

А. М. Людчик¹, Е. А. Мельник², П. Н. Павленко³, С. И. Гуляева¹

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

²Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, Минск, Беларусь,
e-mail: kbb@hmc.by

³Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ДИОКСИДА СЕРЫ НА ПРИЗЕМНЫЙ ОЗОН В БЕЛАРУСИ

Аннотация. Приведены сведения об антропогенном загрязнении воздуха диоксидом серы в Беларуси и о его влиянии на формирование наблюдаемой концентрации приземного озона. Задача решалась посредством построения уравнения регрессии, аппроксимирующего зависимость концентрации приземного озона от метеорологических условий и прекурсоров озона. Присутствие диоксида серы в городском воздухе приводит к снижению концентрации приземного озона за счет связывания диоксида азота. Именно фотолиз последнего является источником атомарного кислорода и последующей генерации озона. Исследована особенность уравнения регрессии, когда учет фактора, отрицательно влияющего на приземный озон, иногда приводит к увеличению его рассчитанных концентраций.

Ключевые слова: диоксид серы, приземный озон, уравнение регрессии, диоксид азота, метеорологические условия

A. M. Liudchik¹, E. A. Melnik², P. N. Paulenka³, S. I. Gulyaeva¹

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

²Republican Center for Hydrometeorology, Control of Radioactive Contamination and Environmental Monitoring, Minsk, Belarus,
e-mail: kbb@hmc.by

³Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

INFLUENCE OF SULFUR DIOXIDE ON SURFACE OZONE IN BELARUS

Abstract. Information on anthropogenic air pollution with sulfur dioxide in Belarus and on its influence on the formation of the observed concentration of ground-level ozone is presented. The problem was solved by constructing a regression equation approximating the dependence of the ground-level ozone concentration on meteorological conditions and ozone precursors. The presence of sulfur dioxide in urban air leads to a decrease in the concentration of ground-level ozone due to the binding of nitrogen dioxide. It is the photolysis of the latter that is the source of atomic oxygen and the subsequent generation of ozone. A feature of the regression equation is investigated when taking into account a factor that negatively affects ground-level ozone sometimes leads to an increase in its calculated concentrations.

Keywords: sulfur dioxide, ground-level ozone, regression equation, nitrogen dioxide, meteorological conditions

А. М. Людчык¹, Е. А. Мельнік², П. М. Паўленка³, С. І. Гуляева¹

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

²Рэспубліканскі цэнтр па гідраметэаралогіі, кантролю радыяактыўнага забруджвання і маніторынгу навакольнага асяроддзя, Мінск, Беларусь,
e-mail: kbb@hmc.by

³Беларускі нацыянальны тэхнічны ўніверсітэт, Мінск, Беларусь,
e-mail: pavlenko_pn@mail.ru

УПЛЫЎ ДЫЯКСІДУ СЕРЫ НА ПРЫЗЕМНЫ АЗОН У БЕЛАРУСІ

Анатацыя. Прыведзены звесткі пра антрапагеннае забруджванне паветра дыяксідам серы ў Беларусі, пра яго ўплыў на фарміраванне назіраемай канцэнтрацыі прыземнага азону. Задача вырашалася з дапамогай пабудовы ўраўнення рэгрэсіі, апраксімуючага залежнасць канцэнтрацыі прыземнага азону ад метэаралагічных умоў і прэкурсараў азону. Присутнасць дыяксіду серы ў гарадскім паветры прыводзіць да зніжэння канцэнтрацыі прыземнага азону за кошт звязвання дыяксіду азоту. Менавіта фатоліз апошняга з'яўляецца крыніцай атамарнага кіслароду і наступнай генерацыі азону. Даследавана асаблівасць ураўнення рэгрэсіі, калі ўлік фактару, адмоўна ўплываючага на прыземны озон, часам прыводзіць да павелічэння яго разлічаных канцэнтрацый.

