ГИДРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

HYDROLOGY AND CLIMATOLOGY

УДК 551.58, 551.510.534 https://doi.org/10.5281/zenodo.14720807

Акимов А.Н.[1], Людчик А. М.[1], Метельская Н.С.[2], Чайковский А.П.[2], Трусов А.В.[3], Мельник Е.А.[3], Сидоркина Е.И.[1], Яротов А.Е.[1], Мурашко О.А.[1], Туболев В.А.[1], Дорожко Н.В.[1], Светашев А.Г.[1]

[1]Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Минск, Беларусь
[2]Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь
[3]Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, Минск, Беларусь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ НАЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ БЕЛАРУСИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПОВЕДЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА

Аннотация. *С использованием данных Национальной системы мониторинга окружающей среды анализируется необычное поведение приземного озона в городах Беларуси в апреле 2019 года: в первой и третьей декадах месяца амплитуда суточного хода озона была высока 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, приведшее 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*

Akimov A.N.[1], Liudchik A.M.[1], Metelskaya N.S.[2], Chaikovsky A.P.[2], Trusov A.V.[3], Melnik E.A.[3], Sidorkina E.I.[1], Yarotau A.E.[1], Murashka A.A.[1], Tuboleu V.A.[1], Dorozko N.V.[1], Svetashev A.G[1].

[1]National Ozone Monitoring Research Centre of Belarusian State University, Minsk, Belarus
[2]Institute of Physics of the Belarusian National Academy of Sciences, Minsk, Belarus
[3]Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Pollution Control and Environmental Monitoring, Minsk, Belarus

USE OF DATA FROM THE NATIONAL ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM OF BELARUS IN STUDIES OF THE BEHAVIOR OF GROUND-LEVEL OZONE

Abstract. *Using data from the National Environmental Monitoring System, the unusual behavior of ground-level ozone in Belarusian cities in April 2019 is analyzed: the first and third decades of the month were featured by 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.

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

Введение и постановка проблемы. В Республиканском центре по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды Республики Беларусь уже более 30 лет действует Национальная система мониторинга окружающей среды (НСМОС) [4]. Одним из важнейших направлений ее деятельности является мониторинг атмосферного воздуха на территории Республики.

Мониторинг атмосферного воздуха представляет собой систему наблюдений за состоянием атмосферного воздуха, а также оценку и прогноз основных тенденций изменения качества атмосферного воздуха. Объектами наблюдений являются атмосферный воздух, атмосферные осадки и снежный покров. Наблюдения за состоянием атмосферного воздуха проводятся в 19 промышленных городах республики, включая областные центры, города Полоцк, Новополоцк, Орша, Бобруйск, Мозырь, Речица, Светлогорск, Пинск, Жлобин, Лида, Солигорск, Барановичи и Борисов, а также район Мозырского промузла (д. Пеньки) и станцию фонового мониторинга Березинский биосферный заповедник. Сеть наблюдений за состоянием атмосферного воздуха включает 67 пунктов наблюдений, из которых 16 автоматических станций, позволяющих получать информацию о содержании в воздухе приоритетных загрязняющих веществ в режиме реального времени.

