

УДК 504.3.054

АНОМАЛЬНАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В ТРОПОСФЕРЕ ВЕСНОЙ 2020 ГОДА В СРЕДНЕЙ ПОЛОСЕ РОССИИ

С. Н. Котельников, Е. В. Степанов

В средней полосе России весной 2020 года зафиксированы аномально низкие концентрации озона в приземной атмосфере. Обычный для весны рост содержания озона, обусловленный сезонным повышением температуры и освещенности, сменился монотонным падением. Усредненные за месяц максимальные суточные значения наблюдаемых величин в апреле 2020 года были в 3 раза меньше величин, зафиксированных в это же время в 2019 году. Наблюдалось как снижение региональных фоновых концентраций озона в приземной атмосфере, так и уменьшение интенсивности фотохимического его образования. Наиболее вероятная причина наблюдавшегося явления – уменьшение выбросов в атмосферу продуктов горения в Китае, Европе и России, обусловленное введением особых режимов в связи с пандемией COVID-19.

Ключевые слова: тропосферный озон, загрязнение атмосферы, фотохимическое образование озона, пандемия COVID-19.

Введение. Непрерывный и долговременный мониторинг содержания озона (O_3) в приземной атмосфере проводится нами в достаточно чистом (фоновом) районе в средней полосе России на протяжении последних 12 лет [1]. Станция мониторинга расположена в точке с координатами $56^{\circ}13' N$, $51^{\circ}4' E$ в городе Вятские Поляны Кировской области. Это место удалено от ближайших крупных городов на расстояния более 100 км, в городе отсутствуют промышленные предприятия.

Станция оснащена оборудованием для автоматического долговременного мониторинга концентрации озона и метеопараметров. Используются приборы, сертифициро-

ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: skotelnikov@mail.ru, EugeneStepanov@yandex.ru.

ванные для применения в целях высокоточного мониторинга и проходящие регулярную аттестацию и калибровку. Для измерения содержания O_3 используется хемилюминесцентный анализатор модели 3.02П-А производства ЗАО «ОПТЭК», Россия. Анализируемый атмосферный воздух непрерывно прокачивается через измерительную ячейку прибора. Чувствительность анализатора составляет 1 мкг/м^3 , периодичность измерений – 1 минута [2].

Озон образуется в приземной атмосфере за счет цикла фотохимических реакций в присутствии соединений-прекурсоров – окислов азота, моноокси углерода и летучих углеводородов. Наличие озона в приземной атмосфере свидетельствует о загрязнении атмосферного воздуха продуктами процессов горения, выбрасываемыми автомобильным и авиационным транспортом, теплоэлектростанциями и другими промышленными источниками, а также образуемыми при лесных пожарах. Озон в приземной атмосфере является интегральным показателем качества окружающего воздуха. Скорость образования тропосферного озона увеличивается с ростом температуры и освещенности и максимальна в весенне-летний период.

Достаточно хорошо изучены основные закономерности сезонных и суточных вариаций озона, которые обусловлены изменчивостью температуры и влажности окружающей среды, интенсивности и длительности солнечного освещения. Кроме того, баланс содержания озона в приземной атмосфере определяется множеством других факторов, среди которых: загрязненность воздуха, горизонтальный и вертикальный перенос из верхних слоев, вымывание и сухой сток при взаимодействии с поверхностью Земли и т. п.

Типичный годовой ход концентрации озона в приземной атмосфере показан на рис. 1. Быстрые и значительные изменения содержания озона в атмосфере, имеющие на этом рисунке вид случайного шума, обусловлены регулярными суточными вариациями. На рисунке хорошо видны постепенное возрастание содержания озона в воздухе весной и высокие максимальные уровни в летние месяцы, достигающие уровня $\sim 200 \text{ мкг/м}^3$. Осенью и зимой, когда снижается интенсивность солнечного освещения, содержание озона в приземной атмосфере падает.

Многолетний непрерывный мониторинг содержания озона в приземной атмосфере в относительно чистом (фоновом) районе позволяет наблюдать долговременные тренды, обусловленные ростом общего загрязнения атмосферы и климатическими изменениями (ростом температуры, учащением волн тепла и увеличением их амплитуды).

