

В. В. Божкова¹, Л. М. Болотько¹, А. М. Людчик¹, П. Н. Павленко², С. Д. Умрейко¹

¹Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ, Минск, Беларусь, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by, umreiko@tut.by

²Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

КЛИМАТИЧЕСКАЯ НОРМА ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В ЧИСТОЙ АТМОСФЕРЕ БЕЛАРУСИ

На основании наблюдений за концентрациями приземного озона и антропогенных загрязнителей воздуха в городах определена климатическая норма приземного озона в условиях свободной от антропогенных загрязнений «чистой» атмосферы и среднего климата Беларуси. Предполагается, что именно такая норма должна служить «точкой отсчета» для учета влияния метеорологических и антропогенных факторов на приземный озон, а также оценки его долговременных изменений (тренда) в пределах небольшой по территории страны. Задача решается с помощью полученной ранее зависимости концентрации озона от метеорологических условий и концентраций антропогенных загрязнителей, контролируемых на пунктах мониторинга атмосферного воздуха, расположенных в областных центрах. Детально описаны методика расчетов и используемые приближения. Полученные результаты сравниваются с наблюдениями в Березинском биосферном заповеднике.

Ключевые слова: приземный озон, антропогенное загрязнение воздуха, климатическая норма, уравнение регрессии

V. V. Bozhkova¹, L. M. Bolotsko¹, A. M. Liudchik¹, P. N. Pavlenko², S. D. Umreiko¹

¹National Ozone Monitoring Research Centre of Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by, umreiko@tut.by

²Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

CLIMATIC NORM OF SURFACE OZONE IN CLEAR ATMOSPHERE OF BELARUS

Based on observations of concentrations of surface ozone and anthropogenic air pollutants in cities, the climatic normal of surface ozone was determined under conditions of Belarusian typical climate and "clear" atmosphere free from anthropogenic pollution. One has assumed that such a norm should serve as the "reference point" to take account of the influence of meteorological and anthropogenic factors on surface ozone and to assess its long-term changes (trend) over the country with a relatively small territory. The problem is addressed by using the previously revealed dependence of ozone concentration on meteorological conditions and on concentrations of anthropogenic pollutants being measured at the sites for monitoring atmospheric air located in the regional centers. The computation technique and approximations employed are both described in detail. The obtained results are compared to the observations conducted at the Berezinsky Biosphere Reserve.

Keywords: surface ozone, anthropogenic air pollution, climatic normal, regression equation

В. У. Бажкова¹, Л. М. Балацько¹, А. М. Людчык¹, П. М. Паўленка², С. Дз. Умрэйка¹

¹Нацыянальны навукова-даследчы цэнтр маніторынгу азонасферы БДУ, Мінск, Беларусь, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by, umreiko@tut.by

²Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь, e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

КЛІМАТЫЧНАЯ НОРМА ПРЫЗЕМНАГА АЗОНУ ў ЧЫСТАЙ АТМОСФЕРЫ БЕЛАРУСІ

На падставе назіранняў за канцэнтрацыямі прыземнага азону і антрапагенных забруджвальнікаў паветра ў гарадах вызначаная кліматычная норма прыземнага азону ва ўмовах свабоднай ад антрапагенных забруджванняў «чыстай» атмасферы і сярэдняга клімату Беларусі. Мяркуецца, што менавіта гэтая норма можа служыць зыходным пунктам для ўліку ўплыву метэаралагічных і антрапагенных фактараў на прыземны озон, а таксама ацэнкі яго доўгачасовых змяненняў (трэнду) у межах невялікай па тэрыторыі краіны. Задача вырашаецца з дапамогай атрыманай раней залежнасці канцэнтрацыі азону ад метэаралагічных умоў ды канцэнтрацыяў антрапагенных забруджвальнікаў, якія кантралююцца на станцыях маніторынгу атмасфернага паветра ў абласных гарадах. Дэталёва апісаныя метадыка разлікаў і выкарыстаныя прыбліжэнні. Атрыманая вынікі параўноўваюцца з вынікамі назіранняў у Бярэзінскім біясферным заповедніку.

Ключавыя словы: прыземны озон, антрапагеннае забруджванне паветра, кліматычная норма, ураўненне рэгрэсіі

Введение. Приземный озон является весьма опасным вторичным загрязнителем воздуха, оказывающим угнетающее воздействие на растительность и живые организмы. Его присутствие в приземном слое воздуха обусловлено фотохимическими реакциями с участием первич-

ных естественных и антропогенных загрязнителей атмосферы, а также вертикальным обменом воздухом за счет термической конвекции и турбулентного перемешивания с более высокими слоями тропосферы, содержащими озон стратосферного происхождения. Основным источником озона у поверхности земли является реакция фотохимического разложения диоксида азота и последующее соединение высвобожденного атома кислорода с молекулой кислорода [1–3]. В отсутствие оксидов азота генерация озона у поверхности земли невозможна и его наличие тогда можно объяснить только процессами переноса и вертикального обмена. На самом деле оксиды азота естественного и антропогенного происхождения всегда присутствуют в приземном воздухе, поэтому процессы генерации и разрушения озона при наличии солнечного излучения происходят повсеместно и это является одной из основных причин выраженного сезонного и суточного хода концентрации приземного озона.