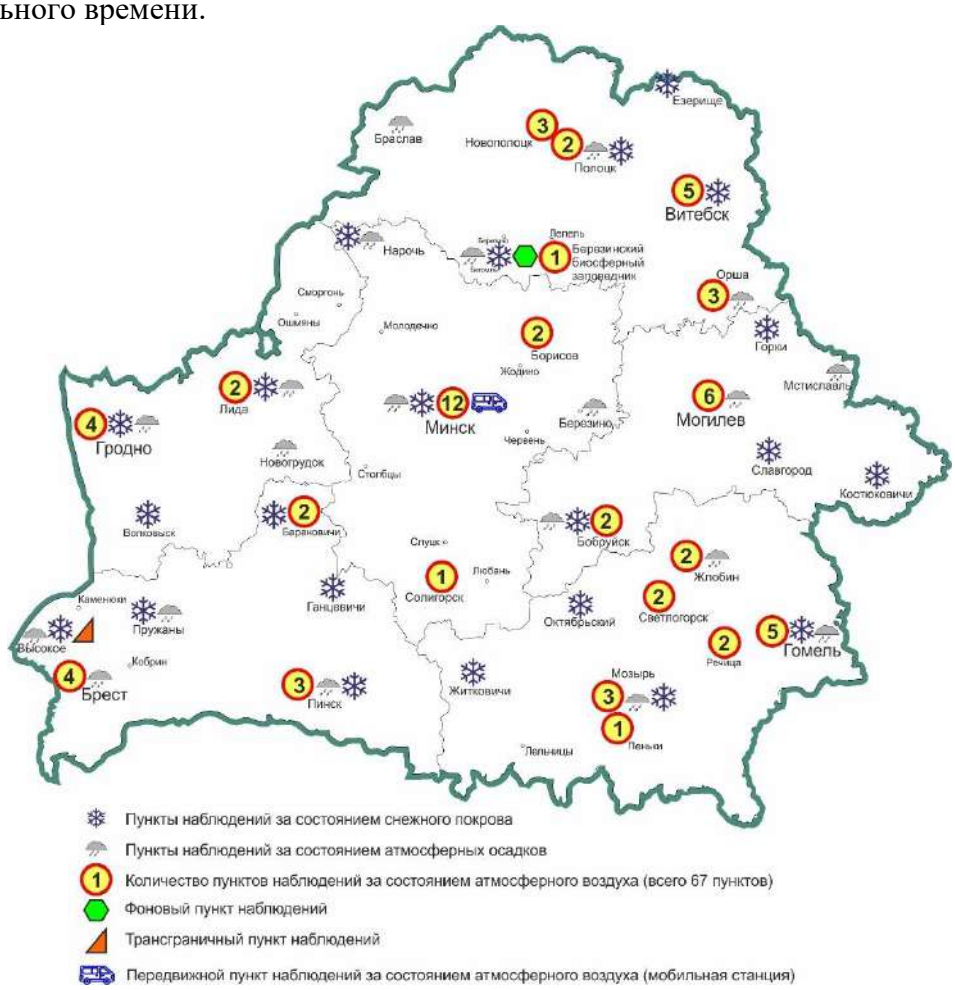


Рис. 1. Пункты наблюдений Республики Беларусь

Результаты наблюдений регулярно публикуются, используются многими белорусскими научными организациями для проведения исследований, выявления закономерностей и разработки новых подходов к улучшению качества воздуха на территории Республики. В частности, в исследованиях приземного озона, определения его климатологии, разработки прогнозов его поведения в связи с меняющимися климатом и уровнем антропогенного загрязнения воздуха активно участвуют учреждения Национальной академии наук РБ (Институт природопользования, Институт физики) и Министерства образования (Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы Белгосуниверситета (ННИЦ МО)).

В данной публикации приводятся результаты использования данных НСМОС для анализа необычного поведения приземного озона на территории страны в апреле 2019 г.

Изученность проблемы. В названный период наблюдения за приземным озоном 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. 2). Цифры у городов обозначают номера пунктов, где проводились измерения.

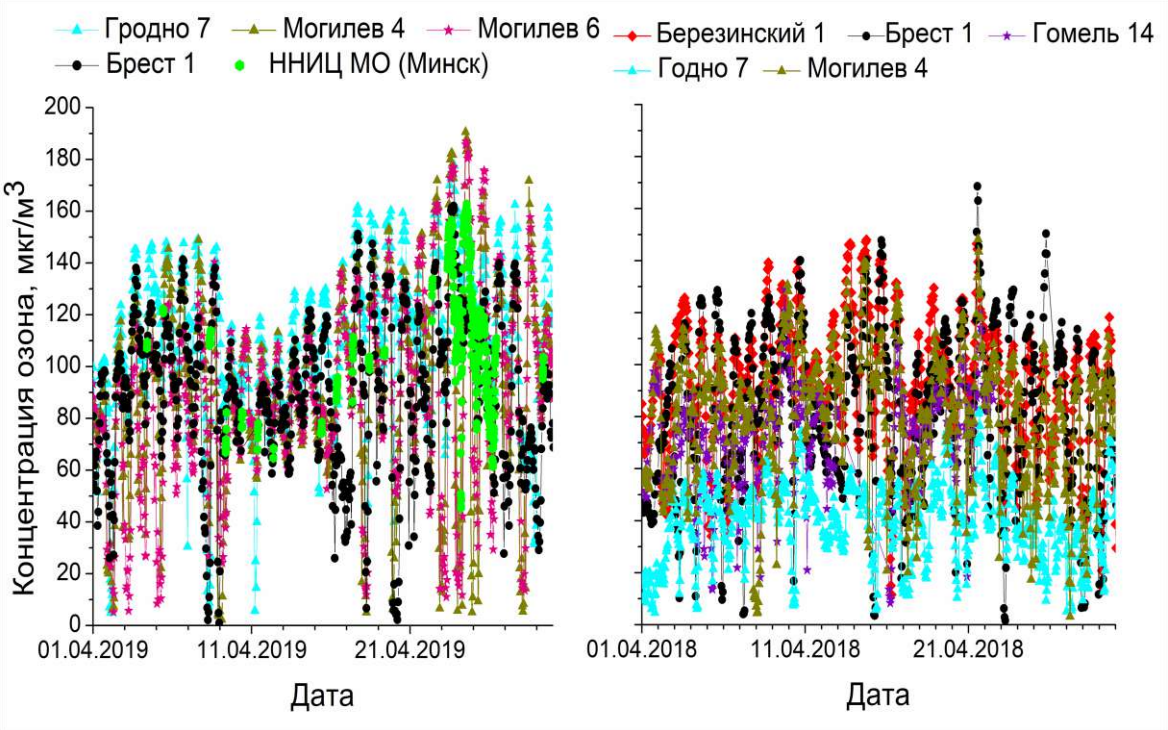


Рис. 2. Концентрация приземного озона, зарегистрированная в апреле 2019 г. в городах Беларуси. Для сравнения приведены данные наблюдений за апрель 2018 г.

В этот период также существенно изменялась оптическая толщина атмосферных аэрозолей вследствие переноса пыли из Северной Африки или пожаров в Беларуси и близких к ней регионах. Результаты измерений аэрозольной оптической толщины на длине волны 380 нм на минской станции AERONET [6] показаны на рис. 3. 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.

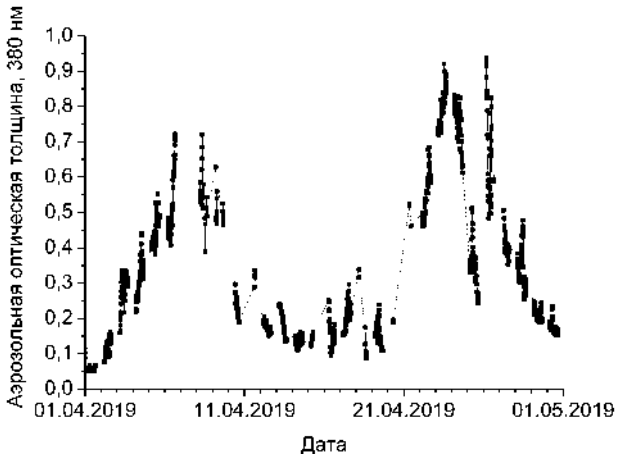


Рис. 3. Аэрозольная оптическая толщина на длине волны 380 нм в апреле 2019 г. над Минском

