

**В. В. Божкова<sup>1</sup>, А. М. Людчик<sup>1</sup>, Е. А. Мельник<sup>2</sup>***<sup>1</sup>Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ,  
Минск, Беларусь, e-mail: hamster3991@mail.ru, liudchikam@tut.by**<sup>2</sup>Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения  
и мониторингу окружающей среды, Минск, Беларусь,  
e-mail: kbb@rad.org.by***ФЛУКТУАЦИИ ПОЛЯ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В БЕЛАРУСИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ  
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ И АНТРОПОГЕННЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ВОЗДУХА**

**Аннотация.** Приведены результаты сравнения концентраций приземного озона, измеренных во всех областных городах Беларуси в разные годы, с рассчитанными в рамках концепции об однородности поля приземного озона над территорией Беларуси. Используются определенные на основании экспериментальных данных климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере и зависимость озона от метеорологических и антропогенных загрязнений. Результаты сравнения показывают вполне удовлетворительное согласие. Обсуждаются случаи несоответствия расчета эксперименту, недостатки методики и способы их устранения. Одной из важных нерешенных проблем является отсутствие международной сертификации используемой измерительной аппаратуры и соответственно полученных результатов измерений, что, безусловно, отражается на качестве результатов расчета, базирующегося на массиве данных измерений. Это не препятствует совершенствованию и отладке методики обработки и анализа данных наблюдений. Оба направления деятельности – совершенствование сети наблюдений и методики анализа полученных данных – рационально развивать параллельно, чтобы по мере развития сети, повышения качества измерений и расширения списка контролируемых загрязнений приходилось только пополнять базу используемых исходных данных и пользоваться готовыми методиками обработки.

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

**V. V. Bozhkova<sup>1</sup>, A. M. Lyudchik<sup>1</sup>, E. A. Melnik<sup>2</sup>***<sup>1</sup>National Ozone Monitoring Research Centre of the Belarusian State University,  
Minsk, Belarus, e-mail: hamster3991@mail.ru, liudchikam@tut.by**<sup>2</sup>Republican Center for Hydrometeorology, Radiation Control and Environmental Monitoring,  
Minsk, Belarus, e-mail: kbb@rad.org.by***FLUCTUATIONS OF THE SURFACE OZONE FIELD IN BELARUS RESULTED FROM METEOROLOGICAL CONDITIONS  
AND ANTHROPOGENIC AIR POLLUTION**

**Abstract.** The results of comparison between the concentrations of surface ozone, measured in all regional cities of Belarus in different years, and those calculated within the concept of surface ozone field homogeneity over the territory of Belarus, are presented. Based on the experimental data, the climatic normal of surface ozone in clear atmosphere and the dependence of ozone on meteorological conditions and anthropogenic pollution were used. The results of the comparison are in a good agreement. The cases of inconsistency between the computation and experimental results as well as the weak points of the technique and some ways of their correction are discussed. Among the important unsolved problems there is the absence of international certification for the measuring equipment involved in the process of data collection and, therefore, for the obtained results, which, undoubtedly, affects the quality of the calculation procedure, based on the scope of measurement data. Yet, this does not hamper improving and adjusting the technique for observation data processing and analysis. Both directions – enhancing the network of observations and advancing methods for data analysis – ought to be developed concurrently so that with enhancing the network, improving the quality of measurements and extending the list of monitored pollutants one would only have to enlarge initial database and use elaborated processing techniques.

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

**В. У. Бажкова<sup>1</sup>, А. М. Людчык<sup>1</sup>, Е. А. Мельнік<sup>2</sup>***<sup>1</sup>Нацыянальны навукова-даследчы цэнтр маніторынгу азонасферы БДУ,  
Мінск, Беларусь, e-mail: hamster3991@mail.ru, nomrec@bsu.by, liudchikam@tut.by**<sup>2</sup>Рэспубліканскі цэнтр па гідраметэаралогіі, кантролю радыёактыўнага забруджвання  
і маніторынгу навакольнага асяроддзя,  
Мінск, Беларусь, e-mail: kbb@rad.org.by***ФЛУКТУАЦЫІ ПОЛЯ ПРЫЗЕМНАГА АЗОНУ Ў БЕЛАРУСІ, АБУМОЎЛЕНАЯ МЕТЭАРАЛАГІЧНЫМІ ЎМОВАМІ  
І АНТРАПАГЕННЫМ ЗАБРУДЖВАННЕМ ПАВЕТРА**

**Анотацыя.** Прыведзеныя вынікі параўнання канцэнтрацый прыземнага азону, вымераных ва ўсіх абласных гарадах Беларусі ў розныя гады, з канцэнтрацыямі, разлічанымі ў рамках канцэпцыі аб аднастайнасці поля прыземнага азону над тэрыторыяй Беларусі. Выкарыстоўваюцца вызначаныя на падставе эксперыментальных дадзеных кліматычная норма прыземнага азону ў чыстай атмасферы і залежнасць азону ад метэаўмоў і антрапагенных забруджванняў. Вынікі параўнання досыць станоўчыя. Абмяркоўваюцца выпадкі неадпаведнасці разліку эксперыменту, недахопы мето-

дыкі ды шляхі яе карэкцыі. Адною з важных нявырашаных праблемаў з'яўляецца адсутнасць міжнароднай сертыфікацыі вымяральной апаратуры і, адпаведна, атрыманых вымярэнняў, што, безумоўна, адбіваецца на якасці разліку, які базуецца на масіве дадзеных вымярэнняў. Разам з тым, гэта не перашкаджае ўдасканаленню метадыкі апрацоўкі і аналізу дадзеных назіранняў. Абодва накірункі – удасканаленне сеткі назіранняў і метадыкі аналізу атрыманых дадзеных – мэтазгодна развіваць паралельна, каб з развіццём сеткі, павышэннем якасці вымярэнняў, ды пашырэннем спісу забруджвальнікаў, якія кантралююцца, даследчыкам заставалася б толькі папаўняць базу выкарыстаных зыходных дадзеных і карыстацца распрацаванымі метадыкамі.

**Ключавыя словы:** прыземны азон, антрапагеннае забруджванне паветра, кліматычная норма, формула рэгрэсіі

**Введение.** С использованием наблюдений на протяжении ряда лет в областных городах Беларуси за концентрациями приземного озона, некоторых его антропогенных прекурсоров и метеорологическими условиями в работе [1] получена климатическая норма приземного озона в «чистой» (свободной от антропогенных загрязнителей) атмосфере при «нормальной» погоде. Задача решалась посредством определения коэффициентов уравнения регрессии, связывающего отклонение концентрации приземного озона от ее климатической нормы с отклонениями некоторых метеорологических параметров от их климатических норм и концентрациями антропогенных загрязнений, регистрируемых на пунктах мониторинга атмосферного воздуха.

Оригинальность методики заключалась в том, что она базировалась на измерениях концентрации озона в областных городах, определенно подверженных влияющему на озон антропогенному загрязнению. Эти данные корректировались на случай «чистой» атмосферы и среднего климата страны с помощью уравнения регрессии. «Исправленные» данные служили основой для определения климатической нормы приземного озона в «чистой» атмосфере Беларуси. Поскольку фигурирующая в расчетах коэффициентов регрессии такая климатическая норма заранее не была известна, задача решалась методом итераций.

