

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-168-180>

УДК 551.510:41

## **Мониторинг приземного озона в природном заповеднике «Карадагский» в период 2017–2021 гг.**

***В.А. Лапченко<sup>1</sup>, И.Н. Кузнецова<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup> Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН филиал ФИЦ ИнБЮМ, пгт Курортное, Республика Крым, Россия*

*<sup>2</sup> Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва, Россия  
labmuza@mecom.ru*

Станция фонового экологического мониторинга (СФЭМ) в природном заповеднике «Карадагский» – единственный пункт регулярных измерений (с 2010 года) приземных концентраций озона (ПКО) на Черноморском побережье Российской Федерации. Обсуждаются наблюдения ПКО на СФЭМ в последние пять лет; показана незначительная межгодовая изменчивость ПКО по сравнению с предыдущими годами. Средненный за период 2017–2021 гг. сезонный и суточный ход ПКО в общих чертах совпадает с предыдущим периодом и сравним с типовым ходом на зарубежных средиземноморских станциях. Для режима ПКО на СФЭМ характерна незначительная суточная амплитуда: зимой она составляет около  $5 \text{ мкг м}^{-3}$ , в теплый сезон увеличивается почти в 3–4 раза, но из-за повышенного ночного озона остается значительно меньше, чем на равнинных станциях. В темное время суток зимой и осенью ПКО составляет  $50\text{--}55 \text{ мкг м}^{-3}$ , весной и летом – около  $70 \text{ мкг м}^{-3}$ . На режим ПКО существенное влияние оказывает бризовая циркуляция, в ночное время – склоновые ветры, обеспечивающие приток озона из свободной тропосферы. На станции фонового мониторинга временами фиксируются ПКО, приближающиеся к максимально разовой предельно допустимой концентрации озона (ПДК<sub>м.р.</sub>). Весной такие события связаны с перемещением над регионом высотной фронтальной зоны. Имевшие место случаи превышения ПДК<sub>м.р.</sub> озона фиксировались в распространяющихся на Крым шлейфах загрязненного в удаленных районах воздуха.

*Ключевые слова:* приземный озон, природный заповедник «Карадагский», сезонный и суточный ход, предельно допустимая концентрация озона

## **Monitoring of surface ozone in the Karadag Nature Reserve in 2017–2021**

***V.A. Lapchenko<sup>1</sup>, I.N. Kuznetsova<sup>2</sup>***

*<sup>1</sup> T.I. Vyazemsky Kara Dag Scientific Station – Nature Reserve of the RAS, – Branch of A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Republic of Crimea, Russia;*

*<sup>2</sup> Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia  
labmuza@mecom.ru*

The background environmental monitoring station in the Karadag Nature Reserve is the only point for routine measurements (since 2010) of surface ozone on the Black Sea coast of the Russian Federation. Surface ozone observations at the station over the past five years are discussed. An insignificant interannual variability of surface ozone is shown as compared to the previous years. Seasonal and diurnal variations in surface ozone averaged over the period of 2017–2021 generally coincide with the previous period and are comparable with the typical variations at foreign Mediterranean stations. The surface ozone regime at the analyzed station is characterized by an insignificant diurnal amplitude: it is about  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in winter and increases by almost 3–4 times in the warm season. However, due to increased nighttime ozone, it remains significantly smaller than at lowland stations. In the dark time of the day, surface ozone is  $50\text{--}55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in winter and autumn and about  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in spring and summer. The surface ozone regime is significantly affected by the breeze circulation and, at night, by slope winds providing the influx of ozone from the free troposphere. At the background monitoring station, surface ozone values approaching the maximum single permissible concentration of ozone (MPCm.s.) are occasionally recorded. In spring, such events are associated with the movement of the upper-level frontal zone over the region. The registered cases of exceeding MPCm.s. were observed in the plumes of air polluted in remote areas and spreading to Crimea.