Концентрация озона в месте наблюдений сильно зависит от наличия прекурсоров озона – загрязнителей атмосферы, взаимодействующих с озоном и способных стимулировать его генерацию. В связи с этим общепринятой является классификация пунктов наблюдений в зависимости от места их расположения: удаленные, сельские, пригородные и городские [4].

В то же время исследователи согласны с тем, что наблюдаемая разница в концентрациях озона на пунктах наблюдений разных типов (иногда расположенных достаточно близко друг к другу) обусловлена исключительно различиями в составе первичных загрязнителей и степени загрязнения воздуха [1, 5]. В связи с этим заслуживает внимания гипотеза об однородности поля приземного озона в пределах одной воздушной массы [7–9]. Местные различия в метеоусловиях и специфика естественных и антропогенных загрязнений, взаимодействующих с озоном, «модулируют» это поле, являясь причиной локальных флуктуаций концентрации озона относительно ее естественного суточного хода и основанием для упомянутой выше классификации пунктов наблюдений.

Сказанное согласуется с результатами исследований, представленных в [1, 10]: наблюдаемая концентрация «окислителя» $O_x = O_3 + NO_2$ включает в себя региональную и локальную компоненты, причем первая составляющая практически совпадает с региональным фоновым уровнем концентрации приземного озона (типичным для конкретной воздушной массы), а вторая составляющая коррелирует с уровнем локального загрязнения воздуха первичными загрязнителями, чаще всего антропогенного происхождения. Для региональной составляющей характерны такие особенности, как сезонный и суточный ход, очень похожие на наблюдаемые в местностях с низким уровнем антропогенного загрязнения воздуха. На протяжении всего года существует также сезонная и суточная изменчивость локальной составляющей, что отражает влияние на нее фотохимической активности солнечного излучения и изменчивости концентраций прекурсоров [1].

Согласно гипотезе [7–9], концентрации озона в пределах небольшой по сравнению с размерами воздушных масс территории страны должны чаще всего (за исключением случаев прохождения атмосферных фронтов) быть близкими, если из измеренных значений исключить влияние различающихся метеорологических условий и уровней антропогенного загрязнения воздуха в местах наблюдений. В частности, для Беларуси скорректированные на случай одинаковых метеоусловий – усредненные по территории климатических норм метеопараметров – значения концентрации озона в свободной от влияющих на озон локальных антропогенных загрязнений атмосфере должны быть репрезентативными для всей территории страны, по крайней мере в периоды, когда она находится под воздействием одной воздушной массы.

В связи с этим имеет смысл ввести в употребление и использовать на практике термин «климатическая норма приземного озона для чистой атмосферы и среднего климата Беларуси». Именно такая норма должна служить «точкой отсчета» для учета влияния метеорологических и антропогенных факторов на приземный озон, а также оценки его долговременных изменений (тренда).

Задача определения климатической нормы приземного озона в «чистой» атмосфере Беларуси могла бы быть легко решена при наличии достаточно длинных рядов измерений на разветвленной сети пунктов наблюдений, расположенных в сельской местности. Измерения

в таких условиях наиболее близко соответствуют предложенному определению. Оставалось бы только скорректировать их на случай «нормальных» метеорологических условий, отвечающих среднему климату страны.

Проблема, однако, заключается в том, что в настоящее время только один пункт, находящийся в Березинском биосферном заповеднике, может быть отнесен к категории сельских. К тому же ряды наблюдений в заповеднике пока весьма коротки и содержат значительные пропуски в качественных данных. Следует также отметить, что даже при наличии сети пунктов в сельской местности и достаточно длинных рядов наблюдений остается нерешенной задача учета различающихся в разных пунктах метеорологических условий, влияющих на измеряемые концентрации озона [5, 11, 12]. Возможно, такие различия чаще всего оказываются незначительными, однако концепция «чистой» нормы озона предполагает, что эта норма определяется для некоторых осредненных метеорологических условий, отличие которых от реально наблюдаемых в момент измерений может быть весьма существенным. Иными словами, в любом случае необходима коррекция результатов измерений концентрации озона с учетом отклонения реальных метеоусловий в пункте наблюдений от заданных средних.

В представленной публикации задача определения «чистой» климатической нормы приземного озона в Беларуси решается посредством коррекции данных наблюдений за озоном и антропогенными загрязнителями воздуха в областных городах Беларуси. Это весьма оригинальный подход к определению нормы озона в «чистой» атмосфере на основании измерений в заведомо «грязном» воздухе. Он стал возможен после решения задачи об отклонении наблюдаемой концентрации озона от его климатической нормы в зависимости от метеорологических условий и антропогенного загрязнения воздуха [8, 9]. Поскольку используемая в расчетах отклонений норма озона в «чистой» атмосфере заранее неизвестна, задача решается методом последовательных приближений. Полученные результаты сравниваются с данными наблюдений в Березинском биосферном заповеднике.