Ключавыя словы: дыяксід серы, прыземны озон, ураўненне рэгрэсіі, дыяксід азоту, метэаралагічныя ўмовы

Введение. В работе [1] с использованием наблюдений в областных городах на пунктах мониторинга атмосферного воздуха Национальной системы мониторинга окружающей среды, наблюдений на метеорологических станциях и расчетов была определена приближенная зависи-

мость концентрации приземного озона от метеоусловий и антропогенных загрязнителей воздуха: CO, NO, NO₂, летучих органических соединений (ЛОС) – бензола, толуола, ксилола. Задача решалась посредством нахождения коэффициентов уравнения линейной регрессии, аппроксимирующего названную зависимость. Результаты позволяют объяснить более 60 % дисперсии флуктуаций измеренных концентраций озона.

Перечисленные выше загрязнители воздуха не исчерпывают список влияющих на озон веществ. Помимо них следует учитывать такие антропогенные загрязнители, как диоксид серы, формальдегид, метан, другие летучие органические соединения. В воздухе также присутствуют и загрязнители естественного происхождения. Из сказанного следует вывод, что полученная зависимость не совершенна и может быть уточнена за счет расширения списка учитываемых веществ.

Система мониторинга атмосферного воздуха в городах Беларуси развивается и расширяется список определяемых загрязняющих веществ. В частности, становятся доступными результаты измерений концентраций твердых частиц и диоксида серы. Названные загрязнители также участвуют в процессах образования и разрушения озона в приземном слое атмосферы и должны быть включены в список объясняющих переменных уравнения регрессии.

Можно ожидать, что диоксид серы, восстановитель, содержащийся в городском воздухе, будет реагировать с окислительной атмосферой, создаваемой фотохимическим смогом. Однако он не вступает в непосредственную реакцию ни с озоном, ни с диоксидом азота в воздухе, хотя эти реакции могут происходить в растворе или на поверхностях [2]. В то же время диоксид серы реагирует с другими, менее четко идентифицированными окислителями, которые синтезируются в процессе фотохимического образования смога. Один из механизмов включает реакцию SO₂ с NO₃ (или с N₂O₅ – соединением, образующемся в результате реакции NO₂ с O₃). Взаимодействие SO₂ с фотохимическим смогом исследовали в лабораторных условиях [3]. Анализ показал, что эффективность влияния SO₂ на озон зависит от концентраций водяного пара, исходного диоксида азота и диоксида серы. Эффект также зависит от типа углеводорода, присутствующего в анализируемой смеси газов. Во всех исследованных случаях максимальная концентрация NO₂ оказывалась ниже при наличии SO₂. Иными словами, в присутствии диоксида серы возможности генерации озона за счет солнечного излучения уменьшаются вследствие снижения концентрации потенциального источника атомарного кислорода – диоксида азота.

В других публикациях описаны случаи как генерации озона в приземном воздухе в присутствии диоксида серы, так и его уничтожения в зависимости от условий. В частности, в [4] определенно подчеркивается положительная корреляция SO₂ с озоном: «SO₂ является 3-м наиболее важным фактором, участвующим в процессах образования O₃, однако ранее основное внимание уделялось влиянию ЛОС, и роль этого загрязнителя игнорировалась». В [5] определена отрицательная корреляция озона с диоксидом серы летом и в муссонный сезон, однако она становится положительной зимой. Еще более сложный вид корреляции диоксида серы с озоном в различные сезоны отмечается в работе [6].

Здесь следует заметить, что сам факт отрицательности коэффициента корреляции объясняемой переменной с объясняющей вовсе не означает, что вторая уменьшает значения первой (или, наоборот, первая уменьшает значения второй). Существует достаточно много причин, влияющих на знак коэффициента корреляции, и выбрать правильную становится возможным, только если представлены и доказаны физические или химические механизмы, демонстрирующие связь между переменными. Например, никак не взаимодействующие друг с другом загрязнения воздуха могут иметь положительный коэффициент взаимной корреляции, если они имеют общие источники. Именно приведенные в [2, 3] результаты лабораторных исследований позволяют заключить, что диоксид серы реально может оказывать влияние на приземный озон, хотя о направлении такого влияния однозначного ответа до сих пор нет. Впрочем, стратосферный озон тоже взаимодействует с поступающим в стратосферу диоксидом серы во время мощных извержений вулканов, и результат такого взаимодействия также не однозначен [7].