*Keywords:* surface ozone, Karadag Nature Reserve, seasonal and diurnal variation, maximum permissible concentration of ozone

Озон – важнейший газовый компонент атмосферы; озон ( $\text{O}_3$ ) является одним из сильнейших атмосферных окислителей и относится к вредным веществам наивысшего класса опасности [2, 5]. Озон относится к парниковым газам, оказывает существенное влияние на климат, экосистемы и здоровье населения [12, 18]; увеличение его в тропосфере способствует потеплению климата [17]. В приземный слой озон поступает из более высоких слоев атмосферы; в урбанизированных регионах  $\text{O}_3$  может образовываться под воздействием солнечной радиации в фотохимических реакциях при участии газов-предшественников [2]. На территориях с малой антропогенной нагрузкой колебания уровня  $\text{O}_3$  определяются природными процессами [5, 12, 19], но временами и на фоновых территориях фиксируются резкие возрастания приземных концентраций озона (ПКО), связанные, в основном, с приходом загрязненного в промышленных районах воздуха [9, 10, 14]. Такие опасные для здоровья и экосистем озоновые эпизоды с повышением приземной концентрации озона до критических значений неоднократно фиксировались в ряде стран на Средиземноморском побережье, в том числе и на юго-восточном побережье Крымского полуострова [9, 13, 16, 20].

Наблюдения приземного озона в Крыму проводятся в Государственном природном заповеднике «Карадагский», который расположен на значительном расстоянии от источников промышленного загрязнения атмосферы. В 1986 году на территории заповедника на склоне горы Святая на высоте 180 метров над уровнем моря была установлена автоматическая станция контроля окружающей среды ( $44^\circ 94' \text{N}$ ,  $35^\circ 23' \text{E}$ ). С момента создания на станции проводились метеорологические наблюдения

и измерения загрязнения атмосферного воздуха: СО – в 1988–1992 гг., озона – в 1993–2000 гг. С декабря 2005 г. возобновился инструментальный контроль приземного озона [11, 14]. В настоящее время регулярный мониторинг приземного озона проводится на территории Карадагской научно-исследовательской станции им. Т.И. Вяземского РАН, имеющей статус фонового экологического мониторинга (СФЭМ). Станции фонового мониторинга рассматриваются в качестве составной части национальной и международной (глобальной) сети мониторинга окружающей среды, а полученные результаты могут служить региональными стандартами и характеристиками условно чистых территорий.

Результаты обобщенного анализа приземного озона на станции в 2008–2018 гг. представлены в ряде научных публикаций [11, 14], анализ в отдельные годы – в [1, 5]. Приземные концентрации озона в природном заповеднике «Карадагский» характерны для широтного пояса 40–50° с. ш. на отдаленных и сельских (remote and rural) станциях мира и не имеют прямых признаков, характерных для городских и пригородных (urban and suburban) станций, где отчетливо проявляется влияние местных загрязнений [7, 10, 21].

Учитывая важность фонового мониторинга приземного озона, а также то, что СФЭМ является единственной станцией на Черноморском побережье страны в месте массового отдыха, в настоящей работе проводится анализ тенденций и режима озона в последние годы.