Использовать «прямую» методику определения нормы приземного озона в «чистой» атмосфере, основывающуюся на анализе измерений его концентрации в сельских районах, в меньшей степени подверженных антропогенному загрязнению, в настоящее время не представляется возможным вследствие отсутствия в Беларуси соответствующих пунктов наблюдений. Исключением является Березинский биосферный заповедник, однако ряды качественных данных о приземном озоне в нем слишком коротки и прерывисты.

Полученные в работе [1] результаты являются дальнейшим развитием предложенной концепции [2–4] однородности поля приземного озона над территорией страны, которое подвержено местным флуктуациям из-за различий в метеорологических условиях и степени антропогенного загрязнения воздуха. Понятие климатической нормы озона в «чистой» атмосфере полностью соответствует концепции. Именно по отношению к названной норме следует оценивать наблюдаемые флуктуации концентрации приземного озона в зависимости от места наблюдений (местных метеорологических условий и концентраций прекурсоров).

Поскольку упомянутое выше уравнение регрессии базируется на заранее заданной климатической норме приземного озона, обе зависимости следует рассматривать неразрывно друг от друга. Собственно, это и было продемонстрировано в работе [1], где для получения результата использовалась итерационная процедура.

Представлены результаты сравнения концентраций озона, измеренных во всех областных центрах Беларуси в разное время и в разные годы, с концентрациями, рассчитанными по уравнению регрессии с учетом метеорологических параметров и концентраций антропогенных загрязнений. Приведенные ранее [3] подобные сравнения отличаются тем, что тогда использовалась «минская» климатическая норма озона [5, 6] и связанное с ней уравнение регрессии, а некоторые климатические нормы метеопараметров для областных городов были неизвестны. Обсуждаются возможные причины неполного соответствия расчетов и измерений и предполагаемые варианты их устранения. Сведения о «чистой» норме приземного озона на территории Беларуси приведены в работе [1]. Климатические нормы используемых метеорологических параметров для г. Минска, коэффициенты уравнения регрессии и список всех объясняющих переменных могут быть предоставлены по запросу.

**Сравнение измерений с расчетом по уравнению регрессии.** На рис. 1–9 показаны результаты измерений концентрации приземного озона на пунктах мониторинга атмосферного воздуха во всех областных городах Беларуси в разные годы и в разные сезоны. Приведены также данные расчетов по уравнению регрессии, основывающиеся на определенной в [1] климатической норме приземного озона в «чистой» атмосфере. Выбрать одинаковые годы и одинаковые периоды для всех городов не удалось ввиду наличия пропусков в измерениях. Тем не менее для Бреста, Гомеля, Гродно и Могилева данные 2017 г. относятся к одним и тем же периодам времени.

Заметно, что в одно и то же время концентрации приземного озона в разных городах различаются, и эти различия достаточно четко отражаются и в расчетных данных. Существенно, что расчеты хорошо передают суточный ход концентрации озона. Насколько авторам известно, ранее уравнение регрессии применялось в основном для описания максимальных дневных концентраций озона [7–9]. Только в работе [10] регрессия используется для обработки данных ежедневных измерений, однако отсутствует графическое подтверждение эффективности методики. В рамках нашего подхода возможность детального описания изменения концентрации озона со временем появилась в связи с переносом основной «ответственности» за сезонный и суточный ход приземного озона на его климатическую норму, являющуюся составной частью уравнения регрессии [1]. Именно это позволило предположить независимость от времени коэффициентов регрессии. Насколько эффективным является такой подход, покажут дальнейшие исследования.

Брест, 2017 г., пункт 01 (рис.1). В марте и апреле расчеты относительно хорошо воспроизводят максимальные дневные значения, однако заметно «не дотягивают» в ряде случаев до самых глубоких ночных минимумов. Самое большое такое расхождение 29 и 30 апреля, а также

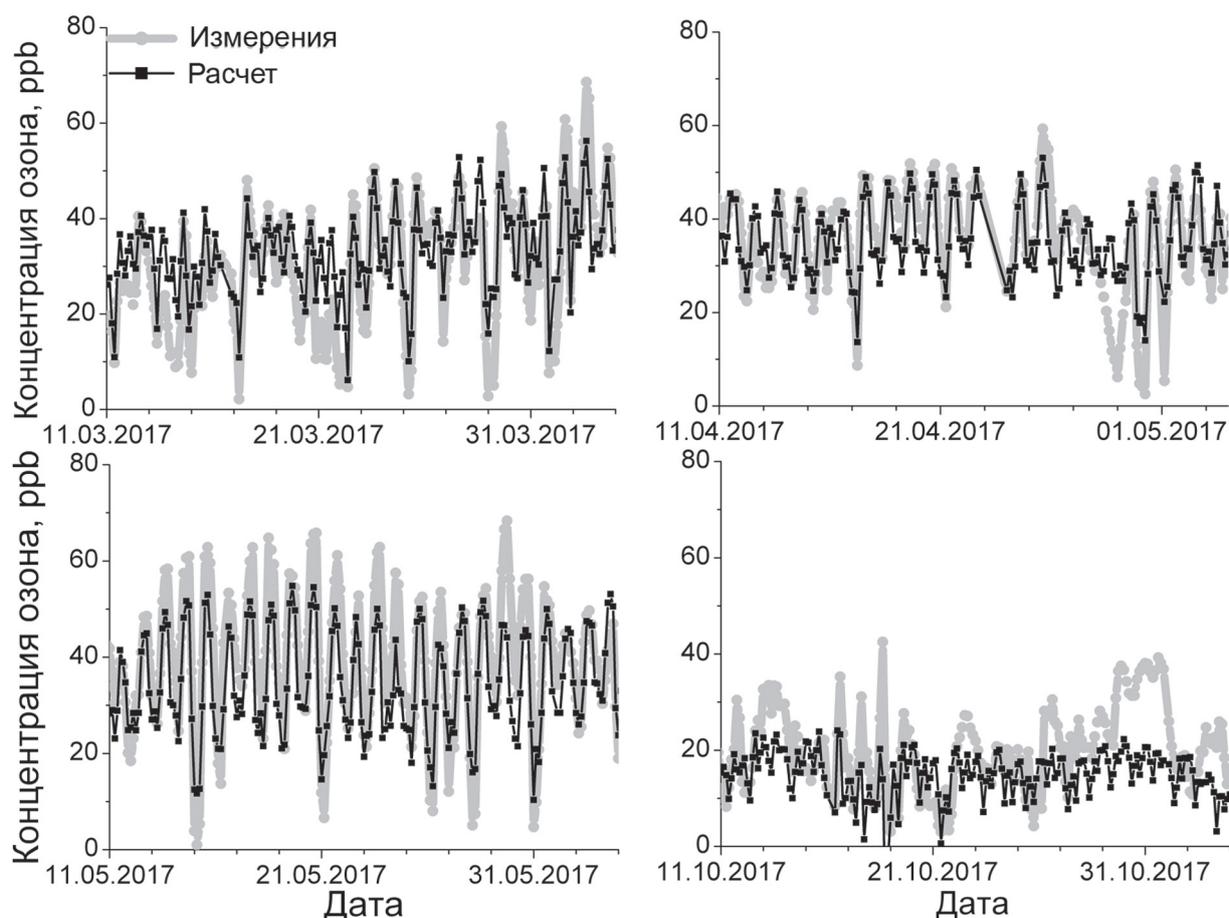


Рис. 1. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Брест, пункт 01, 2017 г.