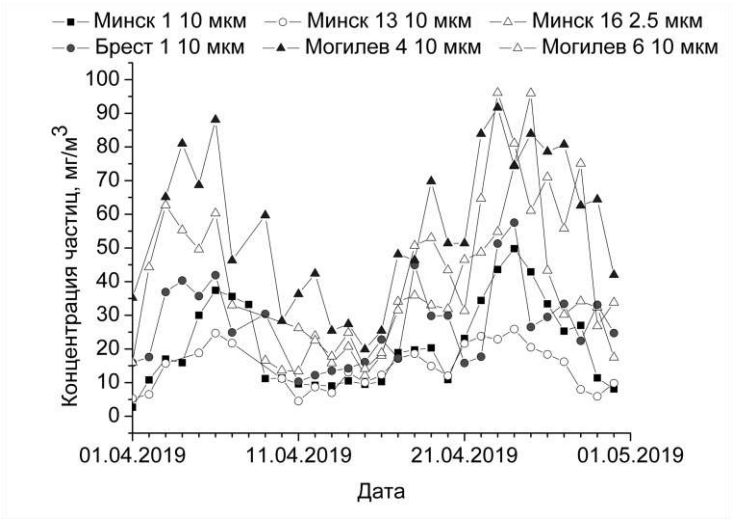
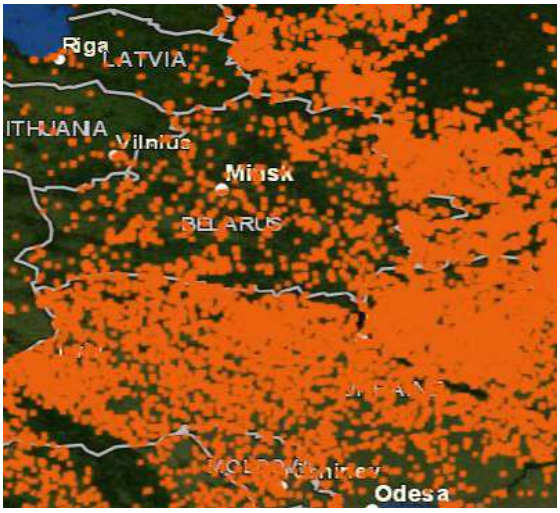


Рис. 4. Среднесуточные концентрации твердых частиц в апреле 2019 г. в приземном воздухе в г. Минске, Бресте и Могилеве. Указаны номера пунктов наблюдений и размеры регистрируемых частиц

Аэрозольные частицы также способны принимать участие в химических процессах с участием озона и таким образом влиять на его концентрацию [20]. Концентрации твердых аэрозольных частиц у поверхности земли в апреле 2019 г. по данным пунктов мониторинга атмосферного воздуха Гидромета в Минске, Бресте и Могилеве также снижаются во второй декаде месяца, как и аэрозольная оптическая толщина атмосферы (рис. 4). Это косвенно свидетельствует о том, что оптическая толщина аэрозолей в течение месяца над всей территорией Беларуси изменялась приблизительно так же, как и в Минске.

Рис. 5 демонстрирует активность пожаров [12] – возможных источников увеличения аэрозольной оптической толщины – на территории Беларуси и в прилегающих регионах. Судить о роли пожаров и переноса африканской пыли можно только с учетом направления движения воздуха в планетарном слое атмосферы. Данные о расчетах обратных траекторий движения воздуха в приземном слое атмосферы в первой, второй и третьей декадах апреля приведены на рис. 6.

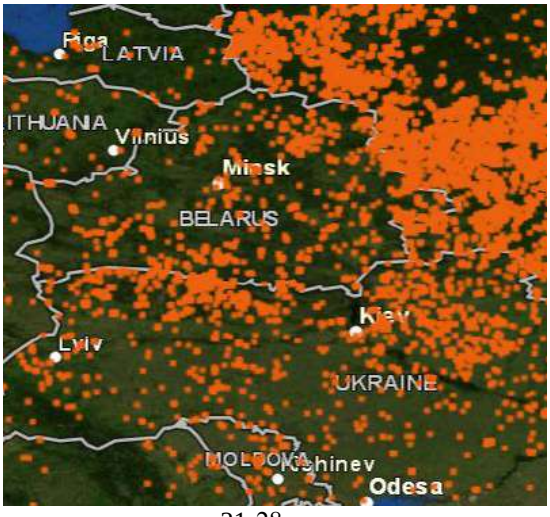
Безусловно, на концентрацию приземного озона (по крайней мере, на ее региональную составляющую [11]) влияет природа воздушной массы, находящейся над территорией страны. Существенную роль в формировании наблюдаемой концентрации приземного озона играют также метеорологические условия в месте наблюдений [19, 24].