В работах [5, 8, 9] отмечено сходство суточного хода диоксида серы с ходом концентраций других антропогенных загрязнений воздуха: два пика – утром и вечером. Не обнаружено также характерного для других антропогенных загрязнений различия в концентрациях SO_2 в выходные и будние дни на всех участках отбора проб [9]. Концентрации SO_2 увеличивались с высотой из-за выбросов дымовых газов. Это вполне согласуется с некоторыми наблюдениями в Беларуси, когда интенсификация вертикального перемешивания заметно снижала концентрации практически всех антропогенных загрязнителей в приземном воздухе, однако это не касалось диоксида серы. Несколько отличающийся суточный ход диоксида серы зафиксирован в г. Янбу на западе Саудовской Аравии [10]: два пика во все сезоны, кроме летнего, когда в суточном ходе наблюдаются 3 пика концентрации диоксида серы.

Твердые частицы, присутствующие в воздухе, ослабляют уровень солнечной радиации и тем самым снижают эффективность фотолиза у поверхности земли, приводящего к генерации приземного озона. К тому же возможны различные гетерогенные химические реакции на поверхности этих частиц [2, 3], приводящие, в конечном итоге, к генерации или разрушению озона. Результирующий эффект зависит от состава и концентрации частиц, а также от концентраций других малых составляющих приземной атмосферы. В частности, в исследовании [11] (г. Нанкин, Китай) установлено, что влияние на скорость фотолиза может привести к большему уменьшению O_3 , когда концентрации частиц высоки, в то время как гетерогенные реакции преобладают над восстановлением O_3 при низких концентрациях частиц. Тем не менее, механизм и совокупное влияние частиц на скорость фотолиза и на гетерогенные реакции до конца не изучены.

Диоксид серы в воздухе городов Беларуси. Наблюдения за концентрацией диоксида серы в городском воздухе начались в 2012 г. и в настоящее время проводятся во всех областных центрах Беларуси, на станции фонового мониторинга в Березинском биосферном заповеднике и некоторых других городах республики. Накопленные данные позволяют сделать некоторые выводы о загрязнении воздуха диоксидом серы. Низкие среднемесячные значения концентраций порядка 3 ppb регистрируются в Березинском заповеднике, Гомеле, Гродно и Могилеве. В Минске и Бресте – около 5 ppb. В Витебске после нескольких лет перерыва в измерениях с начала 2019 г. до середины 2020 г. фиксировались среднемесячные значения около 7–8 ppb, однако к концу 2020 г. они понизились до 2,5 ppb и остаются на таком уровне по настоящее время. При нормальных условиях концентрации 1 мкг/м^3 диоксида серы соответствует 0,375 ppb.

В качестве примера на рис. 1 представлены результаты измерений в начале 2020 г. концентрации диоксида серы на четырех пунктах мониторинга атмосферного воздуха в г. Минске. Видно, что на относительно плавный ход концентрации иногда накладываются кратковременные положительные флуктуации, в некоторых случаях превышающие 10 ppb. Длительность этих

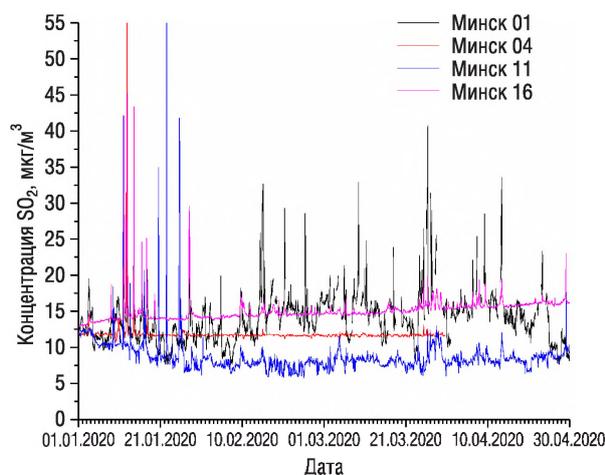


Рис. 1. Результаты измерений концентрации SO_2 на пунктах мониторинга атмосферного воздуха в г. Минске. Январь – апрель 2020 г.