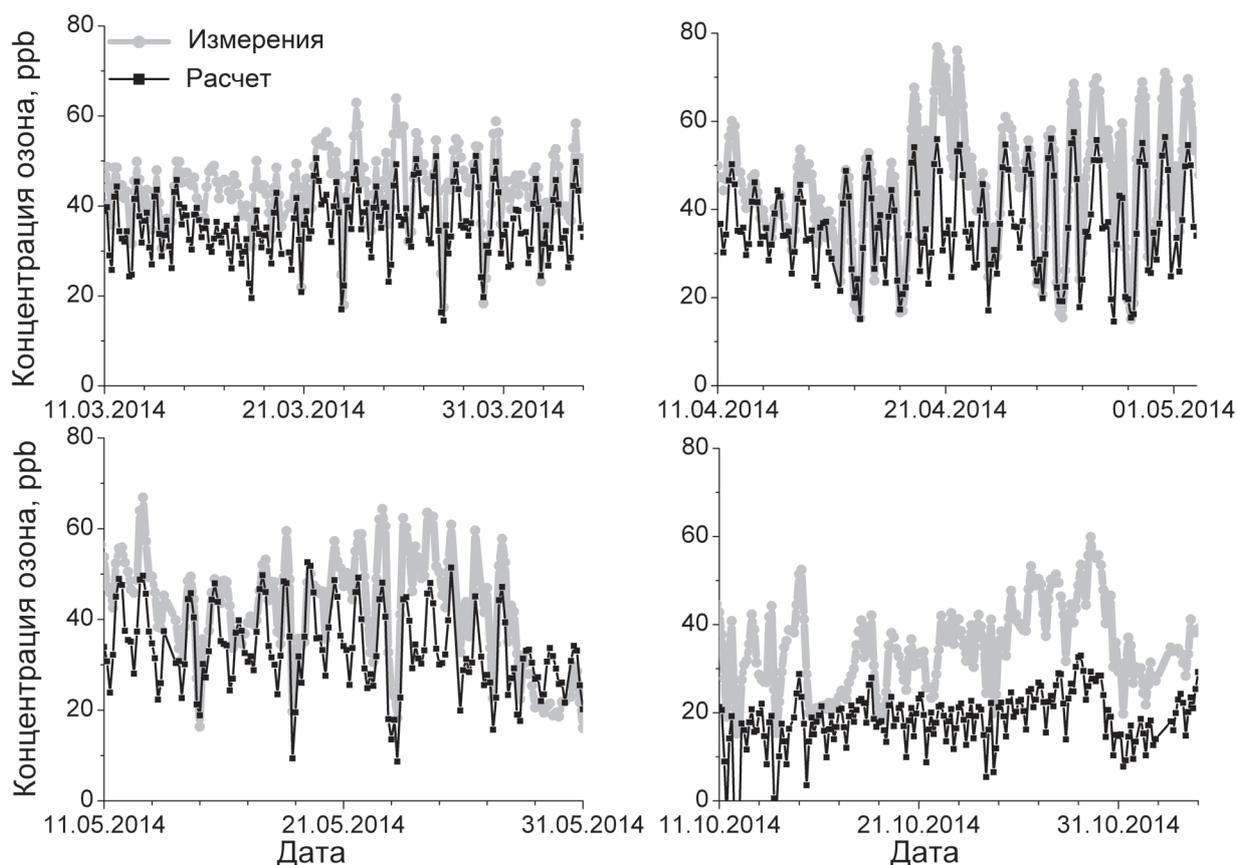


Рис. 2. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Витебск, пункт 03, 2014 г.

1 мая, возможно, обусловлено дождливой погодой или сильным туманом [11]. В мае ситуация начинает меняться, а в октябре измеренные максимальные значения заметно выше.

Витебск, 2014 г., пункт 03 (рис. 2). Во все месяцы (март, апрель, май, октябрь) видно заметное превышение измеренных концентраций озона над рассчитанными. При этом расчет хорошо (за исключением октября) передает минимальные ночные значения концентрации. Превышение измеренных концентраций над расчетными в Витебске уже отмечалось ранее [3] и эта проблема остается нерешенной по настоящее время.

Гомель, 2017 г., пункт 14 (рис. 3). В марте, апреле и мае расчеты хорошо воспроизводят максимальные измеренные значения и плохо минимальные. В частности, в апреле наибольшие расхождения в ночной период наблюдались 27 и 28 числа во время сильных дождей [11]. Однако в первые числа мая осадков не было, а измеренные концентрации озона оказались значительно ниже рассчитанных. Осенью, в октябре расчеты показывают заметно более низкие максимальные дневные и чересчур низкие минимальные ночные значения, иногда даже отрицательные. Отрицательные значения расчетных концентраций озона возникают из-за приближенного характера уравнения регрессии – в первую очередь его линейности по отношению к используемым объясняющим переменным. В то же время зависимость озона от влияющих на него факторов существенно нелинейна [1, 12, 13], и явный учет этого обстоятельства в значительной степени может повысить адекватность уравнения регрессии, в том числе и исключить нефизические отрицательные расчетные значения.

Гродно, 2017 г., пункт 07 (рис. 4). В марте и апреле получается вполне удовлетворительное соответствие рассчитанных и измеренных концентраций озона. Более низкие измеренные ночные значения концентрации озона 13 и 21 апреля, вероятнее всего, обусловлены дождливой погодой [11], хотя в конце месяца также были дожди, однако результаты измерений оказались