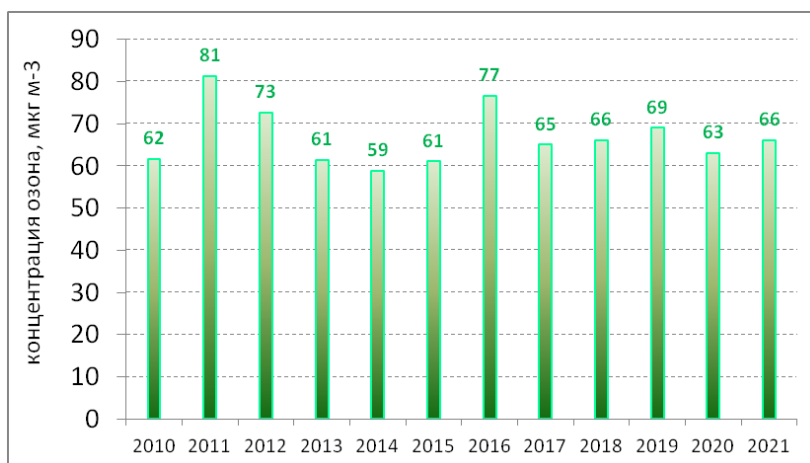
### Материалы и методы исследований

Измерения ПКО на СФЭМ проводятся оптическим методом с помощью автоматического газоанализатора АРОА 370 (HORIBA). Отбор проб осуществляется с использованием фторопластовых трубок на высоте 2 метра от поверхности земли. Использование фторопласта при отборе проб воздуха существенно снижает погрешности измерений, вызванные адсорбцией озона на внутренней поверхности воздухозаборных устройств. Данные непрерывной регистрации озона усредняются за часовой интервал наблюдений с сохранением информации в регистраторе – I/O – EXPANDER (HORIBA). Калибровка газоанализатора проводится один раз в две недели с помощью генератора АРМС-370; прибор проходит ежегодную поверку во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в г. Санкт-Петербурге. Метеорологические измерения (температура воздуха, относительная влажность, давление, направление и скорость ветра, количество и интенсивность осадков) проводятся с помощью метеостанций «WS – 600» и «ТРОПОСФЕРА – Н».

Осредненные за час ПКО использованы для расчетов средней за сутки, среднемесячной и сезонной характеристик озона, а также для анализа озоновых эпизодов – случаев увеличения ПКО до критических значений в период 2017–2021 годов.

## Результаты исследований

Особый интерес представляет наличие многолетнего тренда ПКО на Черноморском побережье Крыма в период непрерывных измерений [11, 14]. Такой ряд по имеющимся репрезентативным данным представлен периодом 2010–2021 гг.; очевидно, на этой выборке установить статистически достоверный тренд не представляется возможным. Вместе с тем можно отметить относительно ровный ход средней годовой ПКО на СФЭМ в последние пять лет и незначительную межгодовую ее изменчивость в диапазоне значений 63–69  $\text{мкг м}^{-3}$  (рис. 1). Это отличает рассматриваемый период (2017–2021 гг.) от предыдущих лет с большими значениями ПКО в 2011 и 2016 гг., так же как и от лет с пониженным содержанием озона в заповеднике в 2013–2015 гг. [14].



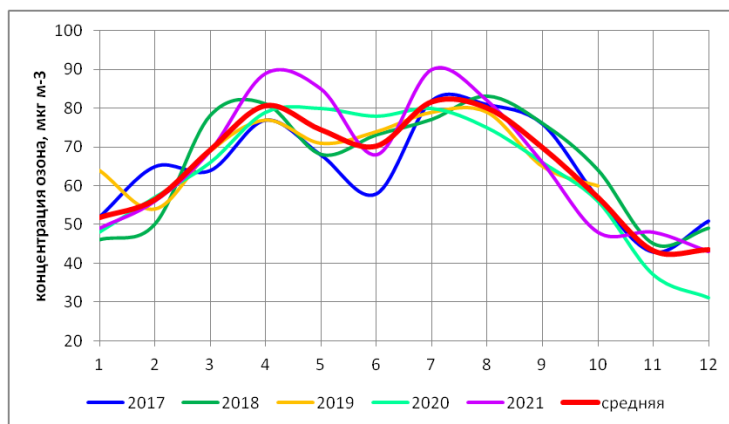
**Рис. 1.** Средняя годовая приземная концентрация озона в природном заповеднике «Карадагский».

**Fig. 1.** The average annual surface concentration of ozone in the Karadag Nature Reserve.

**Сезонный ход** приземной концентрации озона на СФЭМ, рассчитанный по данным за 2017–2021 гг., в общих чертах совпадает с полученным ранее [14]. По осредненным за месяц значениям ПКО четко проявляется бимодальный вид годового хода с весенним и летним максимумами; годовой минимум ПКО приходится на ноябрь–декабрь (рис. 2).

