

Закключение. Основные научные результаты полученные при обосновании и создании такой интеллектуальной подсистемы: модели системы сбора информации о состоянии сетей водоотведения населённых пунктов с распределённой передачей данных качества сточных вод; модели функционирования очистных сооружений населённых пунктов в условиях нестационарности, нелинейности и неполноты входной информации; концептуальная модель цифровизации системы водоотведения водопроводно-канализационных хозяйств в сегменте «транспортировка – очистка сточных вод» на основе критерия экологической эффективности очистных сооружений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Шимова, О.С.* Основы экологии и экономика природопользования / О.С. Шимова, Н.К. Соколовский. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск: БГЭУ, 2010. – 454 с.
2. *Ковалев, М.Я.,* Концепция пилотного регионального проекта «Кричев - малый умный город. Кричевский район. Развиваемся вместе» / М.Я. Ковалев, Л.В. Губич, Г.П. Матюшенко / ОИПИ НАН Беларуси, 2018 г.
3. *Штепа, В.Н.* Data Mining процессов очистки сточных вод с использованием нечётких нейронных сетей / В.Н. Штепа, А.Б. Шикунец // Интеллектуальные информационные системы: теория и практика : сборник научных статей по материалам III Всероссийской конференции, Курск, 22–23 ноября 2022 года / Курский государственный университет; отв. ред. А.А. Халин. - Курск, 2022. – С. 210–216.
4. *Штепа, В.Н.* Интеллектуальная система анализа и прогноза экологической безопасности биологических сооружений очистки сточных вод / В.Н. Штепа, Н.Ю. Золотых // Первая выставка-форум IT-академграда «Искусственный интеллект в Беларуси»: сборник докладов, Минск, 13-14 октября 2022 г. / Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. - Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – С. 41–45.
5. *Штепа, В. Н.* Использование виртуальной меры энергоэффективности водоочистки при цифровизации водопроводно-канализационного хозяйства / В. Н. Штепа, А. Б. Шикунец, Я. Ю. Ёрш // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации («Шлядинские чтения- 2022»): материалы XIV Международной научно-технической конференции, Пенза, 24-26 октября 2022 г. / под ред. Е.А. Печерской. – Пенза : ПГУ, 2022. – С. 182–186.

ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ОЗОнового СЛОЯ OPPORTUNITIES FOR FORECASTING THE STATE OF THE OZONE LAYER

А. Н. Акимов¹, С. И. Гуляева², А. М. Людчик¹
A. N. Akimov, S. I. Gulyaeva, A. M. Liudchik

*¹Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы БГУ,
Минск, Республика Беларусь, liudchikam@tut.by*

*²Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко,
Минск, Республика Беларусь, ms.bruchkovskaya@yandex.ru*

*National Ozone Monitoring Research Centre of the Belarusian State University, Minsk, the Republic of Belarus
Applied Physical Problems Research Institute named after A. N. Sevchenko, Minsk, the Republic of Belarus,*

Анализируется качество сделанного несколько лет назад прогноза состояния озонового слоя над Северным полушарием. Прогноз был получен с использованием концепции динамической климатической нормы и модели квадратичного многолетнего тренда общего содержания озона по данным спутниковых наблюдений за период 1978–2017 гг. Прогнозные значения многолетнего тренда общего содержания озона сравниваются с расчетами тренда по данным за период, включающий и область прогноза. Использована усовершенствованная модель тренда в виде полинома третьей степени, более соответствующая ожидаемому поведению стратосферного озона. Многолетние тренды для обеих моделей практически совпадают в пределах ранее использованного периода, однако прогноз на период 2018–2022 гг. не во всех случаях оправдался. Анализируются причины несоответствия и возможные пути совершенствования прогноза.

Taking into account the recent observations of the ozone layer over the Northern Hemisphere, the quality of the forecast made several years ago for its state is analyzed. The forecast was obtained using the concept of a dynamic climate norm and the model of a quadratic long-term trend of the total ozone content based on satellite observations for the period 1978–2017. The predicted values of the long-term trend of the total ozone content are compared with the results of calculating the trend based on the data for the period that includes the forecast area. The improved third-degree polynomial trend model is used to better match the expected behavior of stratospheric ozone. Long-term trends in both models practically coincide within the previously used period, however, the forecast for the period 2018–2022 is not justified in all cases. The reasons for the discrepancy and possible ways to improve the forecast are analyzed.