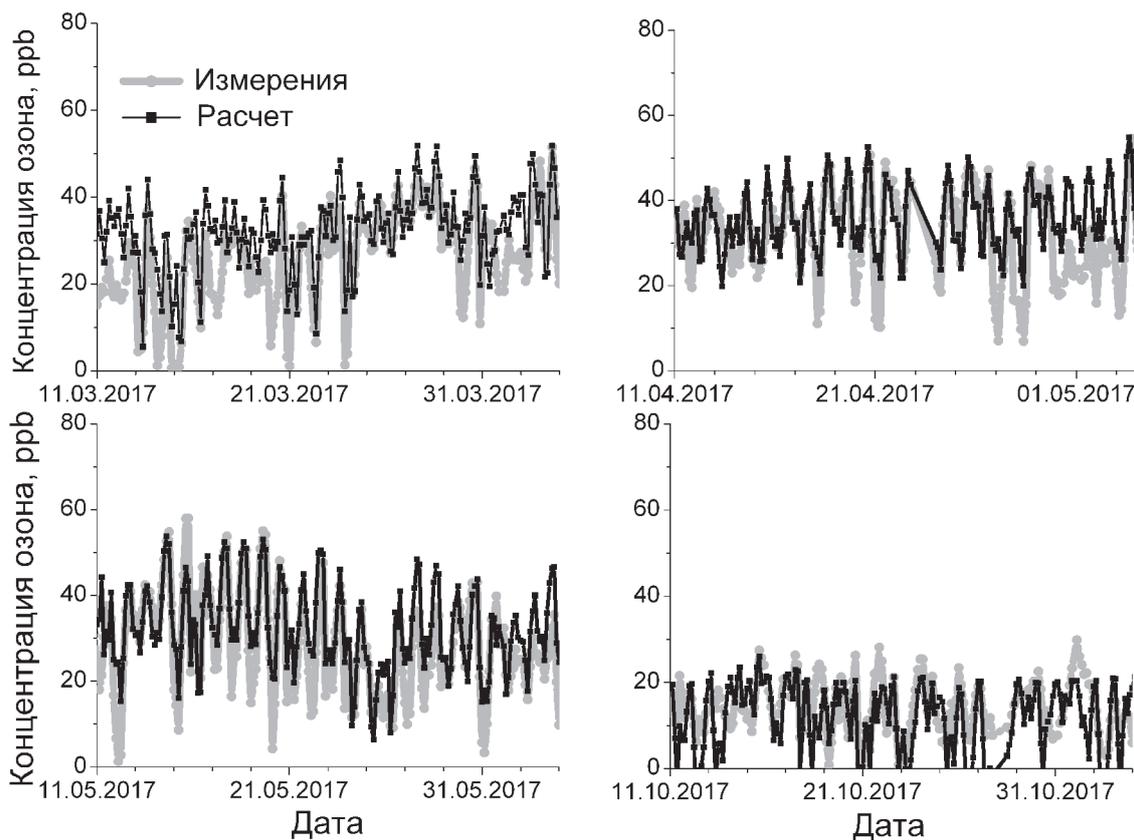


Рис. 3. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Гомель, пункт 14, 2017 г.

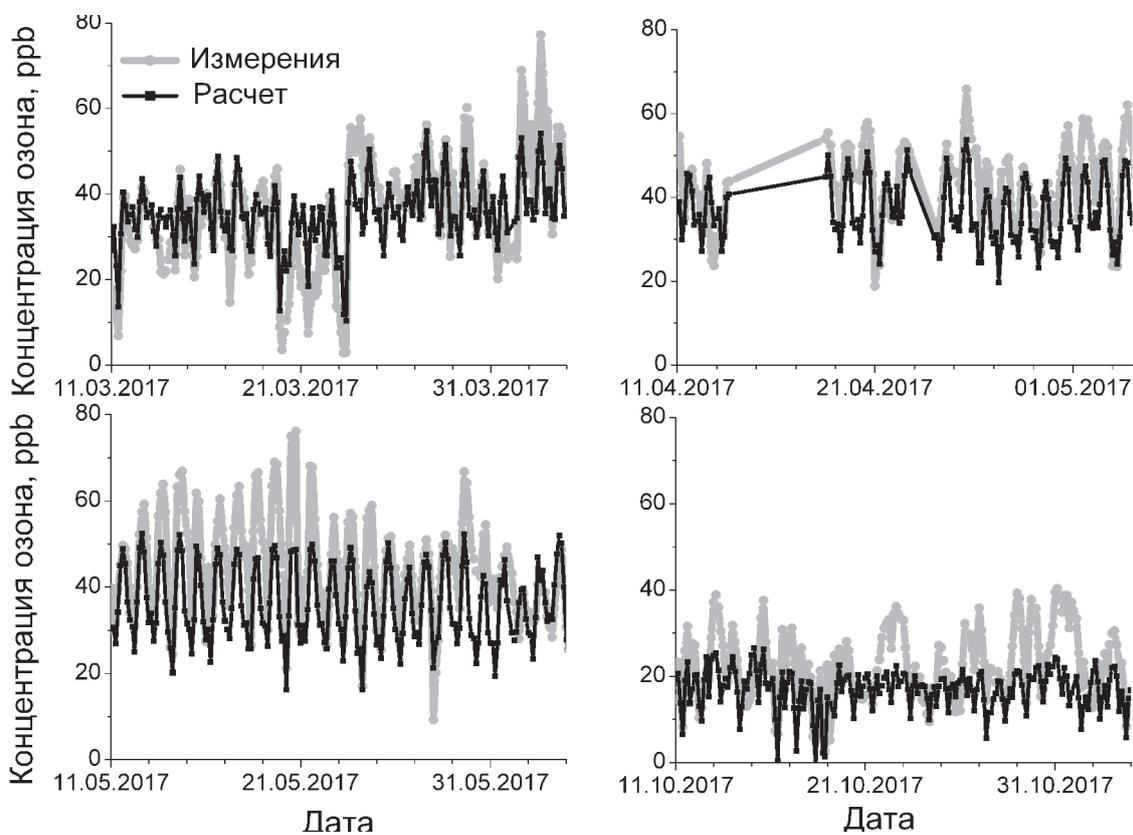


Рис. 4. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Гродно, пункт 07, 2017 г.

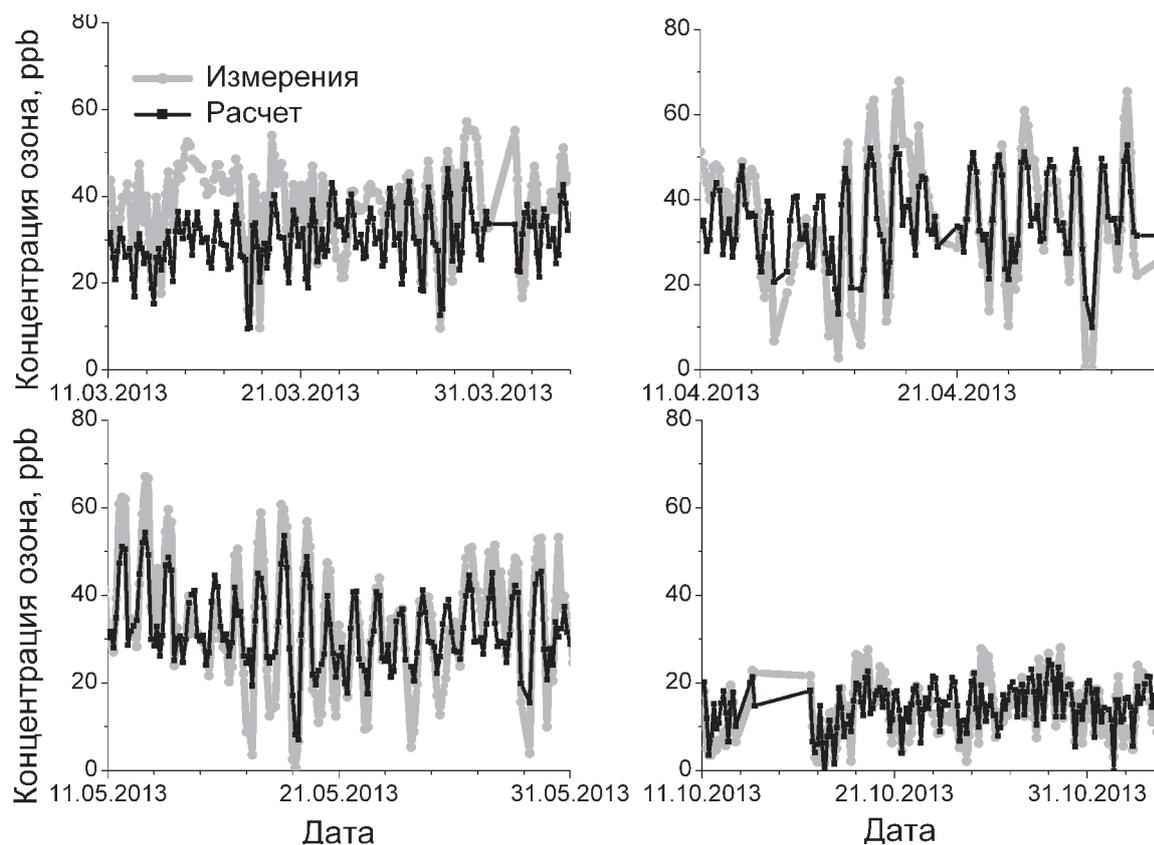


Рис. 5. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Минск, пункт 01, 2013 г.