02-09 апреля

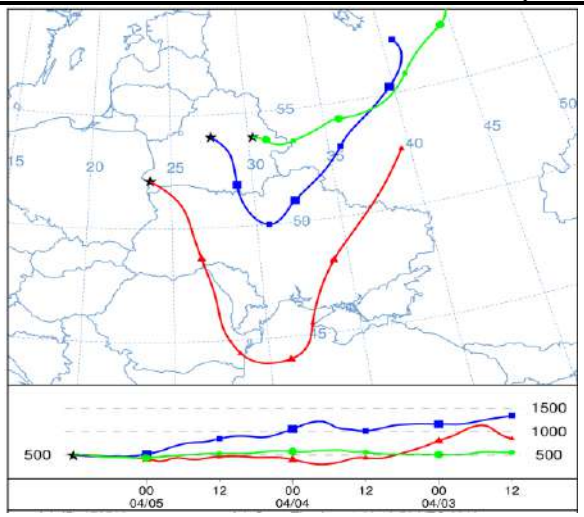


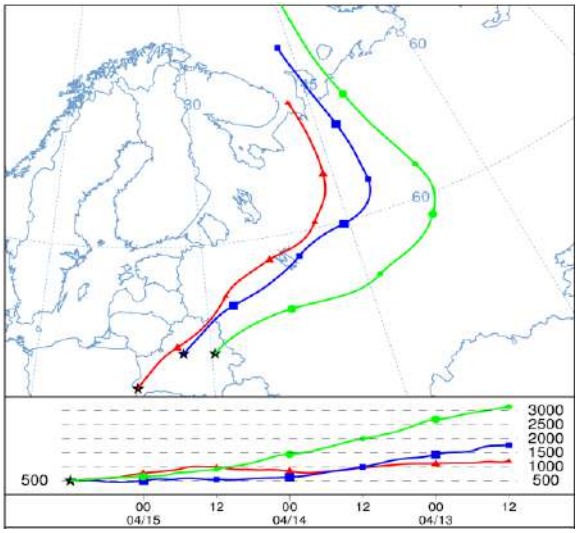
11-18 апреля



21-28 апреля

Рис. 5. Интенсивность пожаров в апреле 2019 г.





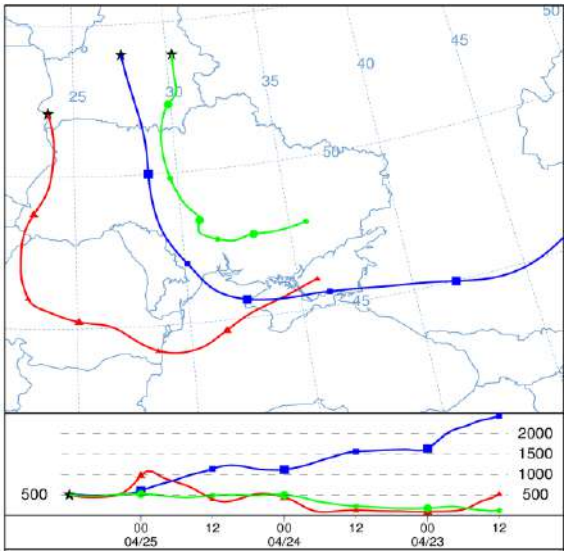


Рис. 6. Обратные траектории движения воздуха в апреле 2019 г. для Бреста, Минска и Могилева

И, наконец, 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 [2, 7, 17]. 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 целая совокупность возможных причин наблюденного в апреле 2019 г. поведения приземного озона.

Цель и задачи работы. В данной публикации мы постараемся ответить на три вопроса:

1. В чем причина увеличения аэрозольной оптической толщины в первой и третьей декадах апреля и ее снижения во второй?
2. Являлось ли увеличение аэрозольного загрязнения причиной столь странного поведения приземного озона?
3. Что явилось причиной изменений концентрации приземного озона в течение месяца?

Материалы и методы. Далее последовательно рассматриваются все доступные хотя бы для приближенного анализа гипотезы о возможных причинах событий, и обсуждается 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 городом Минском, поскольку именно здесь измерялась оптическая толщина аэрозолей. Однако в Минске в апреле не проводились измерения концентрации приземного озона за исключением непродолжительных измерений в ННИЦ МО, но имеются данные о погоде и других загрязнителях атмосферы. Поэтому были рассмотрены также Брест и Могилев – города, где в апреле пункты мониторинга атмосферного воздуха регистрировали всю совокупность загрязнений: твердые частицы, CO, NO_2, NO, летучие органические соединения (ЛОС: бензол, толуол, ксилол) и приземный 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. 6). 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 удается. 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. следующий раздел) коррелирует с увеличением аэрозольного загрязнения. По крайней мере, это так 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 пыли из пустыни Сахара, 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 Гидромета среднемесячная температура воздуха в апреле 2019 была на 0,5-2,5 град. Выше климатической нормы. Таким теплым апрель бывает в среднем один раз в 10 лет.