Обоснование подхода. Прежде всего следует четко определить используемый термин «чистая атмосфера». Выше говорилось об осредненных по территории страны метеорологических параметрах. Однако детальные (с учетом суточного хода) климатические нормы метеопараметров, отвечающие средним метеорологическим условиям на территории Беларуси, не известны, хотя их возможно получить. С другой стороны, совершенно не принципиально, какой конкретно заранее заданной погоде будет отвечать полученная «чистая» норма озона, если есть возможность учесть влияние реальных метеорологических условий и концентраций антропогенных загрязнений для оценки ожидаемой в данном месте концентрации озона. В данном исследовании в качестве «средних» с некоторыми изменениями использованы полученные в [13–15] климатические нормы метеопараметров для находящегося в центре страны г. Минска.

Понятие «чистой» атмосферы не подразумевает полное отсутствие прекурсоров озона. В частности, генерация приземного озона, инициированная солнечным излучением, происходит только в присутствии оксидов азота. И их концентрации всегда отличны от нуля даже в удаленных от промышленных центров районах. Оксиды азота в сельской местности могут иметь естественное или антропогенное происхождение, а также приноситься с воздушными массами из загрязненных районов. Однако их концентрации, как правило, значительно ниже, чем в городах. В связи с этим полагается, что в условиях «чистой» атмосферы концентрации угарного газа и антропогенных летучих органических соединений, регистрируемых на пунктах мониторинга атмосферного воздуха [9], равны нулю, а концентрации NO и NO_2 равны многолетним среднегодовым значениям для Березинского заповедника 2,2 и 1,85 ppb соответственно. Летучие органические соединения естественного происхождения, присутствующие в разной степени повсеместно и неконтролируемые на пунктах мониторинга, также включаются в определение «чистой» атмосферы.

К настоящему времени имеются достаточно длинные ряды наблюдений за приземным озоном в областных городах Беларуси. Понятно, что измерения в городах в значительной степени искажены по сравнению с «чистой» атмосферой присутствием в воздухе антропогенных

загрязнений, способных взаимодействовать с озоном и изменять его концентрацию. Поэтому непосредственно использовать городские измерения для определения климатической нормы приземного озона в «чистой» атмосфере не представляется возможным. Однако эти измерения можно «исправить» с помощью полученной в [8, 9] зависимости концентрации озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений.

Если бы названная зависимость была известна точно, то можно было бы точно рассчитать вклады в измеренные концентрации озона за счет отклонения метеоусловий от заданных средних значений и отличных от нуля концентраций антропогенных загрязнений. Иными словами, измеренные концентрации озона без затруднений можно было бы скорректировать на случай «нормальных» метеоусловий и «чистой» атмосферы. На самом деле следует принимать во внимание следующие обстоятельства, усложняющие решение задачи.

Уравнение регрессии, используемое для определения зависимости наблюдаемой концентрации озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений, лишь приближенно воспроизводит данные наблюдений [8, 9], и это может служить источником ошибок при расчете климатической нормы озона в «чистой» атмосфере. Кроме того, определение параметров регрессии предполагает знание климатической нормы озона, относительно которой рассчитывается отклонение от нормы. Однако климатическая норма озона в «чистой» атмосфере для средней погоды заранее неизвестна. В связи с этим решение задачи усложняется и приходится применить метод последовательных приближений.

На первой итерации используется климатическая норма приземного озона, базирующаяся на результатах экспериментальных наблюдений в областных городах и, следовательно, подверженная влиянию антропогенных загрязнений. С помощью уравнения регрессии, определенного на основании названной нормы, рассчитывается приближенное значение отклонения каждого измеренного значения концентрации озона от нормы и вычитается из результата измерений. Далее полученная разность складывается с рассчитанным по уравнению регрессии ожидаемым отклонением от используемой нормы озона, когда значения объясняющих переменных отвечают условиям «чистой» атмосферы. В результате измеренное значение корректируется на случай «чистой» атмосферы. Предложенная методика частично компенсирует несовершенство уравнения регрессии за счет вычитания результатов расчета двух отклонений друг из друга.

Исправленный таким образом ряд измерений используется для расчета первого приближения к климатической норме озона в «чистой» атмосфере. Далее рассчитываются новые коэффициенты уравнения регрессии, оценивающего отклонения измерений концентрации озона от новой нормы. Следующая итерация базируется на полученной норме озона и новых коэффициентах регрессии. Процедура повторяется до достижения самосогласования: новый расчет «чистой» климатической нормы озона не отличается от предыдущего. Вычисления по предложенной схеме показывают, что для получения окончательного результата требуется менее 10 итераций.

Уравнение регрессии. Несколько лет назад была предложена и опробована статистическая методика учета влияния метеоусловий и антропогенных загрязнителей воздуха на концентрацию приземного озона. Проведенные расчеты основывались на данных наблюдений пунктов мониторинга атмосферного воздуха в четырех районах г. Минска, различающихся по степени антропогенного загрязнения. Методика базируется на вполне обоснованных предположениях, допускающих дальнейшее уточнение, и сводится к определению коэффициентов уравнения регрессии, связывающего величину отклонения концентрации приземного озона от ее климатической нормы со значениями метеопараметров и концентрациями антропогенных загрязнителей воздуха. Расчеты показали удовлетворительное соответствие с результатами наблюдений. В дальнейшем методика совершенствовалась, а ряды данных расширялись, что способствовало уточнению описания названной зависимости. Детальное обоснование методики приведено в работах [8, 9]. Здесь дается краткое ее описание, дополненное несколькими существенными замечаниями по поводу ее применимости.