чуть выше расчетных. В мае расчет очень плохо воспроизводит дневные максимумы. А в октябре несоответствие проявляется еще заметнее.

Минск, 2013 г., пункт 01 (рис. 5). В марте результаты расчетов заметно занижены для максимальных дневных концентраций. В апреле, мае и октябре – уравнение регрессии не способно полностью воспроизвести амплитуду суточного хода измеренных концентраций озона.

Минск, 2014, 2015, 2017 гг., пункт 04 (рис. 6). Во второй декаде января 2014 г. рассчитанные значения концентрации озона оказываются выше измеренных, а в третьей – ниже. В апреле и начале мая 2017 г. хорошо воспроизводятся дневные максимумы, хуже – минимумы. И это объясняется чрезвычайно дождливой погодой: почти каждый день в рассматриваемый период были дожди [11]. В августе и октябре 2014 г. расчет плохо передает дневные максимумы озона, ночные минимумы воспроизводятся заметно лучше.

Минск, 2014 г., пункт 11 (рис. 7). В марте расчет дает несколько пониженные максимальные дневные значения, в апреле и мае соответствие расчета эксперименту хорошее (за исключением нескольких дней), в октябре опять заметно снижение рассчитанных дневных максимумов по сравнению с измерениями.

Минск, 2012, 2014 гг., пункт 13 (рис. 8). В феврале 2012 г. расчеты показывают завышенные значения концентрации озона по сравнению с измеренными. В мае и августе 2014 г. ситуация меняется в разные дни: есть превышение расчета по сравнению с измерениями и понижение. В октябре 2012 г., как и в большинстве других городов в разные годы, расчет показывает в основном более низкие концентрации озона по сравнению с измеренными, иногда ночным минимумам соответствуют отрицательные значения.

Могилев, 2014, 2017 гг., пункт 04 (рис. 9). В январе 2014 г. повторяется ситуация, когда результаты измерений по-разному воспроизводятся в расчетах: в первой декаде месяца заметно превышение расчета над экспериментом, во второй – отставание. В апреле и мае 2017 г. имеется вполне хорошее соответствие рассчитанных и измеренных максимальных дневных концен-

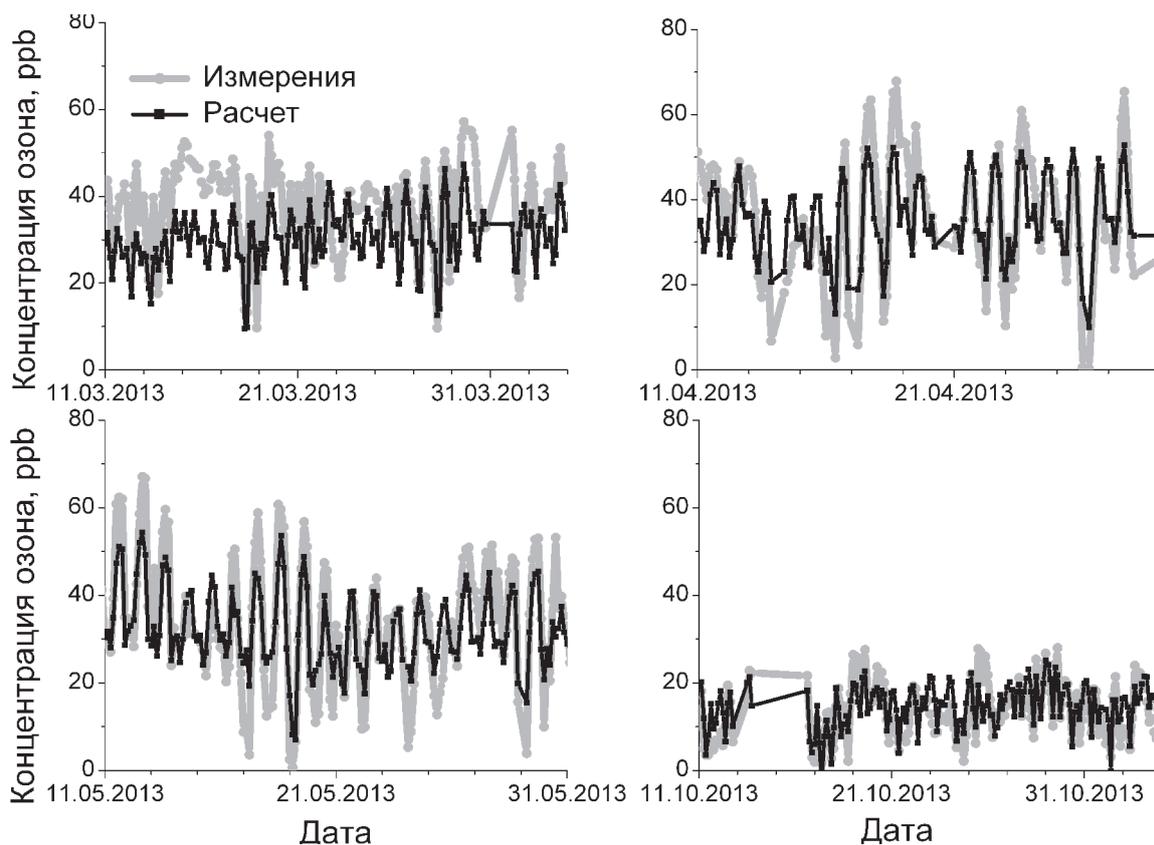


Рис. 6. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Минск, пункт 04, 2014, 2015, 2017 гг.

