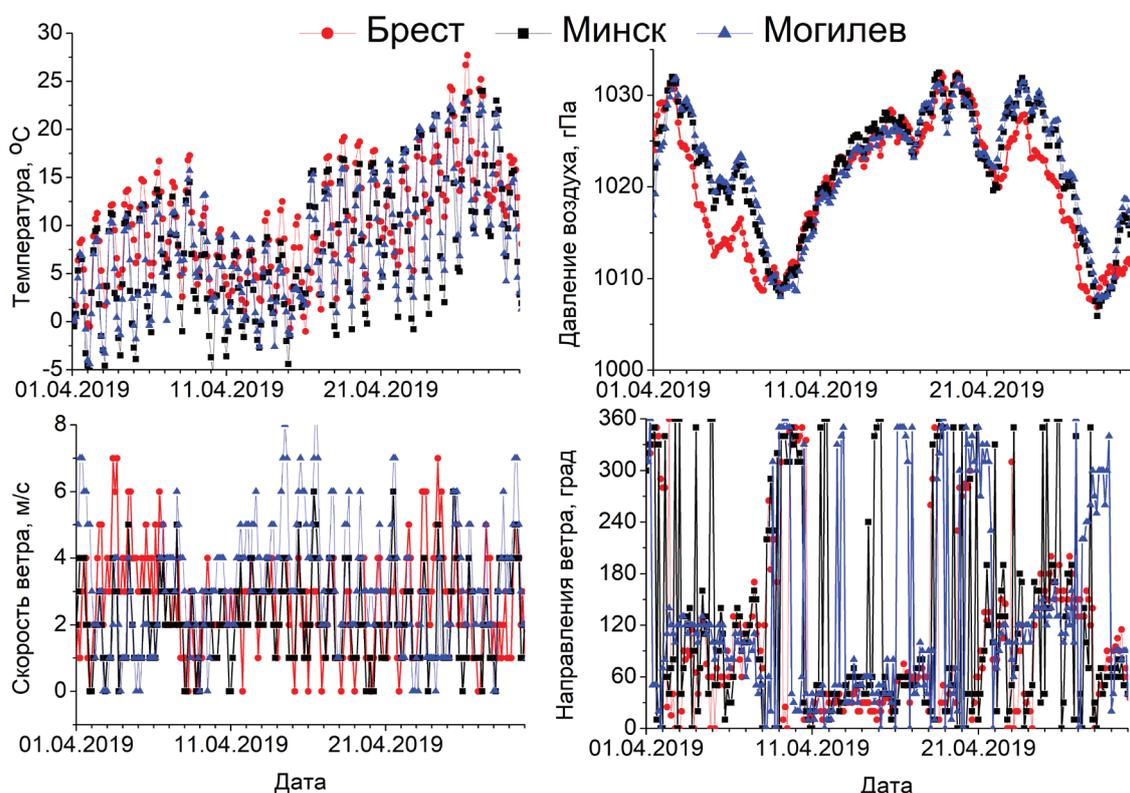


Рис. 6. Температура воздуха, давление, скорость и направление ветра в Бресте, Минске и Могилеве. Апрель 2019 г.