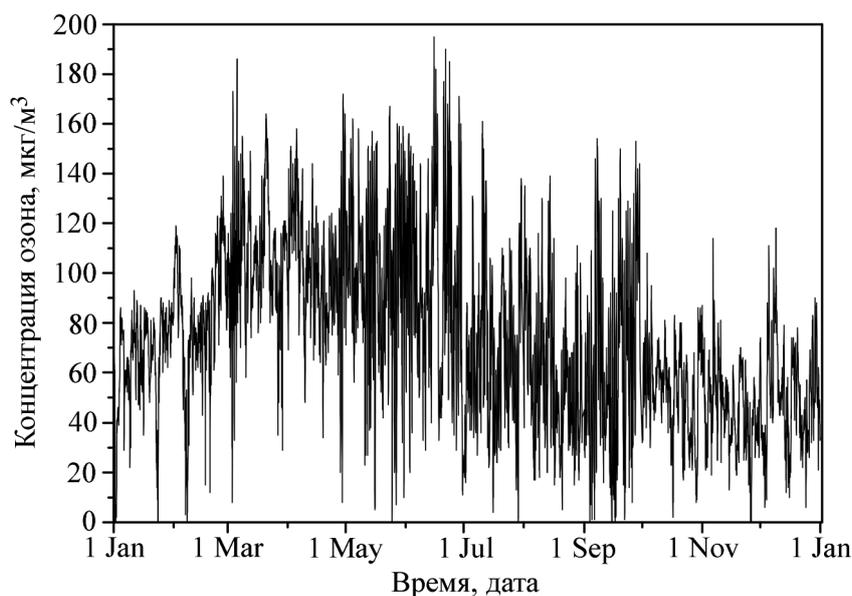


Рис. 1: Типичный годовой ход приземных концентраций озона на станции Вятские Поляны, 2015 год.

Результаты мониторинга. Наше пристальное внимание было направлено на анализ содержания озона в приземной атмосфере в начале 2020 года, когда во всем мире началась пандемия COVID-19 и во многих странах были введены ограничения на работу автомобильного и авиационного транспорта, а также некоторых промышленных предприятий. В марте 2020 года появились первые сообщения о наблюдении снижения уровня загрязнения над разными странами, в частности, окислами азота [3–6]. Оно фиксировалось, в частности, методами спутникового мониторинга [7].

В связи с этим нами был проведен сравнительный анализ содержания озона в приземной атмосфере в 2019 и 2020 годах на станции Вятские Поляны. На рис. 2 показан временной ход максимальных за сутки 1-часовых значений концентрации O_3 в январе–мае 2019 и 2020 годов. Отметим, что наблюдаемые быстрые флуктуации представленных на рисунке данных обусловлены вариациями день ото дня метеопараметров (температуры, освещенности, влажности и направления ветра).

Из рис. 2 видно, что наблюдаемые в 2020 году уровни концентрации озона меньше, чем в 2019 году на протяжении всего периода наблюдений. Заметное отклонение начинается уже в конце января. При этом температура воздуха в начале 2020 года была в среднем немного выше, чем в 2019 году, что должно было бы обусловить более высокие уровни концентраций O_3 . В феврале расхождение измеряемых величин постепенно уве-