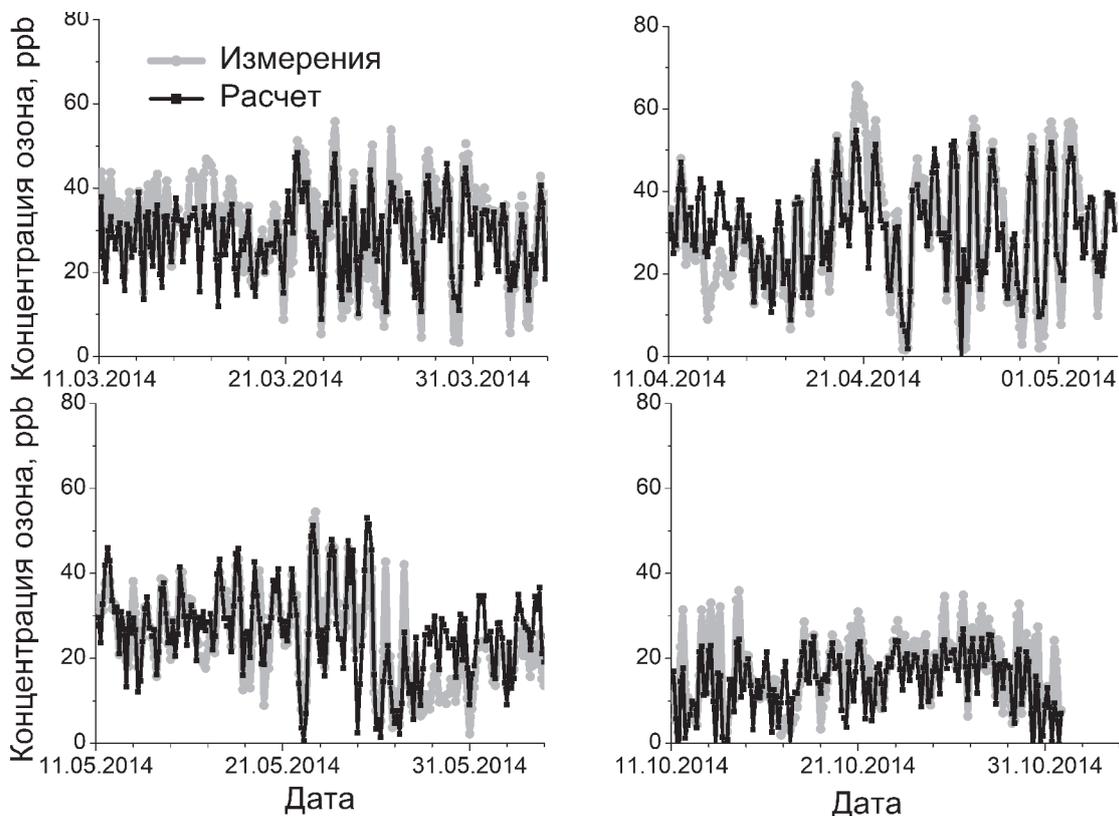


Рис. 7. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Минск, пункт 11, 2014 г.

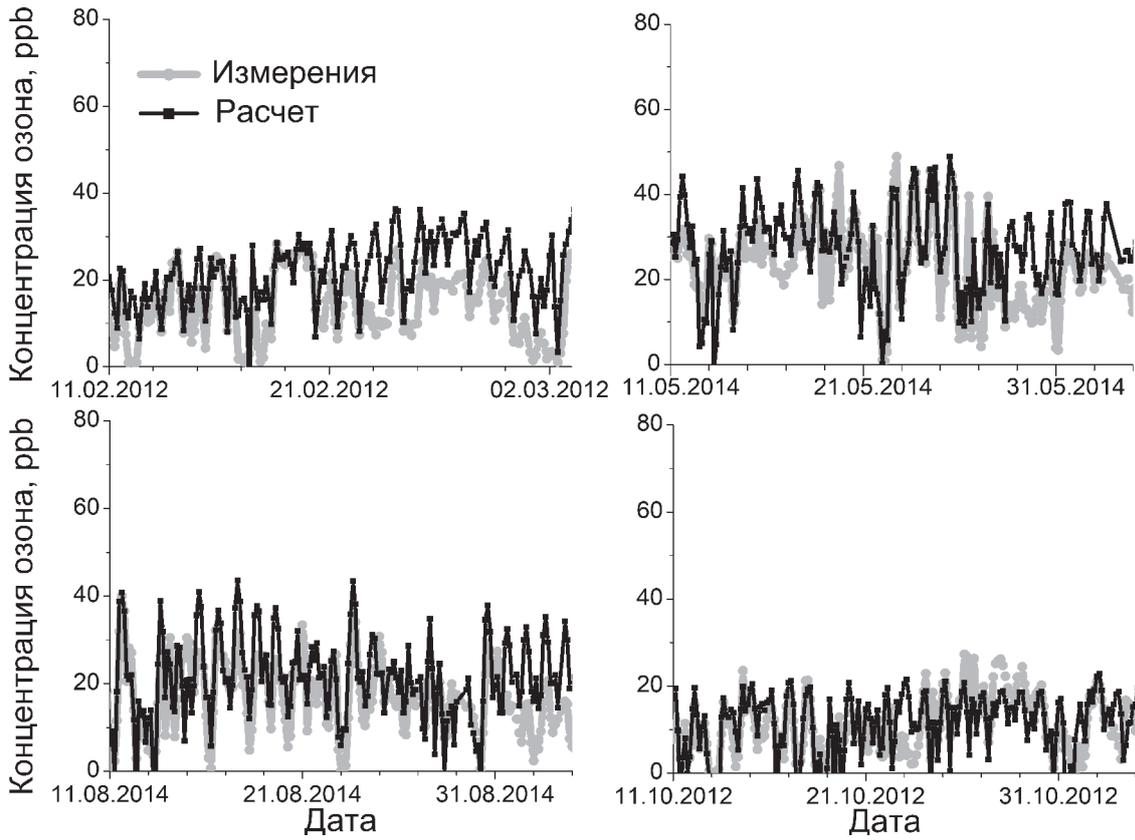


Рис. 8. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Минск, пункт 13, 2012, 2014 гг.

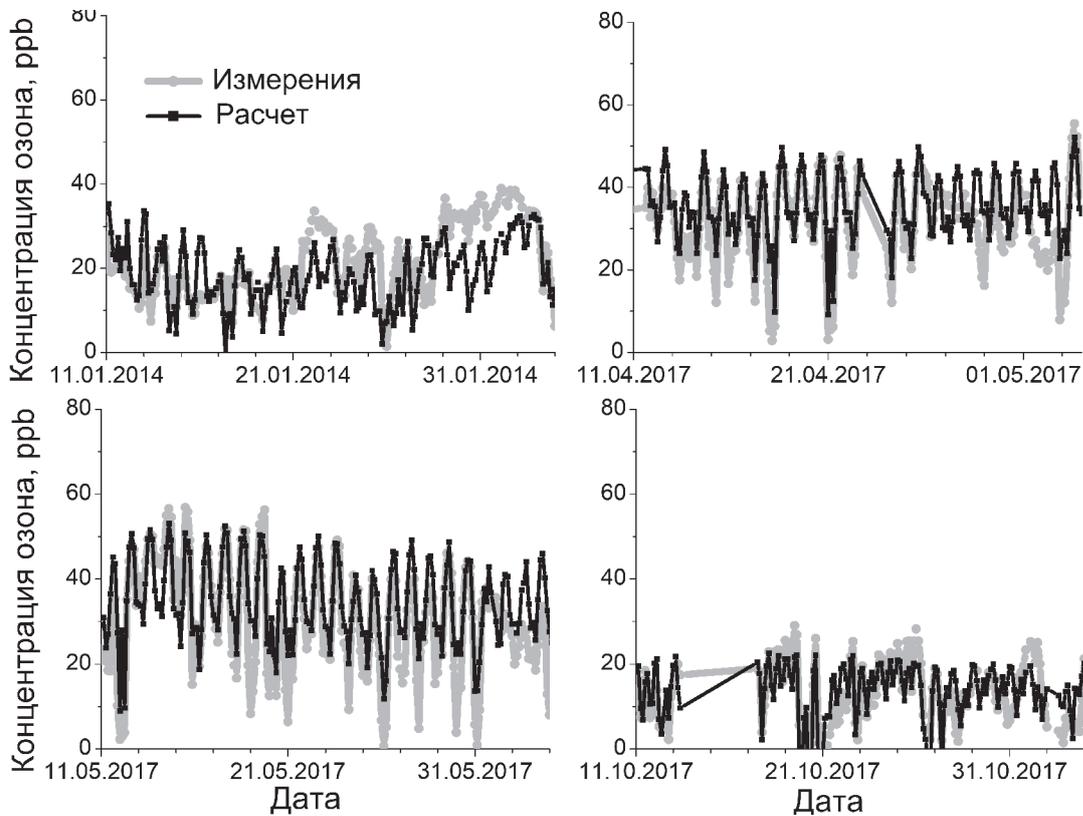


Рис. 9. Сравнение рассчитанных концентраций приземного озона с измеренными. г. Могилев, пункт 04, 2014, 2017 гг.