флуктуаций составляет от 3 до 8 ч. Они нерегулярны и часто не совпадают с утренними и вечерними пиками концентраций других антропогенных загрязнений воздуха. Такая же ситуация характерна и для других мест наблюдений. Судя по данным, приведенным на рисунке, флуктуации одновременно проявляются на всех пунктах мониторинга в г. Минске, только с разной амплитудой и, возможно, с небольшим сдвигом по времени, что свидетельствует об их реальном существовании. Бывают также длительные периоды, когда такие флуктуации отсутствуют.

Исходные данные и детали расчетов. Для расчета коэффициентов уравнения регрессии по методике, описанной в [12], было отобрано несколько десятков тысяч усред-

ненных околосметеорологических сроков результатов измерений во всех областных городах Беларуси. Число измерений значительно меньше, чем было использовано в [1], поскольку тогда не все наблюдения включали регистрацию диоксида серы. Поэтому сравнение результатов новых расчетов (в частности, величины объясненной дисперсии) со «старыми» не корректно.

Помимо метеорологических параметров, включающих солнечную радиацию, температуру и влажность воздуха, скорость ветра и вертикальную устойчивость атмосферы, учитывались также данные о концентрациях оксида углерода, оксида и диоксида азота, диоксида серы, ЛОС (сумме концентраций бензола, толуола и ксилола, пересчитанных в единицы ppb) и среднесуточной концентрации твердых частиц в приземном слое воздуха.

Сначала расчеты проводились без учета переменных, связанных с твердыми частицами и диоксидом серы. В этом случае объясненная дисперсия составила 55 % от полной дисперсии концентрации приземного озона. Затем в список объясняющих переменных были включены дополнительно концентрации SO_2 и твердых частиц. Объясненная дисперсия увеличилась до 58 %. Возможно, это не слишком существенное улучшение качества расчетов, однако оно действительно заметно и подтверждается примерами расчетов по двум названным схемам и их сравнением с наблюдениями. Ввиду очень большого числа использованных в расчетах наблюдений при добавлении дополнительных переменных в уравнение регрессии коэффициенты новых переменных статистически значимы на уровне $\alpha=0,001$, несмотря, казалось бы, на слабое увеличение объясненной дисперсии.

Коэффициент корреляции SO_2 с озоном оказался равным $-0,1$. Это довольно высокое значение, судя по табл. 1. В таблице приведены коэффициенты корреляции с измеренной концентрацией приземного озона основных объясняющих переменных, входящих в уравнение регрессии, для которых значения коэффициентов превышают 0,05 по абсолютной величине. Корреляция твердых частиц с озоном также отрицательна, однако в 2 раза слабее.

Отрицательные коэффициенты корреляции диоксида серы, как впрочем, и ряда других определяемых в городах Беларуси загрязняющих воздух веществ свидетельствуют, что в настоящее время антропогенное загрязнение воздуха в Беларуси приводит к снижению концентрации приземного озона, и не достигло тех уровней, когда в присутствии повышенных концентраций летучих органических соединений происходит его генерация [13].

Анализ взаимной корреляции концентраций диоксида серы и твердых частиц с другими объясняющими переменными позволяет судить о возможных общих источниках загрязнителей (табл. 2). Наибольшие по абсолютной величине значения коэффициента корреляции диоксида серы (причем отрицательные) наблюдаются с диоксидом азота и ЛОС. Возможно, это является свидетельством справедливости упомянутых ранее механизмов взаимодействия диоксида серы с диоксидом азота и ЛОС [2, 3].

Большое положительное значение имеет коэффициент корреляции диоксида серы со скоростью ветра. Это может служить доказательством поступления SO_2 в городской воздух из других регионов или интенсификации вертикального турбулентного перемешивания воздуха при увеличении скорости ветра (в литературе имеются свидетельства [9] о росте концентрации SO_2 с высотой в приземном слое воздуха из-за повышенной высоты источников выбросов). Однако вторая гипотеза маловероятна, поскольку аналогичные эффекты за счет изменения вертикальной устойчивости атмосферы (табл. 2) совершенно незначительны.