Весенний (чаще всего апрельский) максимум, как и на других прибрежных и материковых равнинных станциях [3, 7, 8], обусловлен усилением вертикального перемешивания между приземным слоем и свободной тропосферой, увеличением интенсивности стратосферно-тропосферного обмена на фоне годового максимума ОСО [13, 14]. Выраженный июньский «провал» – в среднем на  $10 \text{ мкг м}^{-3}$  – является следствием

влияния на содержание озона в приземном воздухе аномальных погодных условий с частыми дождями и в среднем более низкой температурой воздуха в отдельные годы. В частности, такими были условия в 2017 и 2021 гг. В 2020 г. июньский минимум не наблюдался, а в 2018 и 2019 гг. пришелся на май.



**Рис. 2.** Средняя месячная приземная концентрация озона в природном заповеднике «Карадагский», 2017–2021 гг.

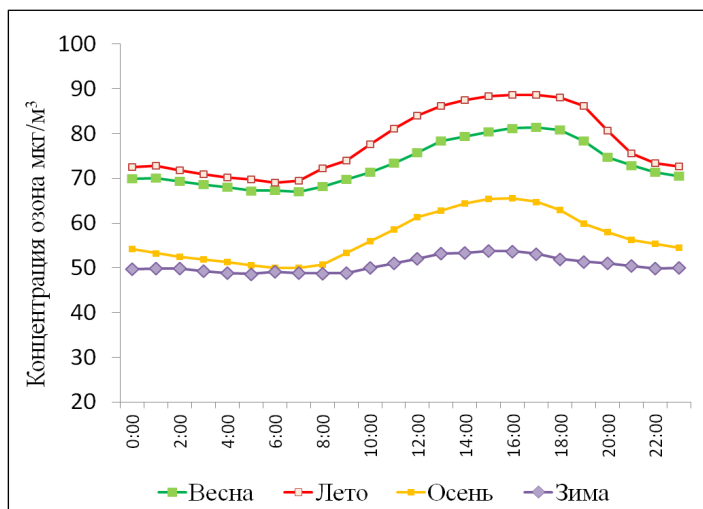
**Fig. 2.** The average monthly surface concentration of ozone in the nature reserve "Karadag", 2017–2021 гг.

Летний максимум обусловлен фотохимическим образованием озона, происходящим с участием антропогенных источников загрязнения атмосферы. Согласно классификации, приведенной в [21], сезонный ход концентрации озона в природном заповеднике «Карадагский» отражает взаимосвязь летнего максимума озона с максимальной фотохимической генерацией озона при максимальном прогреве воздуха.

По осредненным данным, в период 2017–2021 гг. весенний максимум ( $80 \text{ мкг м}^{-3}$ ) на СФЭМ практически совпал с летним ( $83 \text{ мкг м}^{-3}$ ) при СКО  $5\text{--}10 \text{ мкг м}^{-3}$ . Годовая амплитуда средних за месяц ПКО в рассматриваемой пятилетке близка к  $40 \text{ мкг м}^{-3}$ , т. е. имеет место двухкратное увеличение ПКО от холодного сезона к теплему. Типичное для СФЭМ время наступления сезонных экстремумов ПКО характерно для южных регионов Западной Европы, в т. ч. средиземноморских [7, 16, 20]. Отметим также, что в 2018 г. наблюдалось смещение весеннего максимума на март-апрель. Особенностью 2021 г. стало превышение сезонных максимумов почти на  $10 \text{ мкг м}^{-3}$  в апреле и июле. Такие отклонения от средних величин и времени наступления сезонных максимумов, очевидно, связаны с особенностями крупномасштабных процессов в атмосфере и преобладанием аномального характера погоды. Отметим, что осредненные за рассматриваемый период среднемесячные величины ПКО в первые пять

месяцев оказались на 6–9 % больше, а в летние месяцы – на 2–6 % меньше, чем средние за предыдущие годы [14]. В осенние месяцы с наименьшей изменчивостью ПКО существенных отклонений от средних многолетних величин ПКО не обнаружено.