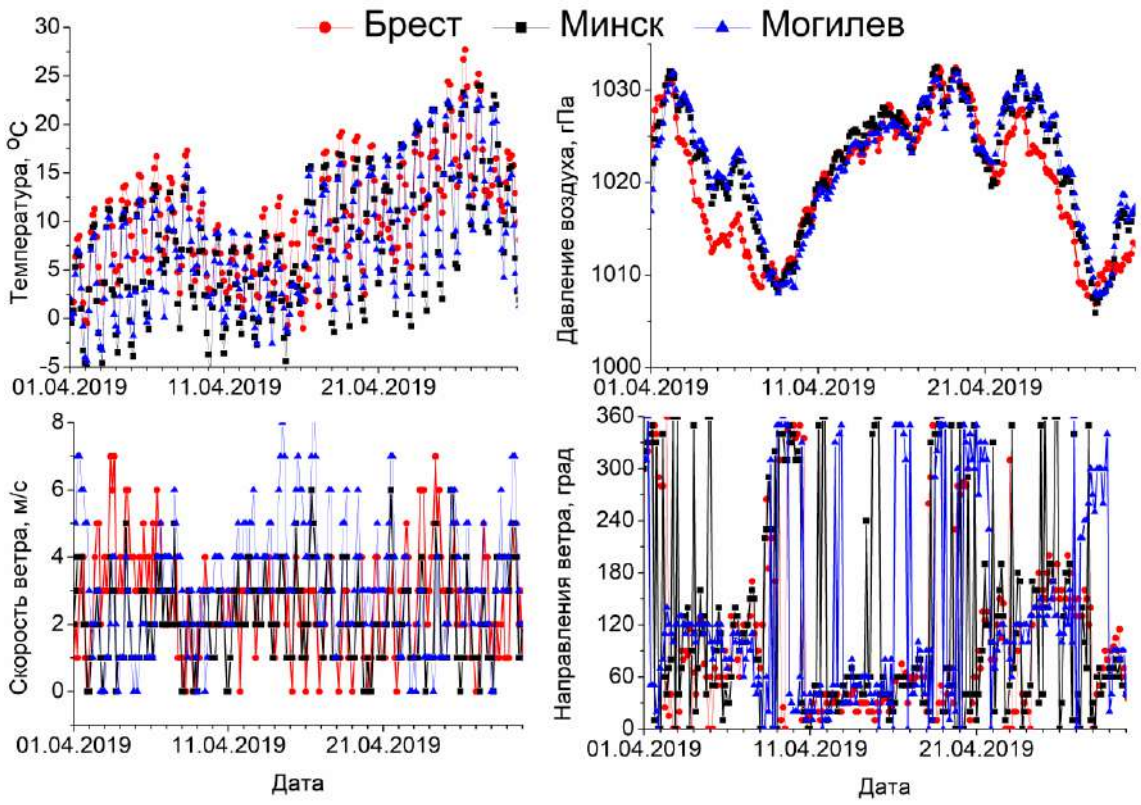


Рис. 7. Температура воздуха, давление, скорость и направление ветра в Бресте, Минске и Могилеве. Апрель 2019 г.

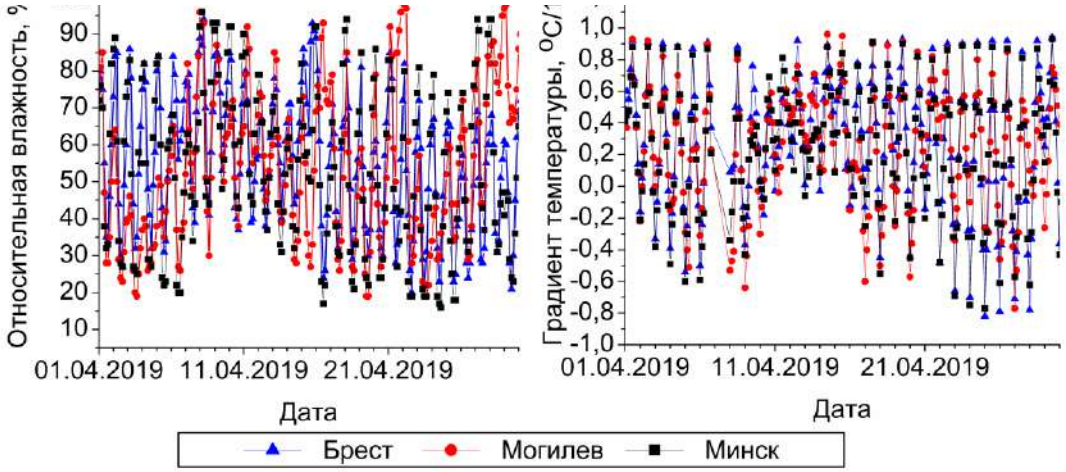


Рис. 8. Относительная влажность воздуха и вертикальный градиент температуры в планетарном пограничном слое в Бресте, Минске и Могилеве. Апрель 2019 г.

В апреле 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 горимости лесов). Более детальные сведения о погоде приведены в табл.1 и на рис. 7-8.

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. Разве что 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 градусов), во - второй северо-восточное (менее 60 градусов).

Относительная влажность воздуха (рис. 8) не претерпела за месяц существенных изменений, а небольшое ее увеличение в дневное время во второй декаде (на графике относительной 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 [14] 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. 8, 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. 9. 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 и их обсуждение. 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 солнечного 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.

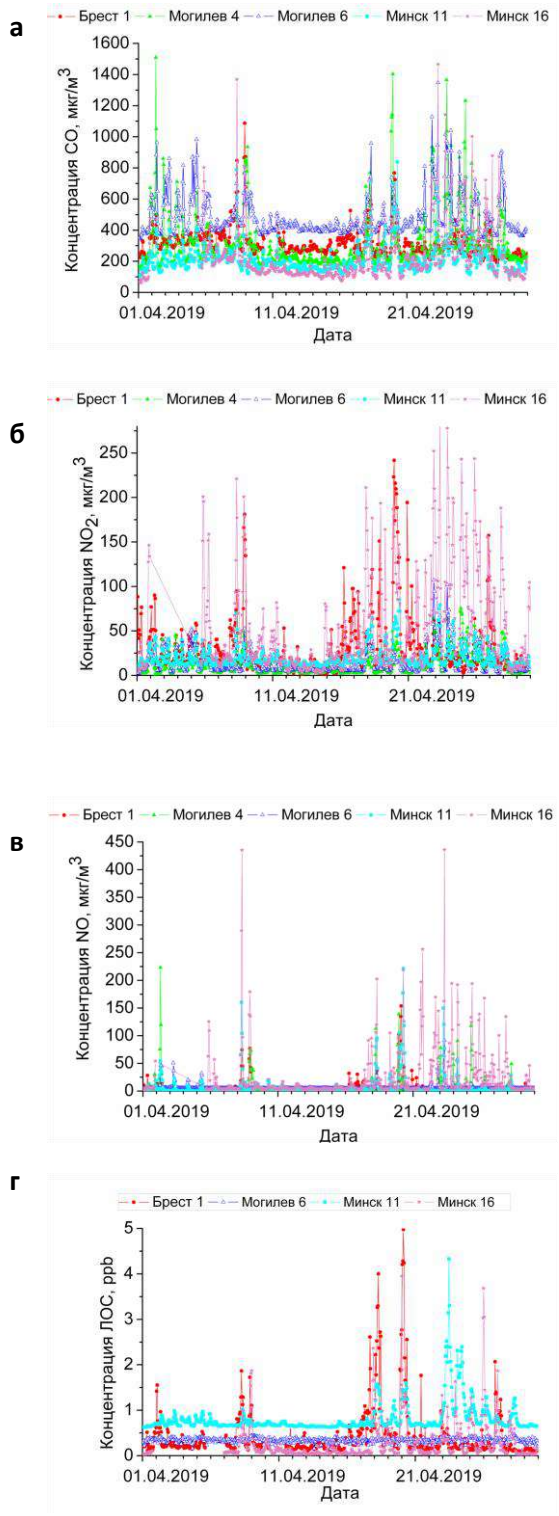


Рис. 9. Концентрации CO (а), NO_2 (б), NO (в) и ЛОС (г) в Бресте, Могилеве и Минске. Апрель 2019

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 учётом химических превращений). Одной из наиболее известных химико-транспортных моделей является GEOS-Chem [8, 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.