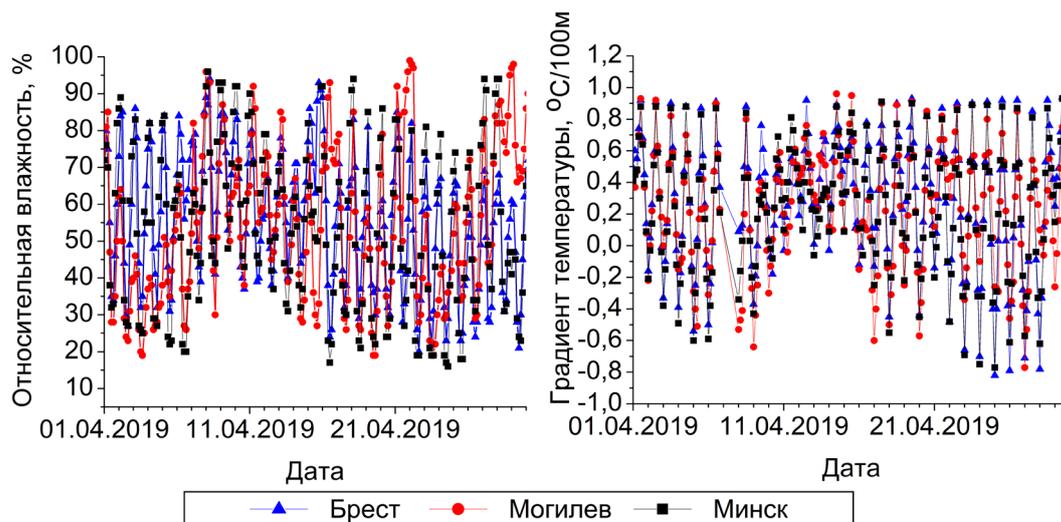


Рис. 7. Относительная влажность воздуха и вертикальный градиент температуры в планетарном пограничном слое в Бресте, Минске и Могилеве. Апрель 2019 г.

влажности дневному времени отвечают нижние точки ее суточного хода) соответствует снижению дневных температур.

Заметные изменения в течение месяца произошли с вертикальным градиентом температуры, определяющим вертикальную устойчивость атмосферы в планетарном пограничном слое. Отметим, что вертикальный градиент температуры определялся по прогнозным расчетам [9] в двух слоях (0–925 и 925–850 гПа) и для характеристики устойчивости выбиралось минимальное значение, оказывающее определяющее влияние на эффективность термической конвекции. Чем выше градиент температуры, тем сильнее конвекция и тем менее устойчива атмосфера. Как видно из графика на рис. 7, вертикальная устойчивость в дневное время практически не менялась в течение апреля и была приблизительно одинакова во всех рассматриваемых городах. Однако в ночное время во второй декаде апреля она была заметно ниже по сравнению с первой и третьей декадами месяца. Пониженная устойчивость атмосферы могла способствовать вертикальному обмену и притоку озона из верхних слоев атмосферы. Это может служить объяснением повышенных ночных концентраций озона во второй декаде, однако одинаковая устойчивость в дневное время не объясняет снижение дневных концентраций в этот период времени.

**Загрязнители.** Данные о концентрациях загрязнителей атмосферы, зарегистрированных на пунктах мониторинга атмосферного воздуха в Бресте, Могилеве и Минске в апреле 2019 г., представлены на рис. 8. На пункте 4 г. Могилева измерения летучих органических соединений в апреле 2019 г. не проводились. Как видно, во второй декаде месяца происходило снижение концентраций всех загрязнителей во всех городах, и это могло существенно повлиять на изменения в поведении приземного озона. Особое значение имеет снижение концентрации диоксида азота, поскольку фотолиз солнечным излучением именно этого соединения является источником атомарного кислорода и последующего образования озона.

**Результаты, обсуждение и анализ данных наблюдений.** Снижение максимальных дневных концентраций озона во второй декаде апреля никак нельзя объяснить увеличением солнечной радиации из-за уменьшения оптической толщины аэрозолей. Солнечное излучение является единственной причиной генерации озона у поверхности земли, поскольку этот процесс включает в себя фотохимические реакции. Неопровержимым доказательством сказанного является повсеместное уменьшение концентрации озона в ночное время. В первой и третьей декадах из-за аэрозолей радиация уменьшалась, а дневные концентрации увеличивались, хотя нужно было ожидать обратного эффекта. Следовательно, изменение уровня приземного сол-