**Суточный ход** озона определяется интенсивностью вертикального перемешивания и скоростью фотохимических процессов в атмосфере. Как правило, после ночного минимума рост ПКО начинается после восхода солнца и достигает максимума в послеполуденные часы, затем снижается. На рис. 3 представлен осредненный по сезонам суточный ход ПКО на СФЭМ. Обращает на себя внимание практически отсутствие суточной амплитуды ПКО зимой (около 5 мкг м<sup>-3</sup>) и ее наличие большую часть года: весной и осенью она составляет около 15 мкг м<sup>-3</sup>, летом 20 мкг м<sup>-3</sup>. Такие сезонные характеристики устойчивы, в рассматриваемом периоде они совпали с данными, полученными ранее [1, 14].



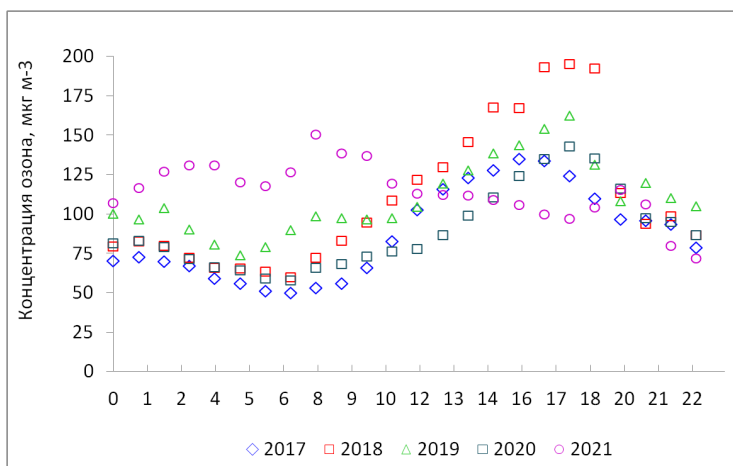
**Рис. 3.** Средний сезонный суточный ход ПКО на СФЭМ, 2017–2021 гг.

**Fig. 3.** Average seasonal daily course of SO<sub>2</sub> on BEMS (Background Environmental Monitoring Station), 2017–2021 гг.

Второй отличительной особенностью ПКО на СФЭМ является стабильность содержания озона в приземном воздухе в темное время суток: осенью и зимой на уровне 50–55 мкг м<sup>-3</sup>, весной и летом около 70 мкг м<sup>-3</sup>. Ночной ветер на СЭФМ, которая находится на склоне горы Святая на высоте 180 м, чаще всего является склоновым, обеспечивающим поступление воздуха из свободной тропосферы с характерными для ее нижней части концентрациями озона [8, 15]. Кроме того, как отмечается в [6], в восточной части Крымского полуострова ночная циркуляция находится под совместным влиянием Черного и Азовского морей. Дневной озон

чаще всего формируется под влиянием бризовой циркуляции, обеспечивающей поступление воздуха с моря, где озона больше, чем в приземном воздухе над побережьем. Дневной бриз, в общем, представляет собой гравитационное течение более холодного морского воздуха, оно занимает нижнюю часть атмосферного пограничного слоя. Отметим, по данным многолетних наблюдений в летнее время днем наиболее часто на СФЭМ фиксируется юго-восточный ветер. Местные ветры проявляются при ослаблении крупномасштабного переноса; при этом можно заметить, что ночной бриз из-за меньшего контраста между сушей и морем развивается слабее [6].

При выраженной форме осредненного суточного цикла ПКО в отдельные дни под влиянием крупномасштабных атмосферных процессов (прохождение фронта, резкая смена воздушных масс, затяжные дожди, туманы и т. п.) типовая внутрисуточная динамика ПКО может существенно нарушаться. Выборка наибольших в году в каждый час суток величин ПКО в период 2017–2021 гг. отображена на рис. 4. Как видно, экстремально большие величины ПКО, превышающие  $160 \text{ мкг м}^{-3}$  (ПДК<sub>м.р.</sub> озона), фиксировались на СФЭМ в 15–19 часов. Меньшие, но также аномальные всплески ПКО ( $0,8\text{--}0,9$  ПДК<sub>м.р.</sub>) были отмечены на станции и в ночное время, и ранним утром (2021 год).