Ключевые слова: стратосферный озон, общее содержание озона, динамичная климатическая норма, много-летний тренд стратосферного озона.

Keywords: stratospheric ozone, total ozone, dynamic climate norm, long-term trend of stratospheric ozone.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2023-2-253-257>

В [1] представлены результаты расчета динамичной климатической нормы общего содержания озона (ОСО) в атмосфере над различными регионами средних широт Северного полушария. Сразу следует указать на принципиальное отличие концепции динамичной климатической нормы (см. [1] и ссылки, приведенные там) от ее традиционного определения, принятого Всемирной метеорологической организацией [2]. Согласно [2], нормой называется среднее значение климатического параметра, определенное в течение 30 лет непрерывных наблюдений. А динамичная норма допускает изменение в пределах периода, использованного для своего определения. Таким образом, с учетом не равного нулю многолетнего тренда, норма изменяется от года к году в пределах периода определения. Иными словами, это «живая» норма, меняющаяся со временем не только каждые следующие 30 лет, но и в течение конкретного тридцатилетия. Детали подробно описаны в [1].

Изначально концепция динамичной климатической нормы успешно применялась к метеорологическим параметрам с использованием простейшей модели линейного многолетнего тренда. В [1] авторы применили более «гибкую» модель квадратичного тренда для описания состояния озонового слоя земной атмосферы, подвергнувшегося существенному истощению в результате человеческой деятельности в конце XX века.

Обычно в рамках подобных исследований используются модели тренда, состоящие из двух линейных участков [3]. Квадратичная модель представляется нам более адекватной для описания поведения ОСО над планетой, прошедшего через минимум в течение последних пятидесяти лет. В [1], помимо прочего, анализируется также возможность описания поведения многолетнего тренда ОСО в рамках модели с большими степенями свободы (в виде полинома третьей степени) и приводятся аргументы, обосновывающие отказ от нее на данном этапе. Это известный эффект необоснованного увеличения числа степеней свободы в уравнении регрессии, ведущего к тенденции решения детально описать случайные флуктуации исходных данных.

К настоящему времени удлинились ряды спутниковых наблюдений за ОСО. Если в [1] период наблюдений был 1978 г. – 2017 г. (за исключением 1994 г. – 1995 г., когда измерения проводились прибором, установленным на советском спутнике Метеор-3, и оказались проблемными), то сейчас доступны данные еще почти пяти лет наблюдений. Это предоставляет возможность еще раз попробовать использование модели кубического тренда, поскольку с удлинением рядов данных принятая модель лишается способности реагировать на кратковременные флуктуации измеряемой величины. Дополнительным стимулом для этого является то, что кубическая модель тренда (в отличие от квадратичной) позволяет хотя бы приближенно отразить ожидаемые в XXI веке восстановление и стабилизацию озонового слоя в результате предпринятых мер, поскольку допускает еще один экстремум, помимо минимума в конце прошлого века.

Следует также отметить, что постановка задачи в [1] и в настоящей публикации существенно отличается от «традиционной», когда исследователи интересуются влиянием на озоновый слой только сокращения концентрации антропогенных озоноразрушающих веществ в стратосфере, выделяя этот эффект из ряда других факторов [3]. Предлагаемые решения такой задачи не слишком убедительны, поскольку используют множество до сих пор слабо обоснованных предположений о влиянии ряда наблюдаемых эффектов в тропосфере и океанах на стратосферный озоновый слой. Возможность такого влияния нельзя отрицать, однако физические механизмы до сих пор остаются неясными (на уровне гипотез).

Для подтверждения правомочности используемого подхода достаточно заметить, что основным мотивом принятия Монреальского протокола по веществам, разрушающим озоновый слой, явилось стремление избежать риска увеличения интенсивности вредного для всего живого на Земле солнечного коротковолнового ультрафиолетового излучения [4], зависящего в первую очередь от состояния озоносферы. Это позволяет ставить вопрос о том, как изменяется со временем озоновый слой, и пытаться сделать прогноз изменений в ближайшем будущем, не отвлекаясь на причины наблюдаемых изменений.