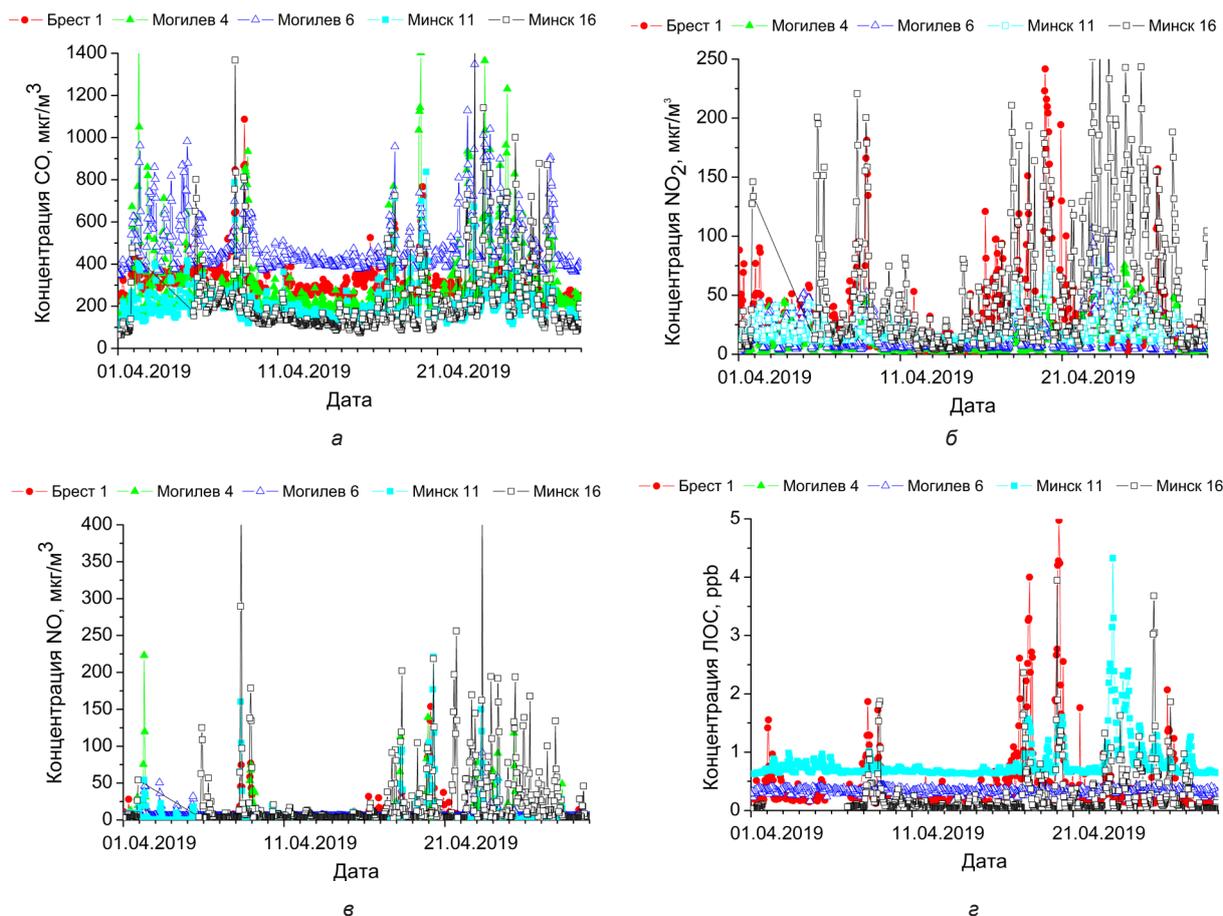


Рис. 8. Концентрации CO (а), NO<sub>2</sub> (б), NO (в) и ЛОС (г) в Бресте, Могилеве и Минске. Апрель 2019 г.

нечного излучения в течение месяца не является причиной «странного» поведения приземного озона.

Вероятнее всего, что основной причиной явилось снижение загрязненности городского воздуха во второй декаде месяца. Поскольку одновременное повсеместное снижение интенсивности источников антропогенных загрязнений просто невероятно, единственной причиной уменьшения концентраций загрязнений в городах являются метеорологические факторы, способные понизить уровень загрязнения воздуха: скорость ветра и интенсивность вертикального перемешивания атмосферы. Скорость ветра в течение месяца существенно не менялась, следовательно, главным фактором, оказавшим влияние на приземный озон во второй декаде апреля, является снижение вертикальной устойчивости атмосферы, способствующее очищению приземного воздуха от антропогенных прекурсоров озона. Определенную роль сыграло также уменьшение температуры воздуха во второй декаде, приводящее к замедлению химических реакций производства и уничтожения озона.

Наземные измерения содержания озона возможны в ограниченном количестве географических точек. Для получения целостной картины пространственно-временного распределения приземного содержания озона привлекается моделирование. В настоящее время разработано несколько десятков глобальных химико-транспортных моделей (моделей переноса атмосферных примесей с учетом химических превращений). Одна из наиболее известных химико-транспортных моделей – GEOS-Chem [13, 14]. В модели используются базы данных поступления химических компонентов и аэрозолей в атмосферу и метеорологические данные. Результатом моделирования является пространственно-временное распределение концентраций атмосферных примесей.