Расчётная 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° по широте, 0.3125° по долготе. Данные могут быть усреднены на сетки с более крупными ячейками в целях сокращения вычислительных затрат. Атмосфера по вертикали разбивается на 72 слоя. Для оптимизации расчётов 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.

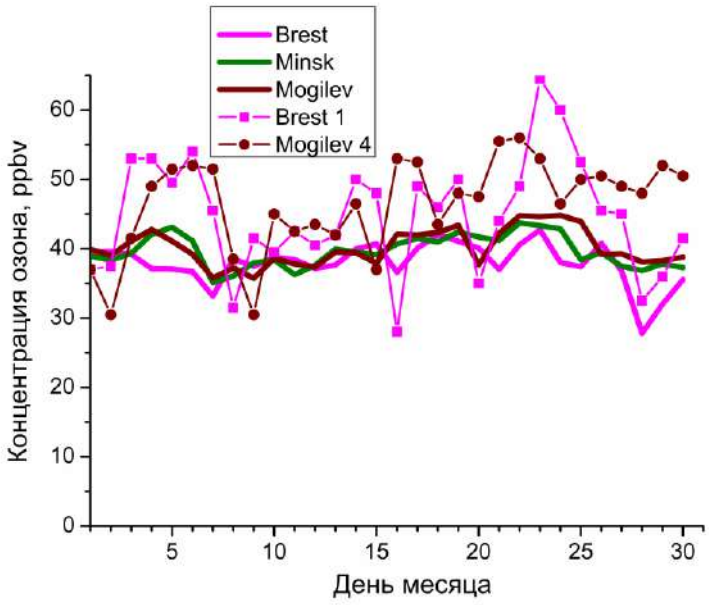


Рис. 10. Сравнение модельных среднесуточных объёмных концентраций озона для ячеек, включающих Брест, Минск и Могилев, с результатами наблюдений в Бресте и Могилеве. Апрель 2019 г.

Нами проведены расчёты среднесуточной объёмной концентрации (объёмной доли) озона, усреднённой по приземному слою атмосферы (приблизительно до 100 м по вертикали) и по ячейкам 2 ° x 2.5 °. Расчёты выполнялись по версии v12-01 (одна из наиболее полных и современных) модели GEOS-Chem. Использованы базы данных поступления химических компонентов и аэрозолей в атмосферу модуля HEMCO (Harvard-NASA Emissions Component) [13], адаптированные для модели GEOS-Chem, в том числе глобальные базы данных антропогенных выбросов CEDS (Community Emissions Data System) [10], POET [21], AEIC (Aircraft Emissions Inventory Code) [21], TZOMPA [22], XIAO [24], BIOFUEL [25], BOND [9], выбросов в результате горения биомассы GFED (Global Fire Emissions Database) [16]. 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 городах Брест и Могилев (рис. 10). Большие

размеры ячеек расчётной сетки предполагают, что средние по ячейке результаты, скорее всего, соответствуют сельской местности. Видно, что, несмотря на большие размеры ячеек сетки, рассчитанные среднесуточные объёмные 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.

Выводы. 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.

В [1, 5] были определены коэффициенты уравнения регрессии, аппроксимирующего зависимость концентрации приземного озона от метеоусловий и концентраций некоторых антропогенных загрязнений, а в [3] показаны примеры расчета концентрации озона в разных городах 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. 11).

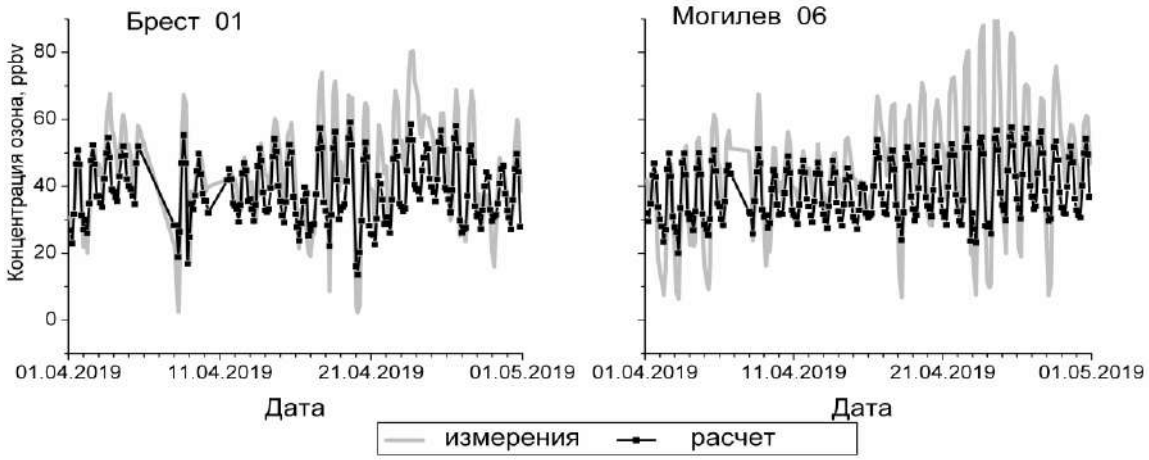


Рис. 11. Сравнение результатов наблюдений в Бресте (пункт 01) и Могилеве (пункт 06) с расчетами по уравнению регрессии [24, 25]. Апрель 2019

Как видно из рисунка, 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, однако этой чувствительности недостаточно для адекватного описания ситуации. Вероятные причины детально обсуждаются в [3], и одной из таких причин является возможное влияние аэрозольных частиц на химические процессы генерации и разрушения озона [20].