Исходя из самых общих соображений, концентрацию приземного озона можно представить в виде нелинейной функции от всей совокупности факторов, оказывающих влияние на озон. Время (если отвлечься от весьма коротких периодов, необходимых для установления химического равновесия между реагентами) не входит в эту функцию в явном виде, а изменение концентрации озона со временем обусловлено только зависимостью от него переменных функции. К сожалению, ни сама функция, ни полный набор определяющих концентрацию озона переменных неизвестны. Представим эту функцию в виде разложения в ряд Тэйлора:

$$O_3(x) = O_3(X) + \sum_i c_i (x_i - X_i) + (1/2) \sum_{i,j} c_{ij} (x_i - X_i)(x_j - X_j) + \dots \quad (1)$$

где $\{x\}$ – совокупность переменных, являющихся количественными оценками различных факторов, которые влияют на озон, $\{X\}$ – совокупность значений переменных, соответствующих точке в многомерном пространстве переменных, около которой осуществляется разложение. Коэффициенты c – частные производные от функции по соответствующим переменным:

$$c_i = (\partial O_3 / \partial x_i) \Big|_X, \quad c_{ij} = (\partial^2 O_3 / \partial x_i \partial x_j) \Big|_X.$$

Сразу следует сделать замечание по поводу справедливости уравнения (1). В число переменных, входящих в (1), включены скорость ветра и интенсивность вертикального обмена. Обе переменные осуществляют связь с состоянием (составом) атмосферы, находящейся на некотором расстоянии от места наблюдений. Очевидно, что предложенное описание зависимости концентрации приземного озона от названных переменных является некорректным. Действительно, следовало бы использовать в качестве исходного уравнение движения жидкости с учетом адвективных составляющих полной производной по времени от концентрации приземного озона. Однако это существенно усложняет решение основной задачи из-за необходимости учета пространственного распределения переменных и его динамики. В такой ситуации задача перестает быть локальной и требует привлечения значительно большего объема данных.

Возможность обойти указанное препятствие появляется в случае существенного ограничения применимости уравнения (1). В частности, проводимое исследование ограничивается рассмотрением ситуации в крупных городах, в которых концентрация озона обычно меньше, чем в сельской местности. Это позволяет предположить, что горизонтальный перенос ветром просто увеличивает концентрацию приземного озона в городе и может быть приближенно описан в рамках уравнения (1), не привлекая данных о полях приземного озона в окрестности городов. Если бы в анализ включались данные из удаленных от городов пунктов наблюдений, очевидно, такой подход оказался бы неприемлемым. Аналогично предполагается, что вертикальный обмен воздухом увеличивает концентрацию приземного озона за счет притока воздуха из более высоких слоев с более высокой концентрацией озона. Такое предположение оказывается не всегда верным. К тому же точно неизвестна концентрация озона «наверху», хотя она подвержена довольно слабым изменениям. Следовательно, используемое предположение также является весьма грубым. Введенные предположения и ограничения являются «платой» за возможность «локализовать» проблему в одной точке пространства без учета окружающего поля озона и таким образом оправдать возможность использования выражения (1) для описания концентрации приземного озона в зависимости от метеорологических условий и концентраций прекурсоров озона в месте наблюдений.

Чем меньше «расстояние» между точками $\{x\}$ и $\{X\}$, тем короче может быть длина разложения (1) для удовлетворительного приближения функции $O_3(x)$. В качестве координат такой «точки отсчета» удобно выбрать значения, отвечающие климатическим нормам переменных $\{x\}$, около которых флуктуируют реальные значения переменных. Можно показать, что в этом случае значение $O_3[X(t)]$ отличается от климатической нормы озона $\bar{O}_3(t)$ на величину второго порядка малости [9].

В случае выбора в качестве параметров $\{X\}$ климатических норм соответствующих переменных в первом приближении можно ограничиться учетом членов разложения до второго порядка включительно. Это действительно первое приближение, поскольку бесспорно наличие

взаимовлияния между отдельными переменными x_i и нелинейной зависимости концентрации приземного озона от этих переменных.

Заменяя неизвестную функцию $O_3[X(t)]$ в (1) на климатическую норму приземного озона $\bar{O}_3(t)$, для отклонения концентрации озона от нормы можно записать:

$$\Delta O_3[x(t)] = O_3[x(t)] - \bar{O}_3(t) = \sum_i c_i (x_i - X_i) + (1/2) \sum_{i,j} c_{ij} (x_i - X_i)(x_j - X_j) + \varepsilon_2(t), \quad (2)$$

где $\varepsilon_2(t)$ – поправки второго порядка малости из-за неравенства $O_3[X(t)]$ и $\bar{O}_3(t)$ и из-за игнорирования членов разложения более высоких порядков.