Расчетная сетка модели GEOS-Chem «привязана» к сетке метеорологических полей системы GEOS (Goddard Earth Observing System) [15]. Данные GEOS доступны с 1985 г. по настоящее время. Современные метеоданные представлены с горизонтальным разрешением  $0,25^\circ$  по широте и  $0,3125^\circ$  по долготу. Данные могут быть усреднены на сетки с более крупными ячейками в целях сокращения вычислительных затрат. Атмосфера по вертикали разбивается на 72 слоя. Для оптимизации расчетов GEOS-Chem позволяет соединять слои в стратосфере, уменьшая таким образом их общее число с 72 до 47.

Ядром химического механизма модели являются взаимные превращения озона, оксидов азота и углеводородов, взаимодействие которых играет ключевую роль в химии тропосферы. При этом учитываются химические реакции в газовой и жидкой фазах, а также кинетические процессы формирования и эволюции аэрозолей. Базы данных поступления компонентов в атмосферу используются как глобальные, так и региональные. Источники газообразных загрязнителей в GEOS-Chem разделены на четыре основные категории: антропогенные источники, сжигание биотоплива, микробиологические процессы, горение биомассы. Отдельно рассматриваются источники аэрозольного загрязнения.

Нами проведены расчеты среднесуточной объемной концентрации (объемной доли) озона, усредненной по приземному слою атмосферы (приблизительно до 100 м по вертикали) и по ячейкам  $2^\circ \times 2,5^\circ$ . Расчеты выполнялись по версии v12-01 (одна из наиболее полных и современных) модели GEOS-Chem. Используются базы данных поступления химических компонентов и аэрозолей в атмосферу модуля HEMCO (Harvard-NASA Emissions Component) [16], адаптированные для модели GEOS-Chem, в том числе глобальные базы данных антропогенных выбросов CEDS (Community Emissions Data System) [17], POET [18], AEIC (Aircraft Emissions Inventory Code) [19], TZOMPA [20], XIAO [21], BIOFUEL [22], BOND [23], выбросов в результате горения биомассы GFED (Global Fire Emissions Database) [24]. Поступление в атмосферу пыли, морской соли, оксидов азота из почвы и в результате вспышек молний, биогенных летучих органических соединений рассчитываются в модели в зависимости от метеорологических условий.

Проведено сравнение результатов моделирования для ячеек, включающих города Брест, Минск и Могилев, с измерениями в Бресте и Могилеве. Большие размеры ячеек расчетной сетки предполагают, что средние по ячейке результаты, скорее всего, соответствуют сельской местности. Видно, что несмотря на большие размеры ячеек сетки, рассчитанные среднесуточные объемные концентрации озона близки к результатам наблюдений в городах. Моделирование с более высоким пространственно-временным разрешением, планируемое в следующих работах, позволит уточнить оценки качества модели и перспективы ее применения в Беларуси для пространственной детализации поля приземного озона.

**Заключение.** Анализ результатов наблюдений за приземным озоном, аэрозолями, погодой и концентрациями антропогенных загрязнений позволяет сделать вывод, что основной причиной резкого уменьшения амплитуды суточного хода приземного озона в городах Беларуси во второй декаде апреля 2019 г. явилось повсеместное снижение концентраций прекурсоров озона. В свою очередь причиной указанного снижения оказалось уменьшение вертикальной устойчивости атмосферы в этот период, способствовавшее рассеянию антропогенных загрязнений в атмосфере и снижению их концентраций в приземном слое воздуха. Изменение интенсивности солнечного излучения, вызванное сложной аэрозольной обстановкой, не играло определяющей роли, а вопрос о влиянии аэрозолей на химию приземного озона требует дальнейшего изучения.