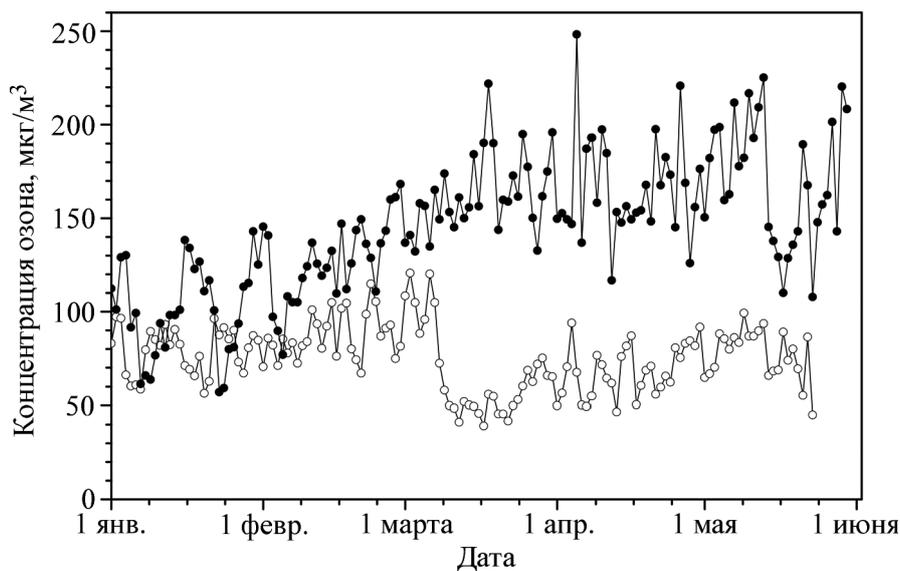


Рис. 2: Временной ход максимальных за сутки 1-часовых концентраций приземного озона с 1 января по 1 июня 2019 (●) и 2020 (○) годов, Вятские Поляны Кировская область.

личивается, а в начале марта 2020 года наблюдается резкое скачкообразное уменьшение содержания озона в атмосфере. Этот момент совпадает по времени с введением в России с 5 марта 2020 года “мер повышенной готовности”, связанных с пандемией COVID-19, вводящих первые ограничения на работу некоторых предприятий, автомобильного и авиационного транспорта.

Для увеличения точности анализа наблюдаемого явления нами была применена обработка временных рядов, основанная на расчете усредняемых за месяц почасовых суточных ходов. Помимо снижения случайного разброса наблюдаемых данных по амплитуде за счет усреднения по продолжительному временному интервалу (месяц), данный подход позволяет сохранить информацию о суточной динамике и разделить вклады фотохимических механизмов образования и наработки озона, преобладающих в светлое время суток и действующих в ночное время процессов переноса и стока озона. Результаты обработки данных представлены на рис. 3, где показаны усредненные за месяц почасовые суточные ходы содержания O_3 для января-мая 2019 и 2020 годов.

Как видно из рис. 3, суточные ходы за 2019 год подчиняются обычной закономерности – наблюдается характерный весенний рост содержания озона от месяца к месяцу. Максимальные средние значения растут от ~ 90 мкг/м³ в январе до ~ 155 мкг/м³ в мае.

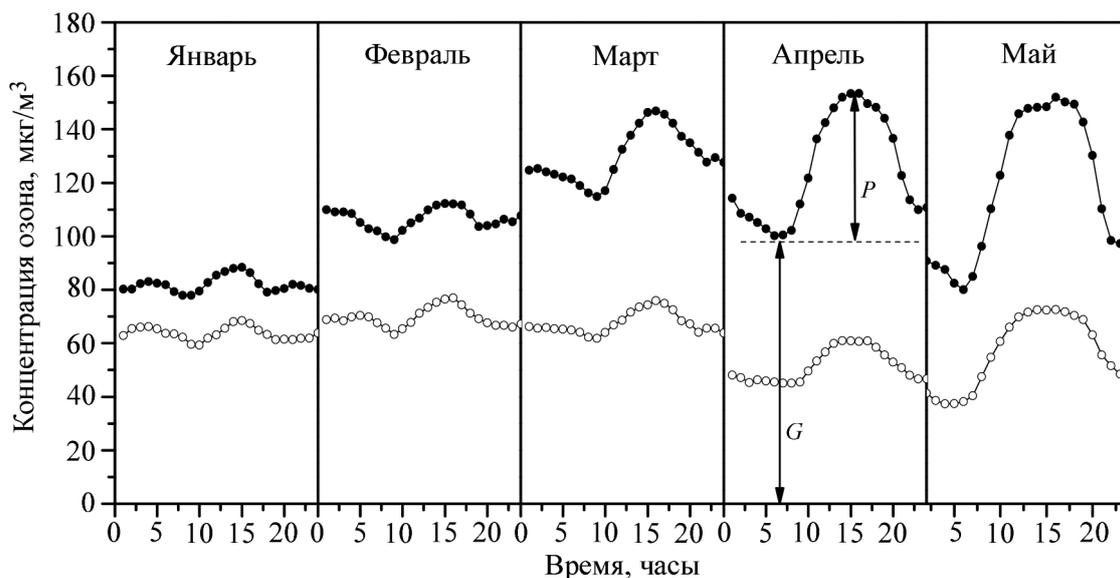


Рис. 3: Усредненные за месяц почасовые суточные ходы содержания O_3 для января-мая 2019 (●) и 2020 (○) годов.