**Рис. 4.** Максимальная в году часовая ПКО, 2017–2021 гг.  
**Fig. 4.** The maximum per year hourly SOC, 2017–2021.

Повышенные ночные величины и небольшая амплитуда суточной цикличности ПКО отличают режим приземного озона на фоновой СФЭМ от материковых станций [3, 5, 7]. На СФЭМ ночные концентрации примерно в 2 раза больше, чем в одном широтном поясе на равнинных станциях «сельского типа» в Европе [7], в 3–4 раза больше, чем в пригороде

Москвы [3, 8]. Вопрос – на каком удалении от прибрежной полосы данные СФЭМ являются репрезентативными – пока остается открытым. Получить ответ на этот вопрос, очевидно, можно было бы при проведении экспериментальных измерений ПКО на удалении от побережья, например в степной зоне полуострова.

**Озоновые эпизоды.** Случаи превышения ПКО предельно допустимой разовой концентрации озона (ПДК<sub>м.р.</sub>), в соответствии с российскими стандартами равной 160 мкг м<sup>-3</sup> [4], принято называть озоновыми эпизодами. На фоновой станции в природном заповеднике озоновые эпизоды имеют адвективную природу и связаны с приходом загрязненных воздушных масс из удаленных районов. В [9, 10, 13, 14] подробно описаны случаи зафиксированных на СФЭМ озоновых эпизодов в предшествующие годы, среди которых выделяется 2011 год с 12 случаями превышения ПДК<sub>м.р.</sub> В рассматриваемый период (2017–2021 гг.) превышения ПДК<sub>м.р.</sub> зафиксированы в 2018 году 24 августа (суточный максимум ПКО около 170 мкг м<sup>-3</sup>) и 25 августа, когда ПКО увеличивалась до 195 мкг м<sup>-3</sup> и превысила информационный порог для населения (180 мкг м<sup>-3</sup>), принятый для Европейского Союза. Аномальное увеличение ПКО в августе 2018 г., возможно, связано с активным образованием антропогенного озона в шлейфе воздуха с повышенным содержанием углеводов, источником которых могли стать дорожное строительство на полуострове и возросшая на пике курортного сезона интенсивность транспортного потока.

Другой случай превышения ПДК<sub>м.р.</sub> наблюдался 26 апреля 2019 г.: в 18 ч концентрация озона в этот день повышалась на станции до 162 мкг м<sup>-3</sup>, а с 14 до 19 ч ПКО превышала 0,8 ПДК<sub>м.р.</sub> (табл. 1). Аналогов в истории наблюдений на СФЭМ этот весенний эпизод не имеет. В этот день в Крыму в малоградиентном барическом поле наблюдалась сухая умеренно теплая погода с повышением приземной температуры на станции до 15 °С, недостаточная для локальной генерации озона с образованием высоких концентраций [8]. Как показал траекторный анализ (рис. 5а), в этот день с юго-востока пришла воздушная масса, накануне прошедшая над новороссийской агломерацией, где много источников углеводов. Там эти предшественники озона могли поступить в атмосферу и обеспечить в распространявшемся на Крым шлейфе загрязненного воздуха значительную генерацию озона. Не исключено, что определенную роль могли сыграть загрязнения, поступающие в воздух в районе строительства крымской автомагистрали.

Большинство весенних случаев аномального повышения ПКО на Карадаге связано с поступлением богатого озоном воздуха из верхней тропосферы при прохождении через регион планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ); типичная синоптическая ситуация смещения в субтропические широты ПВФЗ представлена на рис. 5б. Подчеркнем, что в эпизодах такого рода ПКО на СФЭМ ни разу не превышала ПДК<sub>м.р.</sub>