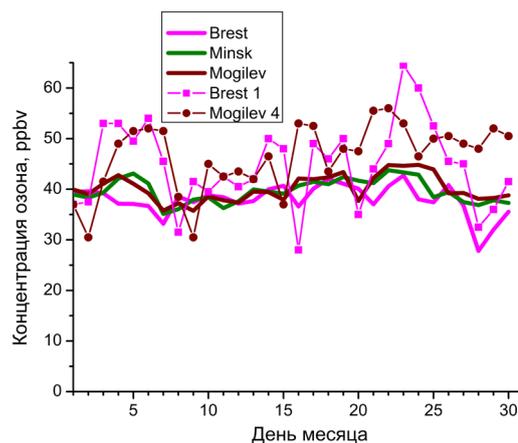


Рис. 9. Сравнение модельных среднесуточных объемных концентраций озона для ячеек, включающих Брест, Минск и Могилев, с результатами наблюдений в Бресте и Могилеве. Апрель 2019 г.

В работах [25, 26] были определены коэффициенты уравнения регрессии, аппроксимирующие зависимость концентрации приземного озона от метеоусловий и концентраций некоторых антропогенных загрязнений, а в [27] показаны примеры расчета концентрации озона в различных городах и в разные годы и их сравнение с результатами наблюдений. Здесь уместно привести аналогичное сравнение с наблюдениями в апреле 2019 г. в Бресте и Могилеве – городах, где имеется полная информация об используемых объясняющих переменных уравнения регрессии (рис. 10).

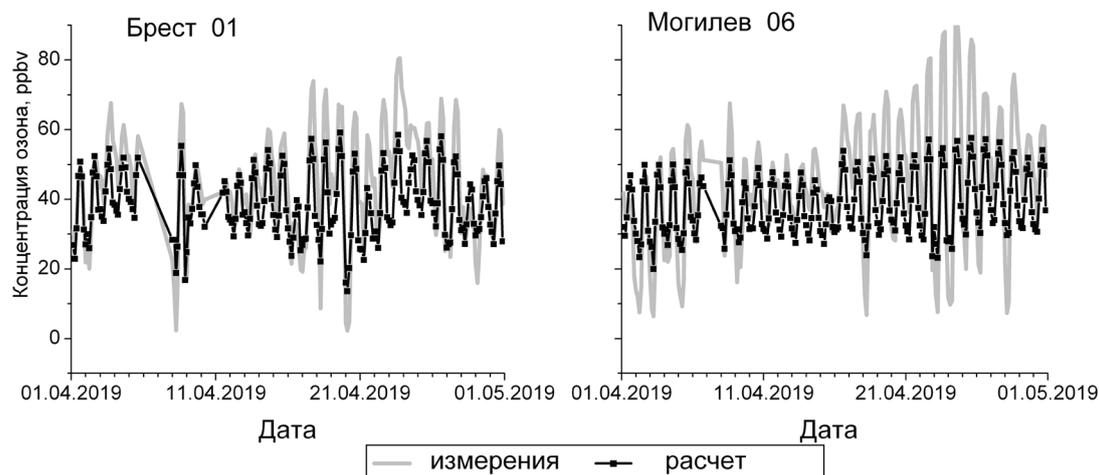


Рис. 10. Сравнение результатов наблюдений в Бресте (пункт 01) и Могилеве (пункт 06) с расчетами по уравнению регрессии [25, 26]. Апрель 2019 г.

Как видно из рис. 10, расчеты вполне удовлетворительно согласуются с данными наблюдений во второй декаде месяца. Однако, хотя расчеты и показывают некоторое увеличение амплитуды суточного хода озона в первой и третьей декадах, увеличение явно не «дотягивает» до результатов наблюдений. Можно заключить, что полученное уравнение регрессии «чувствует» произошедшие изменения, влияющие на приземный озон, но этой чувствительности недостаточно для адекватного описания ситуации. Вероятные причины детально обсуждаются в работе [27], и одной из таких причин является возможное влияние аэрозольных частиц на химические процессы генерации и разрушения озона [2].