Заметные положительные коэффициенты корреляции твердых частиц получены для солнечной радиации, оксидов углерода и азота, отрицательные – для скорости ветра и вертикальной устойчивости атмосферы. Интерпретировать эти данные, наверное, преждевременно,

Таблица 1. Коэффициенты корреляции концентрации приземного озона с основными объясняющими переменными уравнения регрессии

Температура воздуха	0,15
Солнечная радиация	0,08
Скорость ветра	0,19
Концентрация CO	-0,17
Концентрация NO_2	-0,37
Концентрация NO	-0,36
Концентрация ЛОС	-0,20
Концентрация SO_2	-0,10
Частицы <10 мкм	-0,05

Т а б л и ц а 2. Коэффициенты взаимной корреляции диоксида серы и твердых частиц с другими объясняющими переменными

Переменная	Концентрация SO ₂	Концентрация частиц
Температура воздуха	-0,02	0,09
Влажность	-0,01	0,02
Солнечная радиация	-0,04	0,12
Скорость ветра	0,22	-0,09
Вертикальная устойчивость атмосферы	0,01	-0,22
Концентрация CO	0,02	0,15
Концентрация NO ₂	-0,24	0,21
Концентрация NO	-0,03	0,15
Концентрация ЛОС	-0,18	0,11

ствие в воздухе названных загрязнителей в условиях Беларуси уменьшает концентрацию приземного озона. Наиболее ярко такое уменьшение проявляется в случае высоких концентраций диоксида серы и твердых частиц. Тем не менее, четко обнаружить эффект влияния на концентрацию озона запыленности воздуха по данным наблюдений в Беларуси пока не удалось, хотя тщательно анализировался случай сильного аэрозольного загрязнения в апреле 2019 г. [14], а рассчитанные коэффициенты корреляции (табл. 1) свидетельствуют о заметном отрицательном влиянии.

В качестве примера, демонстрирующего роль диоксида серы в формировании наблюдаемой концентрации приземного озона, рассмотрим ситуацию в марте и апреле 2017 г. в Гомеле (пункт наблюдений №14). Как видно из рис. 2, в Беларуси, если отвлечься от иногда наблюдаемых (рис. 1) кратковременных флуктуаций, суточный ход концентрации диоксида серы практически незаметен в отличие от четко ранее установленных утренних и вечерних пиков концентраций других антропогенных загрязнений [15]. Безусловно существующий суточный ход концентрации твердых частиц [11] в данной публикации не обсуждается, поскольку период осреднения концентраций твердых частиц (фракции размером до 10 и до 2,5 мк) на пунктах мониторинга атмосферного воздуха в городах Беларуси составляет 24 ч.

В марте концентрация диоксида серы была высокой по сравнению с апрелем, и это с учетом ее и твердых частиц в уравнении регрессии проявилось в заметном снижении рассчитанных концентраций озона и улучшении соответствия расчета наблюдениям (в частности, дисперсия отклонений рассчитанных концентраций озона от данных наблюдений уменьшилась почти в 2 раза).

В апреле зафиксированы значительно более низкие концентрации SO₂. В результате рассчитанные по уравнению регрессии с учетом диоксида серы и частиц концентрации приземного озона увеличились. При этом возросла дисперсия отклонений данных расчета концентраций озона от экспериментальных значений по сравнению со случаем, когда диоксид серы и частицы не включались в уравнение регрессии. Здесь нет противоречия, поскольку расчеты коэффициентов регрессии осуществлялись с использованием всей совокупности данных наблюдений, а не только приведенных на рисунке.

Концентрации твердых частиц в рассмотренные периоды существенно не различались, поэтому эффект от учета такой переменной в уравнении регрессии нужно искать дополнительно. Здесь следует обратить внимание на одну особенность: результаты расчетов за апрель с учетом диоксида серы превышают рассчитанные данные без его учета, несмотря на отрицательный коэффициент корреляции диоксида серы с озоном. Объяснение этого эффекта проведем с использованием модельного примера.