Для расчетов, как и в [1], использованы спутниковые измерения ОСО приборами TOMS (1978–1993, 1996–2004) и OMI (2005–2017), дополненные наблюдениями прибором OMI [5] в 2018–2022 гг. Расчеты проведены для регионов, находящихся в полосе широт 30–40 °N, 40 – 50 °N, 50–60 °N и в интервалах долгот 75–120 °W (Северная Америка), 15–60 °W (Атлантика), 5–50 °E (Европа), 70–115 °E (Азия). Данные за каждый день измерений в узлах спутниковой сетки, попадающих в границы выбранного региона, усреднялись и далее обрабатывались по единой методике, описанной в [1]. Там же представлено расположение исследованных регионов на глобусе.

Далее в основном будет анализироваться достоверность прогноза на период с 2018 г. по 2022 г., сделанного в [1]. Анализ осуществляется посредством сравнения с расчетами, включающими данные наблюдений за указанный период на основе более «гибкой» кубической модели многолетнего тренда ОСО. Сразу может возникнуть вопрос, почему сравнение прогноза, полученного с использованием одной модели тренда, сравнивается с результатами обработки расширенного ряда данных в рамках другой модели? Кубическая модель лучше соответствует ожидаемому поведению озонового слоя: после очищения стратосферы от антропогенных озоноразрушающих веществ, следует ожидать восстановления и стабилизации ОСО на «дофреоновом»

уровне, а не ухода в плюс-минус бесконечность, как предполагает параболическая модель тренда. Кубическая модель тоже не избавляет от бесконечности в будущем, однако позволяет «увидеть» точку стабилизации ОСО после прекращения действия выброшенных в атмосферу антропогенных разрушителей озона.

На рис. 1 приведены многолетние тренды среднегодовых значений ОСО для квадратичной [1] и кубической моделей тренда. Квадратичный тренд после 2017 г. содержит прогнозные значения. Прогнозные значения для кубического тренда начинаются после 2022 г. В интервале 1987 г. – 2017 г. обе модели показывают практически совпадающие значения. Это подтверждает достоверность полученных ранее результатов о многолетнем тренде ОСО.

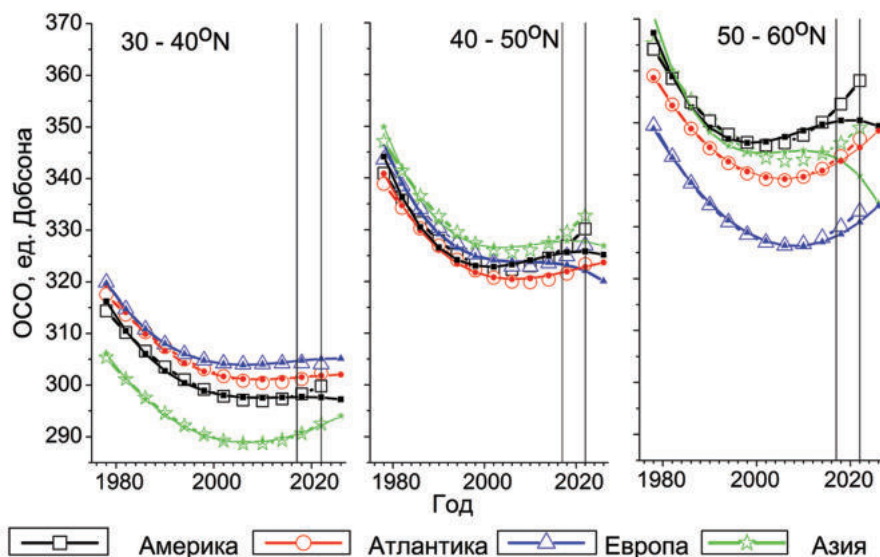


Рисунок 1 – Многолетние тренды среднегодовых значений ОСО в рамках квадратичной (на основании данных за период с 1987 г. по 2017 г. [1]) и кубической (на основании данных за период с 1987 г. по 2022 г.) моделей тренда. Вертикальные линии отмечают верхние границы указанных периодов. Кубическому тренду соответствуют кривые, продолжающиеся за 2022 г. и обозначенные малыми закрашенными метками