В дальнейшем значения производных, входящих в разложение (2), оцениваются посредством статистического анализа результатов наблюдений за концентрацией приземного озона, погодой и уровнем загрязнения воздуха в различных городах Беларуси. Для аппроксимации разложения (2) используется уравнение множественной линейной регрессии:

$$\Delta O_3 = a_0 z_0 + \sum_{i=1}^M a_i z_i, \quad (3)$$

где ΔO_3 – отклонение концентрации приземного озона от климатической нормы; a_i – коэффициенты регрессии; z_i – объясняющие переменные; $M+1$ – полное число переменных. Коэффициент a_0 введен для приближенной компенсации отклонения $O_3[X(t)]$ от $\bar{O}_3(t)$, а также осредненного влияния неучтенных факторов. Соответствующая этому коэффициенту переменная введена ради унификации алгоритма расчета и на самом деле является постоянной: $z_0 \equiv 1$.

В качестве основных переменных в регрессионную модель включены регистрируемые на пунктах мониторинга атмосферного воздуха концентрации оксидов азота, углерода, летучих органических соединений (бензола, толуола, ксилола) и некоторые метеорологические параметры. Часть метеопараметров в настоящее время не регистрируется на метеостанциях Беларуси. К ним относятся вертикальная устойчивость атмосферы в пограничном слое и фотохимическая активность солнечного излучения. Для оценки вертикальной устойчивости использованы прогностические расчеты, а фотохимическая активность излучения оценивается полуэмпирически с учетом значений некоторых измеренных метеорологических параметров [9].

Полный список основных объясняющих переменных включает: температуру и абсолютную влажность воздуха; фотохимическую активность солнечной радиации; скорость ветра; вертикальную устойчивость атмосферы; концентрацию CO , NO_2 , NO ; общую концентрацию антропогенных летучих органических соединений (сумму контролируемых на пунктах наблюдений концентраций бензола, толуола, ксилола). Это еще одно приближение, поскольку эффективность влияния на озон индивидуальна для каждого из веществ и корректнее было бы складывать их концентрации с соответствующими весовыми множителями [3], однако такие данные в настоящее время отсутствуют.

В уравнении регрессии в качестве основных объясняющих переменных фигурируют не сами названные выше параметры, а их отклонения от климатических норм, определенных для г. Минска. Для контролируемых на пунктах мониторинга атмосферного воздуха антропогенных загрязнений в качестве их нормы используются нулевые значения концентраций.

Безусловно, имеются и другие факторы, оказывающие влияние на концентрацию приземного озона. В частности, известны такие реагирующие с озоном загрязнители, как метан, формальдегид, изопрены, терпены и др. [16]. Однако в настоящее время экспериментальные данные о концентрациях таких загрязнителей воздуха отсутствуют, поэтому список ограничен приведенным выше набором.

Для получения оценок величин производных второго порядка, входящих в разложение (2), в список объясняющих переменных уравнения регрессии включаются дополнительно парные произведения и квадраты перечисленных выше основных переменных. Как отмечалось ранее, члены разложения второго порядка описывают реально существующие физические эффекты (например, влияние температуры на скорость разрушения озона при взаимодействии с оксидами азота, зависимость эффективности взаимодействия озона с прекурсорами от уровня солнечной радиации и т.п.). Ясно, что для обеспечения адекватности регрессионной модели

присутствие указанных дополнительных переменных обязательно. Авторы включили в список объясняющих переменных также произведения трех и даже четырех некоторых основных объясняющих переменных, чтобы полнее учесть существенную нелинейность зависимости концентрации приземного озона от основных переменных.

Коэффициенты уравнения регрессии в общем случае зависят от сезона и времени суток. Однако можно предположить, что основная часть сезонной и суточной изменчивости приземного озона удовлетворительно описывается поведением его климатической нормы, и считать коэффициенты a , постоянными. Допустимость такого предположения проверена посредством численного эксперимента.

Использовались все доступные данные измерений только для г. Минска и определенная ранее климатическая норма приземного озона [17, 18]. Оценивалось изменение величины объясненной уравнением регрессии дисперсии при сокращении периода наблюдений с целого года до двух сезонов, наиболее важных с точки зрения потенциальной опасности высоких концентраций приземного озона – весны и лета. В случае явной зависимости коэффициентов регрессии от сезона можно ожидать заметного увеличения объясненной дисперсии при сокращении рассматриваемого периода, а также изменения значений коэффициентов уравнения регрессии. Проведенные расчеты показали, что выигрыша в объясненной дисперсии при ограничении анализа только весенне-летним периодом не происходит. Также не обнаружена заслуживающая внимания зависимость коэффициентов уравнения регрессии от сезона. Проверить предположение о стабильности коэффициентов регрессии на протяжении суток значительно сложнее, и такая проверка не проводилась.