### Список использованных источников

1. AERONET [Electronic resource]. – Mode of access: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>. – Date of access: 07.06.2019.
2. Marathe, S. A. Multiple Regression Analysis of Ground level Ozone and its Precursor Pollutants in Coastal Mega City of Mumbai, India / S. A. Marathe, S. Murthy, N. Gosawi, M. Herlekar // *MOJ Eco Environ Sci.* – 2017. – Vol. 2, N 6: 00041. DOI: 10.15406/mojes.2017.02.00041
3. FIRMS [Electronic resource]. – Mode of access: <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms>. – Date of access: 13.06.2019.
4. HYSPLIT [Electronic resource]. – Mode of access: [https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php). – Date of access: 11.08.2019.
5. Clapp, L. J. Analysis of the relationship between ambient levels of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and NO as a function of NO<sub>x</sub> in the UK / L. J. Clapp, M. E. Jenkin // *Atmospheric Environment.* – 2001. – Vol. 35. – P. 6391–6405.
6. The role of local urban traffic and meteorological conditions in air pollution: A data-based case study in Madrid, Spain / I. Laña [et al.] // *Atmospheric Environment.* – 2016. – Vol. 145. – P. 424–438. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.052>
7. Finardi, S. Systematic analysis of meteorological conditions causing severe urban air pollution episodes in the Central Po valley / S. Finardi, U. Pellegrini // In: Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Proceedings of the 9th Int. Conf. on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Garmisch-Partenkirchen (Germany). – 2004. – P. 250–254.
8. Verma, S. S. Effect of Meteorological Conditions on Air Pollution of Surat City / S. S. Verma, B. Desai // *Journal of International Environmental Application & Science.* – 2008. – Vol. 3, N 5. – P. 358–367.
9. Суточный ход концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов Беларуси / В. В. Божкова [и др.] // *Природные ресурсы.* – 2018. – № 2. – С. 79 – 87.

10. *Sillman, S.* Tropospheric ozone, smog and ozone-NO<sub>x</sub>-VOC sensitivity / S. Sillman // *Treatise on Geochemistry*. – 2003. – Vol. 9. – P. 407–431. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/09053-8>
11. *Avinio, P.* Mechanism of smog photochemical formation in the urban area of Rome / In: Zerefos, C. S. (Ed.), *Proceedings of the Quadrennial Ozone Symposium, Kos (Greece)*. – 2004. – P. 936–937.
12. *Analysis of the Relationship between O<sub>3</sub>, NO and NO<sub>2</sub> in Tianjin, China* / S. Han [et al.] // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2011. – Vol. 11. – P. 128–139. doi: 10.4209/aaqr.2010.07
13. GEOS-Chem Model [Electronic resource]. – Mode of access: <http://acmg.seas.harvard.edu/geos>
14. Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation / I. Bey [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2001. – Vol. 106. – P. 23073–23096.
15. GEOS-5 system [Electronic resource]. – Mode of access: <http://gmao.gsfc.nasa.gov/systems/geos5/>
16. GEOS-Chem – HEMCO [Electronic resource]. – Mode of access: <http://wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php/HEMCO>
17. A Community Emissions Data System (CEDS) for Historical Emissions // Global Joint Change Research Institute [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.globalchange.umd.edu/ceds/>
18. POET, a database of surface emissions of ozone precursors [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.aero.jussieu.fr/projet/ACCENT/POET.php>
19. *Stettler, M. E. J.* Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions / M. E. J. Stettler, S. Eastham, S. R. H. Barrett // *Atmos. Environ.* – 2011. – Vol. 45. – P. 5415–5424. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.012
20. Revisiting global fossil fuel and biofuel emissions of ethane / Z. A. Tzompa-Sosa [et al.] // *J. G. R. Atmosphere*. – 2017. – Vol. 122. – P. 2493–2512. doi.org/10.1002/2016JD025767
21. The global budget of ethane and regional constraints on U.S. sources / Y. Xiao [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113. D21306, doi:10.1029/2007JD009415
22. *Yevich, R.* An assesment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world / R. Yevich, J. A. Logan // *Global Biogeochem. Cycles*. – 2003. – Vol. 17. – P. 1095. doi:10.1029/2002GB001952.
23. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000 / T. C. Bond [et al.] // *Global Biogeochem. Cycles*. – 2007. – Vol. 21. – GB2018. doi: 10.1029/2006GB002840
24. GFED – Global Fire Emissions Database [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.globalfiredata.org>
25. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон / А. М. Людчик [и др.] // *Природные ресурсы*. – 2015. – № 1. – С. 95–105.
26. Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси / В. В. Божкова [и др.] // *Природные ресурсы*. – 2019. – № 2. – С. 98–107.
27. *Божкова, В. В.* Флуктуации 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.

Поступила 16.07.2020