Пусть переменная z линейно зависит от переменных x и y : $z = a + bx + cy$. Однако мы не догадываемся о том, что имеется зависимость от переменной y , и пытаемся определить коэффи-

поскольку в дальнейшем они будут перепроверяться и уточняться.

Влияние дополнительно учтенных переменных на концентрацию приземного озона зависит, во-первых, от эффективности действия конкретного загрязнителя, во-вторых, от его концентрации в воздухе. Первый аспект проблемы оценен посредством расчета коэффициентов корреляции загрязнителей с озоном. Оказалось, что диоксид серы весьма сильно отрицательно коррелирует с озоном. Концентрация твердых частиц в приземном слое атмосферы также антикоррелирует с озоном, однако в 2 раза слабее. Иными словами, согласно уравнению регрессии, присут-

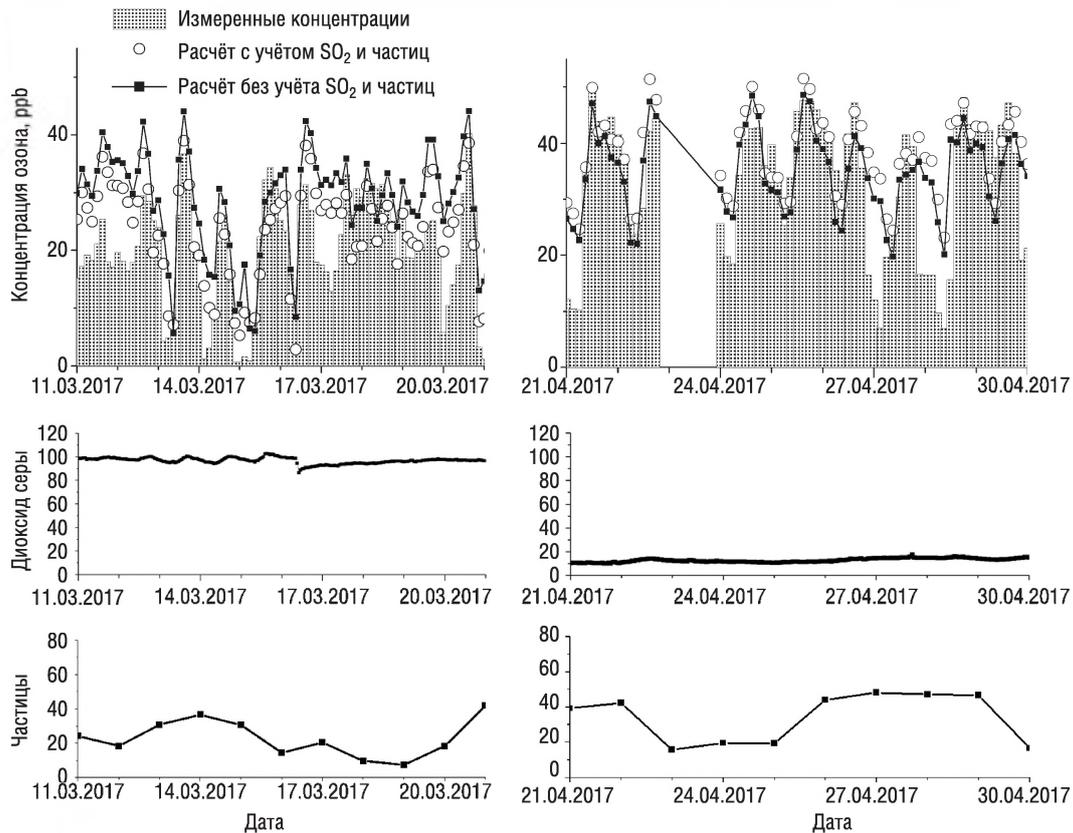


Рис. 2. Результаты наблюдений за приземным озоном в г. Гомеле в марте и апреле 2017 г. и их сравнение с расчетами по уравнению регрессии без учета и с учетом диоксида серы и твердых частиц. Приведены также данные о концентрациях диоксида серы и твердых частиц (фракция до 10 мкм) в эти периоды времени в единицах мкг/м³.