«Чистая» норма озона. Ранее отмечено, что климатическая норма приземного озона в «чистой» атмосфере определяется для минской нормы погоды. Это не совсем так. Причина заключается в «локализации» зависимости концентрации озона от метеопараметров, а именно, скорости ветра. При обосновании уравнения регрессии было использовано предположение, что сильный ветер увеличивает концентрацию озона в городах за счет переноса воздуха из районов, незагрязненных антропогенными выбросами. Для этих районов обычно характерны более высокие концентрации озона. Это предположение действительно подтверждается расчетами при использовании «городских» данных: коэффициент корреляции озона с отклонением скорости ветра от минской нормы получается положительным, хотя и совсем незначительным. Однако в «чистой» атмосфере следует ожидать независимости озона от скорости ветра, поскольку воздух, приходящий с ветром, такой же, как и в месте наблюдений. Следовательно, абсолютно некорректно использовать отличную от нуля минскую климатическую норму скорости ветра в качестве параметра при расчете концентрации озона в «чистой» атмосфере на основании уравнения регрессии для городских условий: в «городском» уравнении ветер увеличивает концентрацию озона. Рационально в этом случае положить скорость ветра равной нулю. В отличие от ветра, эффективность влияния на приземный озон вертикального перемешивания воздуха слабо зависит от места наблюдений.

Для расчета коэффициентов уравнения регрессии и климатической нормы приземного озона в «чистой» атмосфере над территорией Беларуси использованы отнесенные к метеорологическим срокам 55615 наблюдений за концентрацией озона и антропогенными загрязнителями во всех областных центрах страны в период 2012–2018 гг. (не со всех пунктов наблюдений получены данные за весь указанный период). Для этого данные ежечасных измерений концентраций усреднялись около метеорологических сроков.

Климатическая норма приземного озона представляется в виде разложения в ряд Фурье [16]:

$$\bar{O}_3(t) = \sum_{j=1}^Q q_j f_j(t), \quad (3)$$

где $f_j(t) = \varphi_{p(j)}(T, t) \varphi_{r(j)}(H, t)$, $Q = (2M+1)(2N+1)$, t – время от начала года, а значения индексов p и r определяются по формулам: $r = (j-1)/(2N+1) + 1$, $p = j - (2N+1)(r-1)$.

В выражении для индекса r подразумевается целая часть дроби. Параметры T и H равны длительности года и суток, M и N задают длину разложения для описания сезонной и суточной изменчивости нормы соответственно. Функция $\varphi_m(X, t)$ определяется следующим образом:

$$\varphi_m(X, t) = \begin{cases} \sin(2\pi st / X), & \text{если индекс } m \text{ четный,} \\ \cos(2\pi st / X), & \text{если индекс } m \text{ нечетный,} \\ s = \text{целая часть } (m/2). \end{cases}$$

Коэффициенты разложения определяются посредством минимизации среднеквадратичного отклонения нормы от всей совокупности данных наблюдений на пунктах мониторинга атмосферного воздуха. Ввиду ограниченности рядов измерений многолетний тренд нормы озона не оценивался в отличие от [9], где такую возможность для определения «грязной» климатической нормы приземного озона в г. Минске обеспечивали учет более ранних наблюдений за озоном, не сопровождавшихся измерениями антропогенных загрязнений, и привлечение дополнительных данных с прибалтийской станции Прейла.

В таблице приводятся значения полученных коэффициентов разложения климатической нормы приземного озона для «чистой» атмосферы на территории Беларуси. Параметры разложения: $M=3, N=3$. Слева от численных значений указаны порядковые номера коэффициентов разложения (индекс j в выражении (3)).

Коэффициенты q_j разложения (3)

1	29,217	2	5,852	3	-6,871	4	0,509	5	-1,116	6	-1,285	7	1,030
8	-4,557	9	-0,557	10	3,875	11	-0,471	12	0,339	13	0,455	14	-0,436
15	-4,277	16	-0,169	17	2,682	18	0,144	19	0,155	20	0,250	21	-0,487
22	0,863	23	0,021	24	-0,111	25	0,391	26	-0,655	27	-0,047	28	0,414
29	0,442	30	-0,246	31	0,209	32	0,158	33	-0,191	34	0,079	35	0,019
36	0,311	37	0,154	38	-0,836	39	-0,015	40	0,026	41	-0,220	42	0,226
43	0,074	44	-0,054	45	0,027	46	-0,058	47	-0,241	48	-0,035	49	0,020

На рис. 1 показано сравнение рассчитанных значений климатических норм среднесуточных концентраций приземного озона в городах («грязная» норма) и в условиях «чистой» атмосферы («чистая» норма). Результаты вполне ожидаемы, поскольку регистрируемые значения параметров антропогенного загрязнения городского воздуха в Беларуси соответствуют сценарию подавления генерации озона [2]. На этом же рисунке показаны среднемесячные значения концентрации озона в Березинском заповеднике, определенные по данным наблюдений в 2017–2018 гг. Заметные отличия от «чистой» нормы в первой половине года, возможно, обусловлены неполным списком антропогенных загрязнений, учтывавшихся при расчете «чистой» нормы. Большой интерес вызывает июльский провал концентрации озона в заповеднике, повторяющийся в течение двух лет подряд. Если это явление окажется стабильным и в последующие годы, то следует искать ему объяснение.