Использованная литература:

1. Божкова, В.В [и др.]. Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси // Природные ресурсы. 2019. № 2. С. 98–107.

2. Божкова В. В. [и др.] Суточный ход концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городов Беларуси // Природные ресурсы. 2018. № 2. С. 79–87.

3. Божкова, В.В, Людчик А.М., Мельник Е.А. Флуктуации поля приземного озона в Беларуси, обусловленные метеорологическими условиями и антропогенным загрязнением воздуха // Природные ресурсы. 2020. № 1. С. 80–91.

4. ГИАЦ НСМОС – Главный информационно-аналитический центр национальной системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. – URL: http://www.nsmos.by (дата обращения: 07.01.2019).

5. Людчик А.М. [и др.] Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон // Природные ресурсы. 2015. № 1. С. 95–105.

6. AERONET [Electronic resource]: URL: https://aeronet.gsfc.nasa.gov (date of access: 07.06.2019)

7. Avino 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.

8. Bey I. [et al.] Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 23073–23096.

9. Bond, T.C. [et al.] Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000 // Global Biogeochem. Cycles. 2007. Vol. 21. GB2018, doi: 10.1029/2006GB002840.

10. CEDS – A Community Emissions Data System for Historical Emissions // Global Joint Change Research Institute [Electronic resource]. URL: http://www.globalchange.umd.edu/ceds/ (date of access: 07.01.2019)

11. Clapp L. J., Jenkin M.E. Analysis of the relationship between ambient levels of O_3, NO_2 and NO as a function of NO_x in the UK // Atmospheric Environment. 2001. Vol. 35. P. 6391–6405.

12. FIRMS [Electronic resource]. URL: https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms (date of access: 07.01.2019)

13. GEOS-Chem – HEMCO [Electronic resource]. URL: http://wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php/HEMCO (date of access: 07.01.2019).

14. GEOS-Chem Model [Electronic resource]. URL: http://acmg.seas.harvard.edu/geos (date of access: 07.01.2019).

15. GEOS-5 system [Electronic resource]. URL: http://gmao.gsfc.nasa.gov/systems/geos5/ (date of access: 07.01.2019).

16. GFED – Global Fire Emissions Database [Electronic resource]. URL: http://www.globalfiredata.org (date of access: 07.01.2019).

17. Han S. [et al.] Analysis of the Relationship between O_3, NO and NO_2 in Tianjin, China // Aerosol and Air Quality Research. 2011. Vol. 11. P. 128–139. doi: 10.4209/aaqr.2010.07.

18. Laña I. [et al.] The role of local urban traffic and meteorological conditions in air pollution: A data-based case study in Madrid, Spain // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 145. P. 424–438. http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.052.

19. Marathe S.A., Murthy S., Gosawi N., Herlekar M. Multiple Regression Analysis of Ground level Ozone and its Precursor Pollutants in Coastal Mega City of Mumbai, India // MOJ Eco Environ Sci. 2017. Vol. 2. No 6: 00041. DOI: 10.15406/mojes.2017.02.00041.

20. POET, a database of surface emissions of ozone precursors [Electronic resource]. URL: http://www.aero.jussieu.fr/projet/ACCENT/POET.php. (date of access: 07.08.2019).

21. Stettler, M.E.J., Eastham S., Barrett S.R.H. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions // Atmos. Environ. 2011. Vol. 45. P. 5415–5424, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.012.

22. Tzompa-Sosa Z.A. [et al.] Revisiting global fossil fuel and biofuel emissions of ethane // J.G.R. Atmosphere. 2017. Vol. 122. P. 2493–2512, doi.org/10.1002/2016JD025767.

23. Verma, S.S., Desai B. Effect of Meteorological Conditions on Air Pollution of Surat City // Journal of International Environmental Application & Science. 2008. Vol. 3. No. 5. P. 358–367.

24. Xiao Y. [et al.] The global budget of ethane and regional constraints on U.S. sources // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113, D21306, doi:10.1029/2007JD009415.

25. Yevich, R., Logan J.A. An assesment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world // Global Biogeochem. Cycles. 2003. Vol. 17. 1095, doi:10.1029/2002GB001952.

References:

1. Bozhkova V.V. [et al.] (2019), Climatic norm of ground-level ozone in the clean atmosphere of Belarus, *Natural Resources*, No. 2, pp. 98–107. (In Russ.).

2. Bozhkova V.V. [et al.]. (2018), Daily variation of pollutant concentrations in the atmospheric air of Belarusian cities, *Natural Resources*, No. 2, pp. 79–87. (In Russ.).

3. Bozhkova V.V., Lyudchik A.M., Melnik E.A. (2020), Fluctuations of the ground-level ozone field in Belarus caused by meteorological conditions and anthropogenic air pollution, *Natural Resources*, No. 1, pp. 80–91. (In Russ.).

4. GIAC NSMOS – Main information and analytical center of the National environmental monitoring system in the Republic of Belarus [Electronic resource]. URL: http://www.nsmos.by (date of access: 07.01.2019).

5. Lyudchik A.M. [et al.] (2015), Statistical assessment of anthropogenic impact on ground-level ozone, *Natural Resources*, No. 1, pp. 95–105. (In Russ.).

6. AERONET [Electronic resource]: URL: https://aeronet.gsfc.nasa.gov (date of access: 07.06.2019)

7. Avino 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.

8. Bey I. [et al.] Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106. P. 23073–23096.

9. Bond, T.C. [et al.] Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000 // Global Biogeochem. Cycles. 2007. Vol. 21. GB2018, doi: 10.1029/2006GB002840.