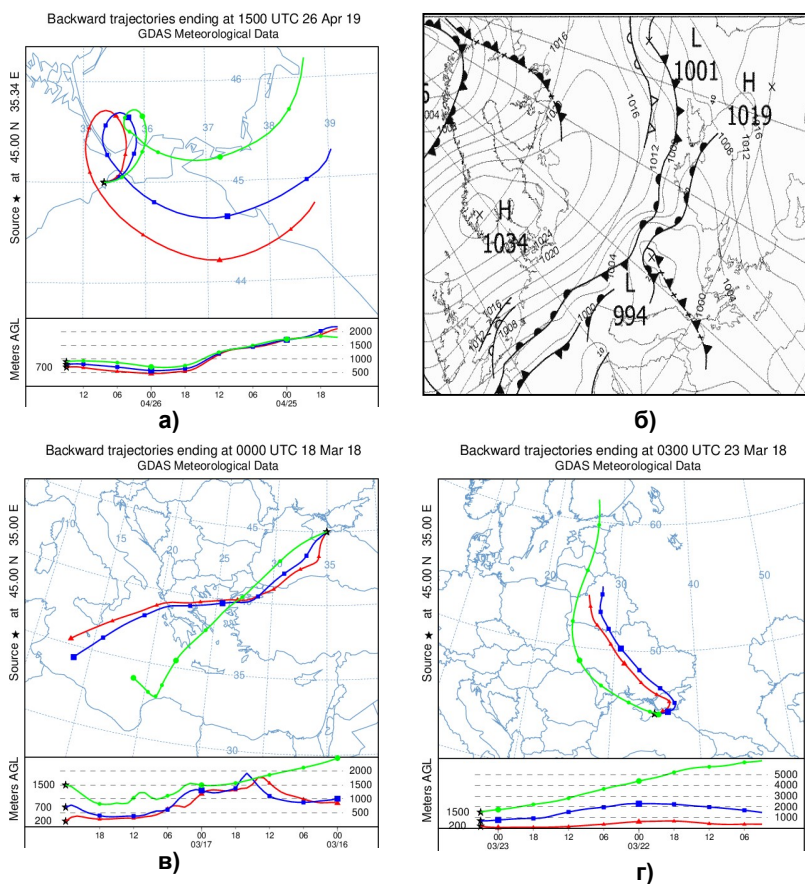


(таблица). Наиболее продолжительный эпизод вторжения субстратосферного воздуха наблюдался в марте 2018 г.; 18 марта ночью, 23 марта вечером ПКО увеличивалась до 130–134 мкг м<sup>-3</sup> (рис. 5б и 5г). Под воздействием ПВФЗ 23 марта повышенный уровень озона сохранялся дольше, чем во всех других эпизодах в рассматриваемом периоде 2017–2021 гг. – почти 13 ч, достигнув в максимуме 0,83 ПДК<sub>м.р.</sub>

**Таблица.** Приземная концентрация озона (мкг м<sup>-3</sup>) в эпизодах повышенного и высокого уровня озона на СФЭМ в период 2017–2021 гг.

**Table.** Surface concentration of ozone (μg m<sup>-3</sup>) in episodes of high ozone levels in the Karadag Nature Reserve in the period 2017-2021

Год	Дата	Время, ч	Длительность, ч	ПКО
2017	5 августа	21–23	3	129–138
	13 августа	15–20	6	128–135
	17 сентября	20	1	128
2018	18 марта	3–5	3	129–132
	23 марта	7–19	13	128–134
	4 августа	15–19	5	130–149
	5 августа	12–23	12	134–140
	24 августа	16–21	6	130–150
		18–19 ч	3	170
	25 августа	13–14	2	130–146
		15–19	5	168–192
	26 августа	12–20	9	131–152
	4 сентября	15	1	134
22 сентября	17	1	128	
2019	26 апреля	14–19	6	128–154
		18	1	162
	14 августа	14–21	8	128–155
2020	16 мая	1	1	142
	10 июня	15	1	136
	31 августа	17–19	3	133–136
2021	23 апреля	4–6	3	131–133
	2 мая	11	1	132
	6 мая	16–17	2	129–130
	7 мая	14–16	3	129–132
	8 мая	3–4	2	131
		8–10	3	137–150
	19 июля	4	1	131
6 августа	15–16	2	139–141	



**Рис. 5.** Обратные траектории частиц, поступавших на Крымское побережье: 24 апреля 2019 г. (а); 18 марта 2018 г. (в); 23 марта 2018 г. (г); поле приземного атмосферного давления с фронтальными зонами 18 марта 2018 г. (б) (<https://www.ready.noaa.gov/>).