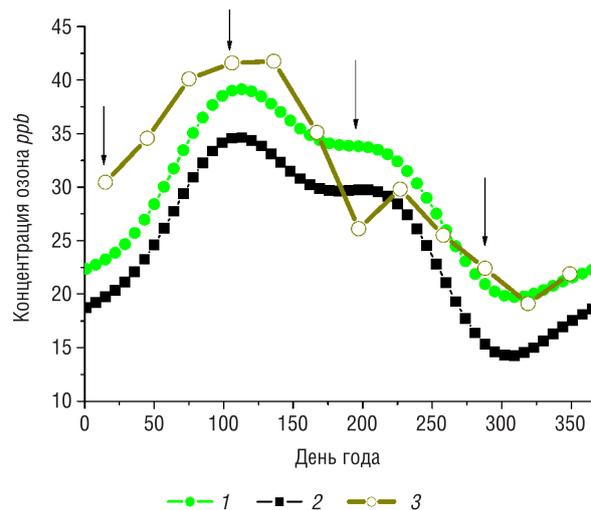


Рис. 1. Годовой ход фонтовых (региональных) среднесуточных концентраций приземного озона над Беларусью («чистая» норма, 1) в сравнении с ходом в областных центрах («грязная» норма, 2) и среднемесячные значения в Березинском заповеднике по данным наблюдений в 2017–2018 гг. (3). Стрелками отмечены дни, соответствующие середине сезонов

Суточный ход «чистой» и «грязной» норм 15 января, 15 апреля, 15 июля и 15 октября, приведен на рис. 2. Как видно из рисунка, «чистая» норма приближается к «грязной» в ночное время суток. Это особенно характерно для осенне-зимнего периода. Уменьшается также глубина утреннего и вечернего провалов в суточном ходе концентрации озона, вызванных увеличением степени антропогенного загрязнения городского воздуха в это время. Это вполне естественно для случая «чистой» атмосферы и подтверждает качественно верный характер полученного решения. На этом же рисунке приведен суточный ход приземного озона в Березинском заповеднике, усредненный по сезонам 2017–2018 гг.

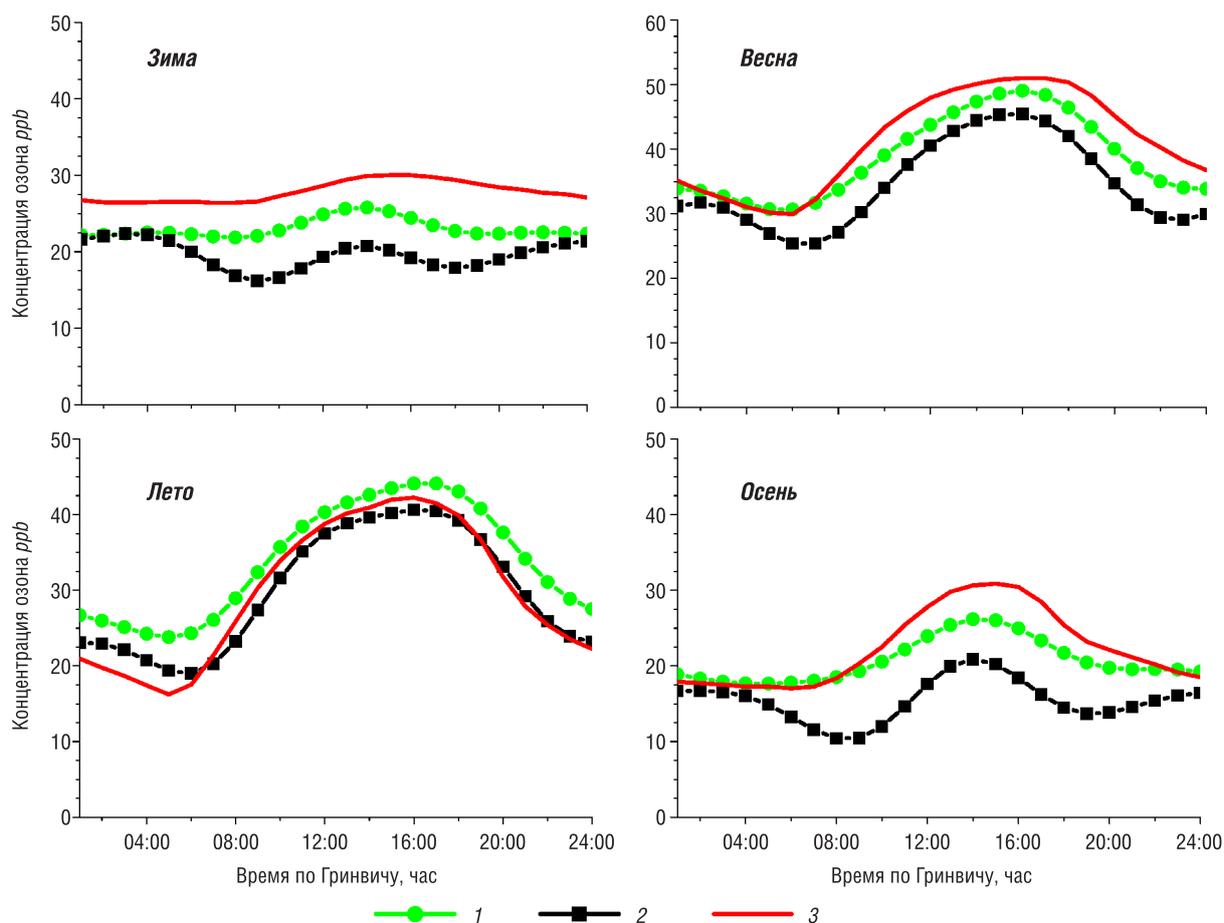


Рис. 2. Суточный ход климатической нормы приземного озона в середине каждого сезона: 1 – «чистая» норма, 2 – «грязная» норма, 3 – суточный ход приземного озона в Березинском заповеднике, усредненный по сезонам 2017–2018 гг.