В 2020 году наблюдается аномальная динамика. Значения за январь 2020 года на $\sim 20\%$ меньше, чем в 2019 году. В феврале наблюдается еще большее (на $\sim 35\%$) отличие максимумов 2019 и 2020 годов, достигающее $\sim 50\%$ в марте. Несмотря на сезонный рост температуры, уровня солнечной радиации и продолжительности светлого времени суток, наблюдается еще большее отклонение от значений 2019 года. В апреле 2020 года наблюдается максимальное снижение концентраций озона – амплитуда дневного максимума, который обычно обусловлен загрязнением воздуха прекурсорами озона, становится почти в 3 раза меньше, чем в апреле 2019 года, и составляет ~ 60 мкг/м³. В мае 2020 наблюдаемые концентрации озона остаются также существенно (более 2-х раз) ниже зафиксированных в 2019 году.

На рис. 4 для месячных суточных ходов, представленных на рис. 3, проведено сопоставление величин наработанных днем максимумов, рис. 4(а), и утренних минимумов, рис. 4(б). Эти величины обозначены в апрельской секции на рис. 3 стрелками P и G, соответственно. Кроме того, на рис. 4(в) приведена усредненная за месяц максимальная температура. Величина утреннего минимума G определяется региональным фоном и зависит от общей массы озона, образующегося фотохимическим способом в регионе накануне, интенсивности вымывания и сухого стока озона и его переноса из соседних регионов. При постоянстве стока и переноса величина утреннего минимума будет по-

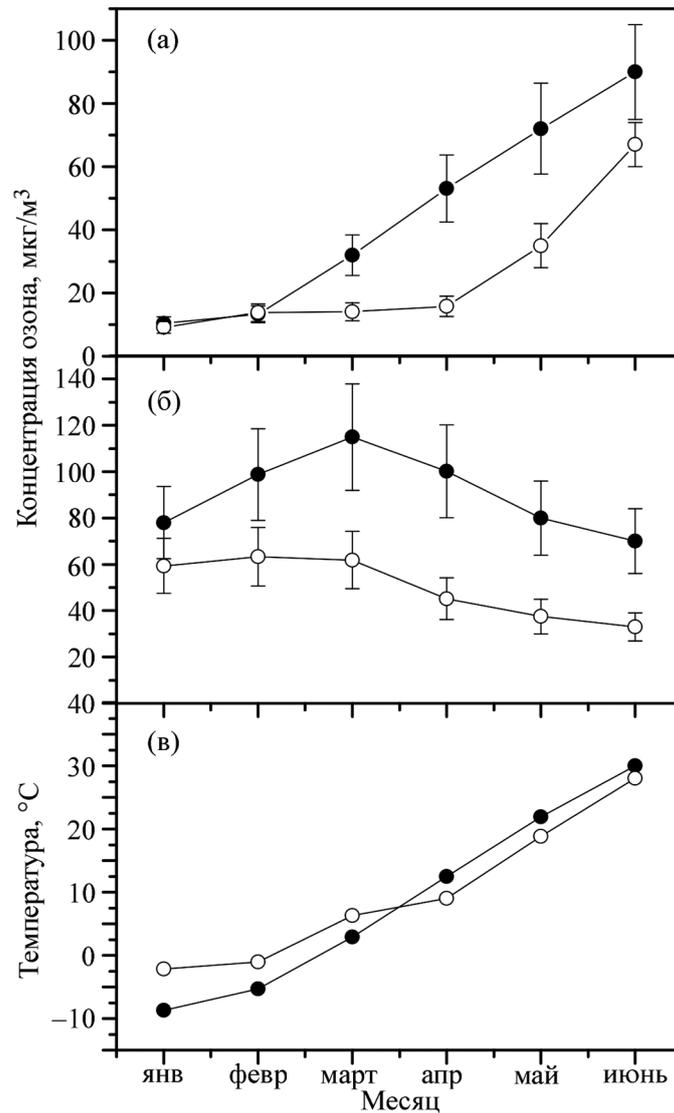


Рис. 4: Вариации амплитуды наработанных дневных максимумов P и утренних минимумов G в январе-июне 2019 (●) и 2020 (○) годов: (а) амплитуда наработанных дневных максимумов озона, (б) величина утренних минимумов озона, (в) усредненная за месяц максимальная температура воздуха.