траций и слабое минимальных ночных. В основном наибольшие расхождения между измеренными (более низкими) и расчетными ночными минимумами происходит в дождливую погоду [11]. В октябре опять появляются отрицательные расчетные данные и низкие по сравнению с измерениями максимальные дневные.

Приведенные сравнения расчетов с реальными измерениями позволяют сделать следующие выводы для поиска путей совершенствования используемой методики. В нескольких случаях разница между измеренными и рассчитанными значениями за две последовательные декады месяца меняет знак. В основном это касается весенних месяцев. Возможно, весной не хватает динамики изменения климатической нормы озона, относительно которой рассчитываются флуктуации. Для этого следует исследовать эффект от увеличения числа гармоник в разложении климатической нормы озона. Возможно, это позволит улучшить соответствие и в осенний период.

Уравнение регрессии неспособно в большинстве случаев воспроизвести амплитуду суточного хода измеренных концентраций. Скорее всего, причина заключается в сильной нелинейности зависимости озона от влияющих на него факторов.

**Возможные причины несоответствия расчетов и измерений.** Сравнение результатов расчетов концентрации приземного озона с данными наблюдений в областных центрах Беларуси показывает удовлетворительное соответствие. Об этом также свидетельствует величина доли объясненной уравнением регрессии дисперсии по отношению к дисперсии экспериментальных результатов, составляющая немногим более 60 %. Тем не менее, несмотря на случаи, когда имеется вполне хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными, довольно часто выявляются существенные расхождения, особенно заметные в октябре. Правда, в октябре концентрации озона в городах Беларуси обычно очень низки, не представляют никакой опасности, и по этой причине на плохое соответствие расчетов эксперименту можно было бы не обращать внимания. Однако желательно построить универсальную схему, пригодную для всех случаев.

Причины отличия расчетов от наблюдаемых данных требуют тщательного анализа в каждом конкретном случае с учетом качества измерений концентраций озона и его прекурсоров и детального анализа метеорологических условий во время измерений. В частности, специально не выделялись случаи осадков в виде дождя или снега, а также наличия тумана. В то же время известно, что в таких условиях концентрация приземного озона резко снижается [14]. Частично это происходит вследствие уменьшения интенсивности фотохимически активного солнечного излучения, что учитывается в уравнении регрессии введением соответствующей объясняющей переменной, частично за счет вымывания растворимых прекурсоров озона. Данные о метеорологических условиях, использованные для расчетов коэффициентов регрессии, не содержали информации о наличии осадков, влияющих на качество результатов, и это, безусловно, серьезный недостаток методики.

Возможным вариантом решения проблемы является исключение из набора данных для определения коэффициентов регрессии всех дождливых дней. В этом случае уравнение не сможет адекватно воспроизводить результаты наблюдений в дождливую погоду, однако лучше воспроизводить измерения при отсутствии осадков. Другой более сложный, но в то же время и более совершенный вариант заключается во включении в используемую базу данных сведений об осадках и введении дополнительной объясняющей переменной в уравнение регрессии, учитывающей эти сведения.

Существует также ряд других причин, приводящих к несоответствию расчетных и экспериментальных данных. Некоторые из них указаны в работе [3]. Более полный список источников ошибок в концентрации озона, рассчитанной по уравнению регрессии, с оценкой их роли приводится ниже.

1. Технические сбои в работе анализаторов могут существенно влиять на качество результатов. В настоящее время процедуры калибровки и поверки используемых приборов не удовлетворяют международным требованиям [15]. Измерительная техника не имеет международ-

ных сертификатов и результаты измерений не могут быть приняты мировыми центрами, накапливающими данные о загрязнении воздуха, в частности о концентрации приземного озона. Для полноценного развития и совершенствования системы мониторинга атмосферного воздуха в Беларуси и международного признания результатов наблюдений должны быть предприняты действия в этом направлении.

2. Полнота исходных данных. Поскольку отсутствуют данные о концентрациях всех малых составляющих атмосферы, влияющих на озон, использованная методика в части учета всего лишь нескольких антропогенных загрязнителей воздуха, способных взаимодействовать с озоном, несовершенна. Более того, в используемом уравнении регрессии измеряемые на пунктах мониторинга атмосферного воздуха летучие органические соединения учитываются в виде их суммарной концентрации, хотя давно известно, что они различаются по степени влияния на озон [16]. Поэтому следует учитывать концентрации отдельных веществ с весовыми множителями, пропорциональными эффективности влияния конкретного вещества на озон. Эта эффективность часто бывает неизвестной для конкретных веществ и, возможно, зависит от других параметров атмосферы (температуры, влажности и т. п.).

Допустим также и другой подход: рассматривать каждое соединение как отдельную объясняющую переменную. В этом случае вопрос о значениях весовых множителей снимается и появляется возможность оценить экспериментально эффективность воздействия на озон каждого конкретного вещества в зависимости от других параметров атмосферы.

Возможным источником ошибок является также отсутствие в списке [1] основных объясняющих переменных уравнения регрессии твердых частиц и диоксида серы, входящих в состав измеряемых параметров в атмосферном воздухе. Это задача дальнейших исследований. Проблема заключается в том, что мониторинг названных веществ начался позже и содержащие их ряды данных весьма коротки. Поэтому для учета влияния новых факторов, включенных в систему мониторинга, разрабатываются специальные алгоритмы, чтобы сохранить качество ранее полученных результатов, базирующихся на значительно более широкой базе данных наблюдений.

Помимо антропогенных прекурсоров, имеется ряд веществ естественного происхождения, участвующих в процессах генерации озона в приземном слое воздуха. К ним относятся в первую очередь терпены и изопрены, являющиеся продуктами жизнедеятельности хвойных и лиственных деревьев. Наиболее сильно действие названных веществ проявляется в сельской местности, однако имеются свидетельства их влияния на приземный озон и в городах [17].

3. Ограниченность диапазона изменений объясняющих переменных. Имеется в виду, что все анализируемые экспериментальные данные относятся к небольшой по площади территории страны и различия в значениях отдельных переменных (особенно это касается метеопараметров) невелики. Это приводит к появлению физически необусловленных корреляций между отдельными переменными. Следует также заметить, что корреляции между отдельными переменными существуют даже в одном месте наблюдений. Простейший пример – температура воздуха у поверхности земли и высота Солнца над горизонтом (фотохимическая активность солнечного излучения). Эти параметры почти всегда хорошо коррелируют друг с другом, хотя механизмы их влияния на озон существенно различаются. Названную проблему можно игнорировать до тех пор, пока не ставится вопрос о количественной оценке степени влияния конкретной переменной на концентрацию приземного озона.