В полосе широт 30–40 °N хорошее соответствие наблюдается также и в период 2017–2022 гг. (это период прогноза для квадратичной модели). В более высоких широтах прогноз на основе модели квадратичного тренда уже заметно отличается от результатов расчетов, полученных с моделью кубического тренда и учетом дополнительных данных измерений за этот период. В частности, в интервале широт 40 – 50 °N кубический тренд в этот период в Америке и Азии стабилизировался, в Атлантике он имеет тенденцию к увеличению ОСО. В Европе заметно снижение, как и в случае кубического тренда, рассчитанного по данным сокращенного периода [1]. В интервале широт 50–60 °N в Америке тренд ОСО в этот период стабилен, в Атлантике и Европе продолжается рост, как и предсказывала квадратичная модель, а в Азии заметно резкое снижение. Более детальную информацию можно получить, анализируя сезонную изменчивость многолетних трендов ОСО (рис. 2). Из результатов [1] следует, что тренды для целых широтных поясов малоинформативны, поэтому в данной работе не рассчитывались. Они не представляют интереса, поскольку поведение озона над отдельными регионами пояса сильно различается. Только в интервале 40–50 °N региональные тренды среднегодовых значений ОСО почти совпадают (рис. 2). На более южных и более северных широтах различия между регионами весьма существенны. Единственным источником такого различия является неоднородность земной поверхности, влияющая на динамику не только тропосферы, но и стратосферы, в которой находится основная масса озонового слоя. Именно особенности динамики стратосферы, обусловленные указанной причиной, приводят к региональным различиям в поведении озона и, как оказалось, в последние годы маскируют в Северном полушарии эффект сокращения выбросов озоноразрушающих веществ [3].

В Америке в интервале 30–40 °N зимой и весной рост ОСО прекратился и кривые кубического тренда указывают на начало его уменьшения. Прогноз на основе квадратичного тренда [1] показывал рост в эти сезоны. Летом тренд стабилизировался. Прогнозировавшееся уменьшение ОСО осенью не оправдалось: наблюдается рост. В интервале широт 40–50 °N в зимний и весенний сезоны тренд ОСО в отличие от прогнозирувавшегося роста стабилизировался. Летом и осенью его поведение практически совпадает с полученным ранее прогнозом. В самом северном регионе заметные отклонения от прогноза произошли весной и летом: вместо ожидавшегося увеличения ОСО тренд указывает на его снижение.

Атлантика. Существенные отклонения от прогнозных значений в интервале широт 30–40 °N и 40–50 °N заметны только весной, а в интервале 50–60 °N – зимой (во всех упомянутых случаях прогнозирувавшееся в рамках квадратичной модели увеличение ОСО не оправдалось и в действительности тренд показывает его уменьшение).