коэффициенты a и b с помощью уравнения регрессии на основании экспериментально измеренных значений z и значений, объясняющих переменную x ($i=1, N$): $z = a' + b'x$. Коэффициенты уравнения регрессии определяются из условия минимума суммы квадратов отклонений, рассчитанных по модели значений z от измеренных: $\sum_{i=1,N} (z_i - a' - b'x_i)^2$. Если сюда подставить точное выражение для z , простые выкладки приводят к следующим выражениям для коэффициентов регрессии:

$$a' = a - c \left(\frac{d_{xy}}{d_{xx}} \bar{x} - \bar{y} \right), \quad b' = b + c \frac{d_{xy}}{d_{xx}}.$$

Здесь черта обозначает усреднение по всей совокупности измеренных значений, $d_{xy} = (1/N) \sum_{i=1,N} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ – ковариация переменных x и y . Очевидно, что рассчитанные по полученному уравнению регрессии результаты будут отличаться от измеренных значений:

$$z'_i = z_i + c \left[\frac{d_{xy}}{d_{xx}} (x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y}) \right].$$

Проанализируем теперь источники этого отличия. Первый член в квадратных скобках продуцирует ошибку в расчете по уравнению регрессии за счет отклонения объясняющей переменной x от ее среднего значения, определенного по совокупности использованных данных для нахождения коэффициентов регрессии. Этот член вносит вклад только если ковариация переменных x и y отлична от нуля, т. е. названные объясняющие переменные заметно коррелируют друг с другом. Второй член всегда дает вклад в ошибку, если переменная y влияет на z (т. е. коэффициент c отличен от нуля) и меняется от измерения к измерению (т. е. результаты отдельных измерений отличаются от среднего значения).

В частности, если под переменной u подразумевать диоксид серы, коэффициент s отрицателен согласно табл. 1. Следовательно, при малых (меньших средней) концентрациях диоксида серы рассчитанные значения z'_i будут в целом меньше реальных, а при высоких концентрациях – больше. Отсюда следует вывод, что уравнение регрессии с учетом диоксида серы приводит в целом к уменьшению рассчитанных концентраций озона в случае повышенных концентраций диоксида серы и к увеличению, когда его концентрация мала. Что и подтверждают данные, приведенные на рис. 1. Интуитивно следовало ожидать безусловного уменьшения рассчитанных значений при учете дополнительной переменной, отрицательно влияющей на объясняемую. Дополнительно отметим, что знак обсуждаемого отклонения зависит от среднего значения объясняющей переменной u , определенной по конкретной выборке $y_i (i=1, N)$, проведенной параллельно с выборкой x_i . В частности, если использовать выборку из другого места наблюдений, где концентрации второй объясняющей переменной в среднем значительно отличаются от среднего значения первой выборки, то результат, полученный с помощью неполного уравнения регрессии, будет совершенно другим. Если же в уравнение внесены все переменные, то расчеты не зависят «от места наблюдений», конечно, с поправкой на ошибки измерений.

Закключение. Присутствие диоксида серы в приземном воздухе Беларуси в настоящее время способствует уменьшению концентрации приземного озона, хотя в других регионах планеты (Индия [4–6]) отмечаются случаи, когда диоксид серы стимулирует его генерацию. Результирующий эффект зависит от концентрации диоксида серы в воздухе, концентраций других загрязнителей, а также от метеорологических условий.

Установлена особенность интерпретации зависимости данных наблюдений от влияющих на них факторов с помощью уравнения регрессии. Отсутствие в списке одной из объясняющих переменных, определенно влияющей на объясняемую, приводит как к положительным, так и к отрицательным отклонениям рассчитанных значений объясняемой переменной от экспериментально измеренных независимо от результирующего эффекта влияния объясняющей переменной на объясняемую. Эту особенность следует иметь в виду при сравнении результатов расчета с измеренными значениями и выработке предположений о возможных важных неучтенных объясняющих переменных. Например, учет отрицательно влияющей объясняющей переменной не всегда уменьшает рассчитанные по уравнению регрессии значения объясняемой переменной.