Заключение. На основании наблюдений в областных городах Беларуси получена климатическая норма приземного озона в «чистой» атмосфере, свободной от антропогенных загрязнений, контролируемых системой мониторинга атмосферного воздуха. Для этого с помощью полученной ранее зависимости концентрации приземного озона от антропогенных загрязнений было исключено их влияние на результаты измерений. Результаты измерений были также скорректированы с учетом отличия реальных метеоусловий от среднего климата Беларуси. Полученная норма сравнивается с наблюдениями в Березинском биосферном заповеднике.

С одной стороны, расчет климатической нормы озона в «чистой» атмосфере на основании измерений в «грязных» городах сопряжен с ошибками, вызванными погрешностями при нахождении зависимости концентрации приземного озона от метеоусловий и антропогенных загрязнений, а также неполнотой списка учитываемых антропогенных загрязнителей. С другой стороны, наблюдения в Березинском заповеднике не в полной мере отвечают оговоренным условиям

«чистой» атмосферы. Ожидать полного совпадения результатов, полученных на основании измерений в разных местах и по-разному обработанных, очевидно, не приходится. Тем не менее, их сравнение свидетельствует о непротиворечивости использованной методики.

Список использованных источников

1. Clapp, L. J. Analysis of the Relationship between Ambient Levels of O₃, NO₂ and NO as a Function of NO_x in the UK / L. J. Clapp, M. E. Jenkin // *Atmospheric Environment*. – 2001. – Vol. 35. – P. 6391–6405. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00378-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00378-8)
2. Sillman, S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments / S. Sillman // *Atmospheric Environment*. – 1999. – Vol. 33. – P. 1821–1845.
3. Kleinman, L. I. The dependence of tropospheric ozone production rate on ozone precursors / L. I. Kleinman // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39. – P. 575–586.
4. Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 12 February 2002 relating to ozone in ambient air // *Official Journal of the European Communities*. – 9.3.2002. – P. L67/14–L67/30.
5. The impact of weather and atmospheric circulation on O₃ and PM₁₀ levels at a rural mid-latitude site / M. Demuzere [et al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2009. – Vol. 9. – P. 2695–2714.
6. Lyapina, O. Cluster analysis of European surface ozone observations for evaluation of MACC reanalysis data / O. Lyapina, M. G. Schultz, A. Hense // *Atmos. Chem. Phys.* – 2016. – Vol. 16. – P. 6863–6881. doi:10.5194/acp-16-6863-2016
7. 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. doi: 10.1080/07055900.2013.853284.
8. Флуктуации поля концентрации приземного озона, обусловленные меняющимися метеорологическими условиями и степенью загрязнения воздуха / Л. М. Болотко [и др.] // *Экологический вестник*. – 2016. – № 3. – С. 45–52.
9. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон / А. М. Людчик [и др.] // *Природные ресурсы*. – 2015. – № 1. – С. 95–105.
10. Analysis of the Relationship between O₃, NO and NO₂ in Tianjin, China / S. Han [et al.] // *Aerosol and Air Quality Research*. 2011. – Vol. 11. – P. 128–139. doi: 10.4209/aaqr.2010.07.0055
11. Latini, G. Influence of meteorological parameters on urban and suburban air pollution / G. Latini, R. Cocci Grifoni, G. Passerini // *Air Pollution*. – 2002. – Vol. X. – P. 753–762.
12. Dawson, J. P. Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study / J. P. Dawson, P. J. Adams, S. N. Pandis // *Atmospheric Environment*. – 2007. – Vol. 41. – P. 1494–1511. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.10.033
13. Людчик, А. М. Динамические климатические нормы и многолетние тренды метеопараметров для г. Минска / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин, Е. В. Комаровская // *Природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 64–71.
14. Людчик, А. М. Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. I: температура и скорость ветра / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин, В. Я. Венчиков // *Природные ресурсы*. – 2017. – № 1. – С. 75–82.
15. Людчик, А. М. Региональные особенности климата Беларуси и их изменение в последние десятилетия. II: Влажность воздуха и облачность / А. М. Людчик, С. Д. Умрейко // *Природные ресурсы*. – 2017. – № 2. – С. 83–89.
16. Variability in surface ozone background over the United States: Implications for air quality policy / A. Fiore [et al.] // *Journal of geophysical research: Atmospheres*. – 2003. – Vol. 108. – No. D24. – P. 4787. doi: 10.1029/2003JD003855
17. Людчик, А. М. Многолетний тренд приземного озона / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин // *Природные ресурсы*. – 2014. – № 1. – С. 97–105.
18. Людчик, А. М. Климатология приземного озона в г. Минске / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин // *Природные ресурсы*. – 2014. – № 2. – С. 112–118.

Поступила 30.07.2019