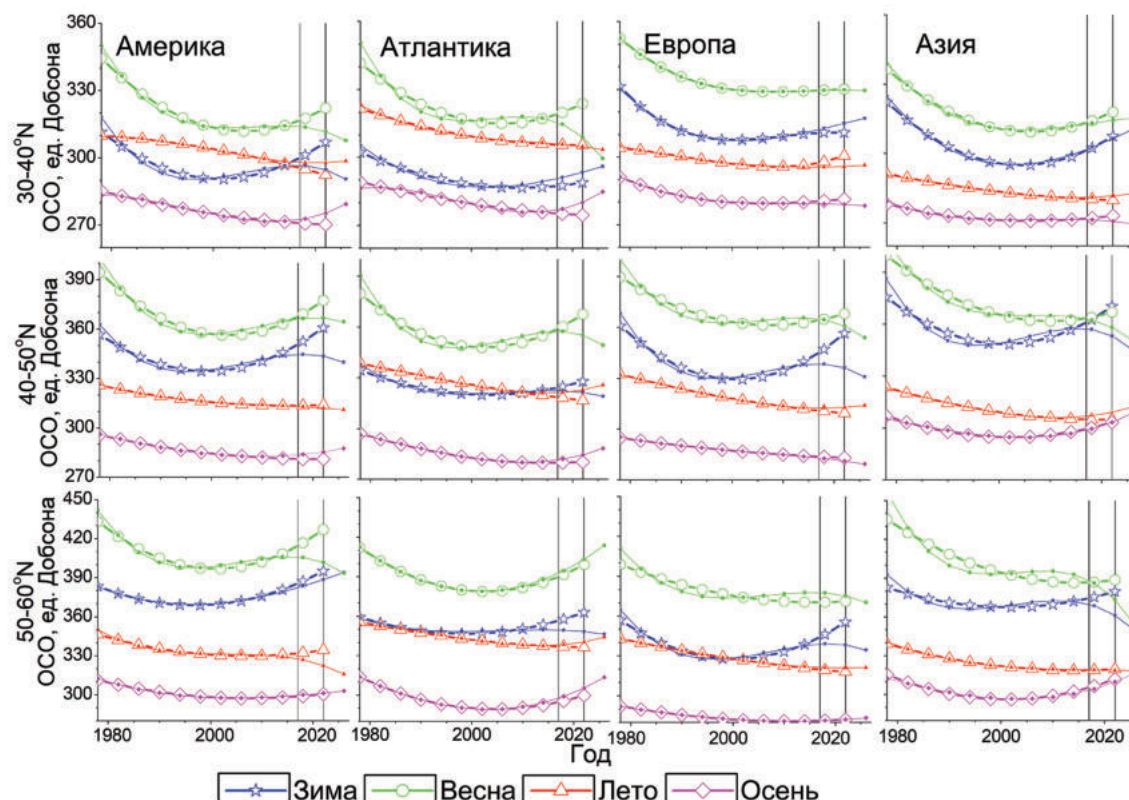


Рисунок 2 – Сезонные многолетние тренды ОСО над различными регионами. Результаты, полученные с кубической моделью тренда, представлены кривыми с малыми закрашенными символами по сравнению с расчетами с квадратичной моделью [1]. Вертикальными линиями, соответствующими 2017 и 2022 гг., обозначены верхние границы периодов, данные за которые использованы для расчетов

Европа. В низких широтах прогноз на основе квадратичного тренда оказался вполне удовлетворительным. Однако в регионах, относящихся к более высоким широтам, заметны отличия от расчетов с использованием кубической модели и расширенного ряда данных. В частности, прогнозируемый рост ОСО в зимнее время не оправдался: кубическая модель показывает медленное снижение. В весеннее время прогноз «обещал» почти стабильное поведение ОСО, а расчеты показали его постепенное снижение. В тоже время, летний и осенний прогнозы полностью подтверждаются.

Азия. В самом южном регионе прогнозы практически совпали с новым расчетом. Это же касается летнего и осеннего многолетних трендов и в двух других регионах. Ошибочность прогноза проявилась в этих регионах только в зимний и весенний периоды: предполагавшийся рост ОСО в действительности оказался его снижением.

Наметившаяся тенденция снижения среднегодовых значений ОСО в атлантическом регионе 40–50 °N в основном обусловлена понижением ОСО в весенние месяцы, быстрое уменьшение среднегодовых значений ОСО в азиатском регионе 50–60 °N – понижением в зимние и весенние сезоны. Это совершенно не связано с продолжающимся очищением стратосферы от озоноразрушающих веществ, способствующим восстановлению озонового слоя, и следует искать другие причины, как делается, например, в [3]. Здесь выявлены сезоны в отдельных регионах, представляющие интерес для поиска таких причин.

Многолетние тренды среднегодовых значений ОСО, а также сезонные тренды, полученные с новой моделью, хорошо согласуются с результатами расчетов по квадратичной модели тренда в интервале 1978 г. – 2017 г., использованном в [1]. При этом, изменение модели тренда с квадратичной на кубическую (за счет добавления в модель дополнительных степеней свободы) привело к статистически значимому улучшению модели.