степенно снижаться при уменьшении загрязненности воздуха, ведущего к снижению массы образуемого озона. Амплитуда нарабатываемого днем максимумом определяется локальной дневной концентрацией загрязняющих веществ, которые участвуют в фотохимическом образовании озона. Как видно из динамики суточных ходов, наработанный локально озон с наступлением ночи достаточно быстро разлагается.

На рис. 4 видно, что динамика количества озона, нарабатываемого днем, существенно отличается в 2019 и 2020 годах. В 2019 наблюдается рост этой величины, коррелирующий с ростом температуры. В 2020 году такой четкой зависимости не наблюдается. С января по апрель 2020 года эта величина меняется очень незначительно. Значительный рост величины нарабатываемого максимума в 2019 году и существенно более медленная наработка в 2020 году при близких температурных режимах свидетельствует об интегрально более чистом локальном воздухе в 2020 году по сравнению с 2019 годом.

Динамика утренних минимальных концентраций в 2019 и 2020, показанная на рис. 4(б), также существенно отличается. В 2019 наблюдается типичный для зимы и весны сезонный ход минимальных концентраций озона – сначала этот параметр растет, достигая максимальных значений в марте, а далее наблюдается резкое его снижение вплоть до наступления осени, подобно тому как это показано на рис. 1 для 2015 года. Минимальные концентрации озона, наблюдаемые в весенние месяцы 2020 года, в 2 раза меньше, чем в 2019 году, и наблюдается их монотонное уменьшение со временем. Если считать, что сток озона в 2019 и 2020 годах не сильно отличается, то значительно меньший уровень утренних концентраций озона в 2020 году может свидетельствовать о значительном снижении регионального фона загрязнений атмосферного воздуха по сравнению с 2019 годом. Ежесуточная меньшая наработка озона в дневные часы приводит к постепенному снижению фоновой региональной концентрации.

Наиболее вероятной причиной снижения как фоновых, так и пиковых локальных и региональных концентрации озона в окружающем воздухе весной 2020 года может быть уменьшение загрязнения атмосферы, обусловленное снижением экономической активности в Китае, Европе и России в связи с пандемией COVID-19. Развитие аномальной динамики содержания тропосферного озона в средней полосе России совпадает во времени с введением ограничений на передвижение автомобильным транспортом и глобальным снижением экономической активности в мире, приведшим к значительному снижению выбросов продуктов горения в атмосферу во всем мире.

Выводы. В средней полосе России в апреле 2020 года зафиксированы аномально низкие концентрации озона в приземной атмосфере. Обычный для весны рост содержания озона, обусловленный сезонным повышением температуры и освещенности, сменился монотонным падением. Усредненные за месяц максимальные суточные значения наблюдаемых величин в апреле 2020 года были почти в ~ 3 раза меньше величин, зафиксированных в это же время в 2019 году. Весной 2020 года наблюдалось как снижение региональных фоновых концентраций озона в приземной атмосфере, так и уменьшение

интенсивности фотохимического его образования. Наиболее вероятная причина наблюдавшегося явления – уменьшение выбросов в атмосферу продуктов горения в Китае, Европе и России, обусловленное пандемией COVID-19.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. Н. Котельников, Е. В. Степанов, Краткие сообщения по физике ФИАН **44**(1), 25 (2018).
- [2] В. П. Челибанов, С. Н. Котельников, Н. В. Смирнов, Е. А. Ясенко, Биосфера **7**(1), 119 (2015).
- [3] Zhang Ruixiong, Zhang Yuzhong, Lin Haipeng, et al., Atmosphere **11**(4), 433. DOI: 10.3390/atmos11040433.
- [4] Pratima Kumari, Durga Toshniwal, Impact of lockdown measures during COVID-19 on air quality – A case study of India International Journal of Environmental Health Research, 2020.
- [5] M. Bauwens, S. Compernelle, T. Stavrakou, et al., Geophysical Research Letters **47**(11), e2020GL087978 (2020). DOI: 10.1029/2020GL087978.
- [6] <https://www.weforum.org/agenda/2020/04/coronavirus-covid19-air-pollution-environment-nature-lockdown>.
- [7] https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=AURA_NO2_M.

Поступила в редакцию 16 июля 2020 г.

После доработки 2 февраля 2021 г.

Принята к публикации 3 февраля 2021 г.