4. В работе [4] показано, что используемое уравнение регрессии является аппроксимацией разложения в ряд Тэйлора зависимости приземного озона от влияющих на него факторов. Список объясняющих переменных уравнения регрессии, учитывающий только основные переменные и их взаимные произведения, возможно недостаточен для адекватного описания этой зависимости, несмотря на предпринятые действия по выбору «точки отсчета», около которой ведется разложение. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что добавленные объясняющие переменные в виде произведений трех и четырех основных переменных, интерпретирующие производные более высоких порядков разложения Тэйлора, имеют достаточно заметный коэффициент корреляции с озоном [1].

Сказанное следует интерпретировать как наличие существенной нелинейности в зависимости концентрации приземного озона от объясняющих переменных, что препятствует точному описанию этой зависимости разложением в ограниченный ряд Тэйлора. Более плодотворным может оказаться вариант с введением явных нелинейных зависимостей озона от переменных. В частности, известно [18], что в отсутствие в приземном воздухе летучих органических соединений быстро устанавливается фотохимическое равновесие между концентрациями озона и оксидов азота с учетом интенсивности фотохимически активного солнечного излучения:  $[O_3] \cdot [NO] = J/k \cdot [NO_2]$ . Здесь  $J$  определяет объемную плотность солнечного излучения, приводящего к фотодиссоциации диоксида азота,  $k$  – скорость реакции образовавшегося оксида NO с озоном, квадратные скобки обозначают концентрации соответствующих веществ. Предварительные эксперименты с включением объясняющей переменной в виде  $[NO_2]/[NO]$  показывают ее достаточно высокий коэффициент корреляции с озоном. Иногда с целью более адекватного учета обсуждаемой нелинейности уравнение регрессии применяют не к концентрации озона, а к ее логарифму [11, 12]. Такой подход представляется весьма перспективным и должен быть исследован более детально.

5. Нелокальные эффекты: скорость ветра и вертикальный обмен. Способ обхода этой проблемы обсужден в работе [1] за счет ограничения данными наблюдений только в городах, где усиление ветра и вертикального обмена чаще всего приводит к увеличению концентрации озона. Однако количественные характеристики такого увеличения в рамках предложенной процедуры точно не могут быть определены, поскольку для этого требуется явный учет поля приземного озона и прекурсоров в горизонтальном и вертикальном направлениях в окрестности каждого пункта наблюдений.

6. При обосновании вида уравнения регрессии [1, 4] было выдвинуто предположение о независимости коэффициентов регрессии от времени со ссылкой на результаты пробных расчетов, подтверждающих предположение о независимости от сезона (но не от времени суток). Тем не менее, такая зависимость реально возможна и требует дополнительных исследований. Насколько она сильна, можно судить по изменению объясненной дисперсии при сокращении количества рассматриваемых сезонов и периодов времени суток. Заметное увеличение доли объясненной дисперсии при таких вычислительных экспериментах может служить обоснованным подтверждением существования такой зависимости.

Некоторые из перечисленных выше проблем не являются существенными, другие могут быть устранены по мере расширения списка измеряемых загрязняющих веществ, повышения качества измерений, накопления достаточно длинных рядов измерений озона и его прекурсоров в различных регионах страны, отличающихся климатическими условиями и своим набором основных антропогенных и естественных загрязнителей.

**Заключение.** Приведенные результаты не противоречат принятой концепции однородности поля приземного озона в пределах Беларуси, которое подвержено местным возмущениям за счет флуктуаций метеорологических параметров и специфики антропогенного загрязнения воздуха. Уравнение регрессии, описывающее зависимость отклонения наблюдаемой концентрации приземного озона от ее климатической нормы для «чистой» атмосферы, способно учесть большую часть флуктуаций концентрации озона относительно нормы во всех областных центрах Беларуси, хотя и не совершенно. Основными причинами являются качество измерений, сильная нелинейность зависимости озона от влияющих на него факторов и ограниченность списка этих факторов, фигурирующих в уравнении регрессии в качестве объясняющих переменных.

#### Список использованных источников

1. Климатическая норма приземного озона в чистой атмосфере Беларуси / В. В. Божкова [и др.] // Природные ресурсы. – 2019. – № 2. – С. 94–103.
2. Role of Ozone Deposition in the Occurrence of the Spring Maximum / A. Liudchik [et al.] // Atmosphere-Ocean. – 2015. – Vol. 53, no. 1. – P. 42–49. doi: 10.1080/07055900.2013.853284

3. Флуктуации поля концентрации приземного озона, обусловленные меняющимися метеоусловиями и степенью загрязнения воздуха / Л. М. Болотько [и др.] // Экологический вестник. – 2016. – № 3. – С. 45–52.
4. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон / А. М. Людчик [и др.] // Природные ресурсы. – 2015. – № 1. – С. 95–105.
5. Людчик, А. М. Многолетний тренд приземного озона / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин // Природные ресурсы. – 2014. – № 1. – С. 97–105.
6. Людчик, А. М. Климатология приземного озона в г. Минске / А. М. Людчик, В. И. Покаташкин // Природные ресурсы. – 2014. – № 2. – С. 112–118.
7. Звягинцев, А. М. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений / А. М. Звягинцев, И. Н. Кузнецова // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 38, № 4. – С. 486–495.
8. Daily Peak Ozone Forecast in Istanbul / Y. S. Unal [et al.] // Int. J. Remote Sensing. – 2010. – Vol. 31, no. 2. – P. 551–561.
9. Analysis of the Relationship between Changes in Meteorological Conditions and the Variation in Summer Ozone Levels over the Central Kanto Area / M. Khiem [et al.] // Advances in Meteorology. – 2010. – Vol. 2010. – 13 p. doi: 10.1155/2010/349248
10. Multiple Regression Analysis of Ground level Ozone and its Precursor Pollutants in Coastal Mega City of Mumbai, India / S. A. Marathe [et al.] // MOJ Eco. Environ. Sci. – 2017. – Vol. 2, no. 6. – P. 8. doi: 10.15406/mojes.2017.02.00041
11. Архив погоды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rp5.ru>. – Дата доступа: 28.05.2019.
12. A review of Statistical Methods for the Meteorological Adjustment of Tropospheric Ozone / M. L. Thompson [et al.] // Atmospheric Environment. – 2001. – Vol. 35. – P. 617–630.
13. Space and Time Scales in Ambient Ozone Data / S. T. Rao [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1997. – Vol. 78, no. 10. – P. 2153–2166.
14. Hou, X. The Impacts of Summer Monsoons on the Ozone Budget of the Atmospheric Boundary Layer of the Asia-Pacific Region / X. Hou, B. Zhu, D. Fei, D. Wang // Science of the Total Environment. – 2015. – Vol. 502. – P. 641–649.
15. Transfer Standards for Calibration of Air Monitoring Analyzers for Ozone (Technical Assistance Document) EPA-600/4-79-056 (1979).
16. Kleinman, L. I. The Dependence of Tropospheric Ozone Production Rate on Ozone Precursors / L. I. Kleinman // Atmospheric Environment. – 2005. – Vol. 39. – P. 575–586.
17. 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00378-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00378-8)
18. Jenkin, M. E. Ozone and Other Secondary Photochemical Pollutants: Chemical Process Governinig their Formation in the Planetary Boundary Layer / M. E. Jenkin, K. C. Clemitshaw // Atmospheric Environment. – 2000. – Vol. 34. – P. 2499–2527.

Поступила 30.07.2019