Прогноз поведения озонового слоя, представленный в [1], в ряде случаев оправдался, в ряде – нет. Одной из основных причин является не слишком подходящая для данного случая полиномиальная аппроксимация тренда ОСО, использованная в расчетах. Повысить достоверность прогноза можно посредством учета дополнительной информации о характере физических и химических процессов в озоновом слое планеты с целью введения обоснованных ограничений на модель многолетнего тренда ОСО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Божкова В.В. Трансформация озонового слоя в средних широтах Северного полушария / В. В Божкова, А. М. Людчик, С. Д. Умрейко // Природные ресурсы. – 2018. – № 2. – С. 102–111.
2. WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals. – 2017. - WMO-No. 1203. – 29 p.

3. Global total ozone recovery trends attributed to ozone-depleting substance (ODS) changes derived from five merged ozone datasets / M. Weber [et al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2022. – Vol. 22. – P. 6843–6859.
4. Environmental effects of stratospheric ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2019 / G. H. Bernhard [et al.] // *Photochem. Photobiol. Sci.* – 2020. – Vol. 19. – P. 542–584.
5. NASA Ozone Watch [Electronic resource]. – Mode of access: <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/data>. – Date of access: 14.11.2022.

**ЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА УЧЕТА НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА ОТ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ
И КОНЦЕНТРАЦИЙ АНТРОПОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ ВОЗДУХА**

**EFFICIENT METHOD FOR ACCOUNTING OF THE NONLINEAR DEPENDENCE
OF THE SURFACE-LEVEL OZONE CONCENTRATION ON METEOPARAMETERS
AND CONCENTRATIONS OF ANTHROPOGENIC AIR POLLUTANTS**

А. М. Людчик¹, А. Н. Акимов¹, П. Н. Павленко²
A. M. Liudchik, A. N. Akimov, P. N. Paulenka

¹Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы
Белорусского государственного университета,
г. Минск, Республика Беларусь
liudchikam@tut.by

²Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
pavlenko_pn@mail.ru

National Ozone Monitoring Research Centre of the Belarusian State University, Minsk, the Republic of Belarus
Belarusian National Technical University, Minsk, the Republic of Belarus

Представлено обоснование и описание методики учета нелинейности в зависимости концентрации приземного озона от метеоусловий и концентраций антропогенных загрязнений воздуха в месте наблюдений. Авторы доклада предприняли попытку объединить все наиболее эффективные подходы к построению уравнения регрессии для концентрации приземного озона, предложенные ранее.

The substantiation and description of the methodology for accounting of nonlinearity in the dependence of surface-level ozone concentration on meteorological conditions and concentrations of anthropogenic air pollution at the observation site is presented. The authors of the report make an attempt to combine all the most effective approaches to constructing a regression equation for the concentration of surface-level ozone proposed earlier.

Ключевые слова: приземный озон, уравнение регрессии, нелинейность, метеорологические условия, антропогенные загрязнители воздуха.

Keywords: surface-level ozone, regression equation, nonlinearity, meteorological conditions, anthropogenic air pollutants.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2023-2-257-260>

Приземный озон является вторичным загрязнителем атмосферы, поскольку в основном образуется за счет фотолиза коротковолновым солнечным излучением других загрязнителей воздуха естественного и антропогенного происхождения. Часть приземного озона формируется также за счет обмена воздухом между тропосферой и стратосферой, где концентрации озона особенно велики. Ввиду сказанного, наблюдаемые концентрации озона у поверхности земли существенно зависят от метеорологических условий и уровня загрязнения приземного воздуха прекурсорами озона.

Озон считается опасным загрязнителем, так как угнетающе действует на живые организмы и способствует разрушению материалов. Поэтому задача изучения климатологии приземного озона и получения его достоверного прогноза на будущее с учетом меняющегося климата и экологической обстановки весьма актуальна.

В Национальном научно-исследовательском центре мониторинга озоносферы (НИИЦ МО) было предложено уравнение регрессии [1], описывающее зависимость концентрации приземного озона от метеоусловий и концентраций антропогенных загрязнителей воздуха в месте наблюдений. Уравнение является аппроксимацией зависимости приземного озона от влияющих на него факторов многочленом Тэйлора с учетом членов второго порядка.