Представленные на рис. 2 результаты расчетов, включающих учет диоксида серы и твердых частиц, не устраняют полностью различие между рассчитанными и измеренными концентрациями озона. Причиной этого могут быть недостатки использованной методики, неполный учет всех прекурсоров озона и, возможно, некачественные измерения. По названным проблемам ведутся исследования с целью устранения или минимизации их роли.

Список использованных источников

1. Божкова, В. В. Флуктуации поля приземного озона в Беларуси, обусловленные метеорологическими условиями и антропогенным загрязнением воздуха / В. В. Божкова, А. М. Людчик, Е. А. Мельник // Природные ресурсы. – 2020. – № 1. – С. 81–90.
2. Kinetics and mechanism of heterogeneous oxidation of sulfur dioxide by ozone on surface of calcium carbonate / L. Li [et al.] // Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union. – 2006. – Vol. 6, N 9. – P. 2453–2464.
3. Wilson Wm. E., Jr. A Study of Sulfur Dioxide in Photochemical Smog / Wm. E. Wilson Jr., Arthur Levy, D. B. Wimmer // Journal of the Air Pollution Control Association. – 1972. – Vol. 22, N 1. – P. 27–32. DOI: 10.1080/00022470.1972.10469605
4. 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, N 6. – P. 00041. DOI: 10.15406/mojes.2017.02.00041
5. Environmental monitoring of surface ozone and other trace gases over different time scales: chemistry, transport and modeling / R. Venkanna [et al.] // Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2015. – Vol. 12. – P. 1749–1758. DOI 10.1007/s13762-014-0537-8
6. Sharma, R. C. Influence of Oxides of Nitrogen, Carbon Monoxide and Sulpher Dioxide on Surface Ozone Level in Different Meteorological Seasons in Haryana State, Northern India / Ram Chhavi Sharma, Niharika Sharma // Amer. J. Environ. Protection. – 2017. – Vol. 5, N 1. – P. 1–8. DOI: 10.12691/env-5-1-1
7. Scientific Assessment of Ozone Depletion: World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project–Report. – 2018. – N 58. – 590 p.
8. Spatial and temporal distribution of NO_2 and SO_2 in Inner Mongolia urban agglomeration obtained from satellite remote sensing and ground observations / C. Zheng [et al.] // Atmospheric Environ. – 2018. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.06.029

9. *Ozden, O.* Atmospheric Concentrations of Inorganic Pollutants (NO₂, SO₂ and Ozone) in Eskisehir: Spatial and Vertical Variations, Weekday-Weekend Differences / *Özlem Özden Üzmez // Anadolu University Journal of Science and Technology A – Applied Sciences and Engineering.* – 2018. – Vol. 19, N 2. – P. 523–535. DOI: 10.18038/aubtda.376520
10. *Al-Jeelani, H. A.* Diurnal and Seasonal Variations of Surface Ozone and Its Precursors in the Atmosphere of Yanbu, Saudi Arabia / *H. A. Al-Jeelani // Journal of Environmental Protection.* – 2014. – Vol. 5, N 5. – P. 408–422. DOI: 10.4236/jep.2014.55044
11. Influence of atmospheric particulate matter on ozone in Nanjing, China: Observational study and mechanistic analysis / *Y. W. Qu [et al.] // Adv. Atmos. Sci.* – 2018. – Vol. 35, N 11. – P. 1381–1395. DOI: 10.1007/s00376-018-8027-4
12. Статистическая оценка антропогенного воздействия на приземный озон / *А. М. Людчик [и др.] // Природные ресурсы.* – 2015. – № 1. – С. 95–105.
13. *Sillman, S.* Tropospheric ozone, smog and ozone-NO_x-VOC sensitivity / *S. Sillman // Treatise in Geochemistry.* – 2003. – Vol. 9. – P. 407–431.
14. Причины «странного» поведения приземного озона в апреле 2019 г. / *В. В. Божкова [и др.] // Природные ресурсы.* – 2021. – № 2. – С. 94–103.
15. *Bozhkova, V. V.* Influence of meteorological conditions on urban air pollution / *V. V. Bozhkova, A. M. Liudchik, S. D. Umreika // Acta Geographica Silesiana.* – 2020. – Vol. 14, N 4. – P. 5–21.

Поступила 27.09.2021