10. CEDS – A Community Emissions Data System for Historical Emissions // Global Joint Change Research Institute [Electronic resource]. URL: http://www.globalchange.umd.edu/ceds/ (date of access: 07.01.2019)

11. Clapp L. J., Jenkin M.E. Analysis of the relationship between ambient levels of O_3, NO_2 and NO as a function of NO_x in the UK // Atmospheric Environment. 2001. Vol. 35. P. 6391–6405.

12. FIRMS [Electronic resource]. URL: https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data/firms (date of access: 07.01.2019)

13. GEOS-Chem – HEMCO [Electronic resource]. URL: http://wiki.seas.harvard.edu/geos-chem/index.php/HEMCO (date of access: 07.01.2019).

14. GEOS-Chem Model [Electronic resource]. URL: http://acmg.seas.harvard.edu/geos (date of access: 07.01.2019).

15. GEOS-5 system [Electronic resource]. URL: http://gmao.gsfc.nasa.gov/systems/geos5/ (date of access: 07.01.2019).

16. GFED – Global Fire Emissions Database [Electronic resource]. URL: http://www.globalfiredata.org (date of access: 07.01.2019).

17. Han S. [et al.] Analysis of the Relationship between O_3, NO and NO_2 in Tianjin, China // Aerosol and Air Quality Research. 2011. Vol. 11. P. 128–139. doi: 10.4209/aaqr.2010.07.

18. Laña I. [et al.] The role of local urban traffic and meteorological conditions in air pollution: A data-based case study in Madrid, Spain // Atmospheric Environment. 2016. Vol. 145. P. 424–438. http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.052.

19. Marathe S.A., Murthy S., Gosawi N., Herlekar M. Multiple Regression Analysis of Ground level Ozone and its Precursor Pollutants in Coastal Mega City of Mumbai, India // MOJ Eco Environ Sci. 2017. Vol. 2. No 6: 00041. DOI: 10.15406/mojes.2017.02.00041.

20. POET, a database of surface emissions of ozone precursors [Electronic resource]. URL: http://www.aero.jussieu.fr/projet/ACCENT/POET.php. (date of access: 07.08.2019).

21. Stettler, M.E.J., Eastham S., Barrett S.R.H. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions // Atmos. Environ. 2011. Vol. 45. P. 5415–5424, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.012.

22. Tzompa-Sosa Z.A. [et al.] Revisiting global fossil fuel and biofuel emissions of ethane // J.G.R. Atmosphere. 2017. Vol. 122. P. 2493–2512, doi.org/10.1002/2016JD025767.

23. Verma, S.S., Desai B. Effect of Meteorological Conditions on Air Pollution of Surat City // Journal of International Environmental Application & Science. 2008. Vol. 3. No. 5. P. 358–367.

24. Xiao Y. [et al.] The global budget of ethane and regional constraints on U.S. sources // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113, D21306, doi:10.1029/2007JD009415.

25. Yevich, R., Logan J.A. An assesment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world // Global Biogeochem. Cycles. 2003. Vol. 17. 1095, doi:10.1029/2002GB001952.

Сведения об авторах:

Акимов Александр Николаевич – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник. E-mail: alex_akimov@mail.ru

Людчик Александр Маркович – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), кандидат физико-математических наук, доцент. E-mail: liudchikam@tut.by

Метельская Наталья Сергеевна – Институт физики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Беларусь).

Чайковский Анатолий Павлович – Институт физики Национальной академии наук Беларуси (Минск, Беларусь), кандидат физико-математических наук.

Трусов Александр Владимирович – Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Минск, Беларусь).

Мельник Елена Александровна – Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (Минск, Беларусь).

Сидоркина Екатерина Игоревна – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь).

Яротов Алексей Евгеньевич – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), кандидат географических наук, доцент.

Мурашко Олег Артурович – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь).

Туболев Вадим Алексеевич – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск Беларусь).

Дорожко Наталья Васильевна – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь).

Светашев Александр Георгиевич – Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы, Белорусский государственный университет (Минск, Беларусь), кандидат физико-математических наук.

Information about the authors:

Aleksandr Akimov – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), PhD (physics and mathematics); senior researcher. E-mail: alex_akimov@mail.ru

Alexander Liudchik – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), PhD (physics and mathematics), associated professor. E-mail: liudchikam@tut.by

Natalia Metelskaya – Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus).

Anatoliy Chaykovskiy – Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus), PhD (physics and mathematics).

Aleksandr Trusov – Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Pollution Control and Environmental Monitoring (Minsk, Belarus).

Elena Melnik – Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Pollution Control and Environmental Monitoring (Minsk, Belarus).

Katsiaryna Cidorkina – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus).

Aliaksei Yarotau – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), PhD (geography), assosieted professor.

Aleh Murashka – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus).

Vadzim Tuboleu – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus).

Natalia Dorozko – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus).

Aleksandr Svetashev – National Ozone Monitoring Research Centre, Belarusian State University (Minsk, Belarus), PhD (physics and mathematics).

Для цитирования:

Акимов А.Н., Людчик А.М., Метельская Н.С., Чайковский А.П., Трусов А.В., Мельник Е.А., Сидоркина Е.А., Яротов А.Е., Мурашко О.А., Туболев В.А., Дорожко Н.В., Светашев А.Г. Использование данных Национальной системы мониторинга окружающей среды Беларуси в исследованиях поведения приземного озона // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2024. № 3-4. С. 64-78.

For citation:

Akimov A.N., Liudchik A.M., Metelskaya N.S., Chaikovsky A.P., Trusov A.V., Melnik E.A., Sidorkina E.I., Yarotau A.E., Murashka A.A., Tuboleu V.A., Dorozko N.V., Svetashev A.G. (2024), Use of data from The National environmental monitoring system of Belarus in studies of the behavior of ground-level ozone, *Central Asian Journal of Geographical Sciences*, No. 3-4, pp. 64-78. (In Russ.).