**Pic. 5.** Reverse trajectories of particles arriving at the Crimean coast: April 24, 2019 (а); March 18, 2018 (в); March 23, 2018 (г); surface atmospheric pressure field with frontal zones on March 18, 2018 (б) (<https://www.ready.noaa.gov/>).

При том, что озоновые эпизоды на СФЭМ – явление редкое, приближение к критическим значениям (от 0,8 до 1,0 ПДК<sub>м.р.</sub>) наблюдается несколько дней в году. В 2017 г. такие события фиксировались 3 дня (август, сентябрь), в 2018 г. – 9 дней (март, август, сентябрь), в 2019 г. – 2 дня (апрель, август), в 2020 г. – 3 дня (май, июнь, август). Как видно, август является месяцем с самой большой вероятностью повышения концентрации озона в приземном воздухе до критических значений. Заметим, что только 1 раз в рассматриваемом периоде ПКО превышала ПДК<sub>м.р.</sub> два дня подряд, а высокий уровень озона удерживался в течение 2–5 часов.

## Выводы

Важность мониторинга приземного озона в природном заповеднике «Карадагский» определяется не только статусом станции фоновой экологического мониторинга, но тем, что СФЭМ является единственным пунктом регулярных измерений ПКО на Черноморском побережье страны.

Данными измерений часовых концентраций приземного озона в 2017–2021 гг. подтверждена стабильность режима ПКО на фоновой станции с незначительной межгодовой изменчивостью ПКО в последние годы. Осредненные за рассматриваемый период среднемесячные величины ПКО в январе–мае оказались всего на 6–9 % больше, а в летние месяцы лишь на 2–6 % меньше, чем в предыдущие годы. В осенние месяцы значимых отклонений от средних многолетних величин ПКО не обнаружено.

К особенностям режима ПКО на СФЭМ относится повышенный уровень озона по сравнению с равнинными станциями в темное время суток: в среднем за 2017–2021 гг. ночные ПКО изменялись осенью и зимой в диапазоне 50–55 мкг м<sup>-3</sup>, весной и летом – около 70 мкг м<sup>-3</sup>. Средние за сезон суточные максимумы мало отличаются от предыдущих лет и составили 55, 65, 80 и 90 мкг м<sup>-3</sup>, соответственно, зимой, осенью, весной и летом.

Режим ПКО в 2017–2021 гг. оставался характерным для фоновых станций, влияние антропогенных источников обнаруживается крайне редко. В рассматриваемый период зафиксированы всего три озоновых эпизода: 24 и 25 августа 2018 г. с повышением ПКО до 170–195 мкг м<sup>-3</sup>, 24 апреля 2019 г. с увеличением концентрации до 162 мкг м<sup>-3</sup>. Такие экстремально высокие уровни озона наблюдались при поступлении загрязненного воздуха из удаленных районов.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность инженерам станции фоновой экологического мониторинга Д.Н. Давидовичу, А.Н. Родионову, Л.А. Столярову, В.Г. Медведеву за обеспечение устойчивой работы приборов и участие в сборе первичной информации.

Научный сотрудник ФГБУН «КНС-ПЗ РАН» В.А. Лапченко принял участие в написании статьи в рамках темы Гос. задания №121032300023-7 «Изучение особенностей структуры и динамики сухопутных экосистем в различных климатических зонах»; научный сотрудник ФГБУ «Гидрометцентр России» И.Н. Кузнецова приняла участие в написании статьи в рамках Гос. задания № 169-00039-22-01.

## Список литературы

1. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б. и др. Концентрация тропосферного озона на территории России в 2020 году // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6. В печати.
2. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: изд-во ИОА СО РАН, 2010. 525 с.
3. Борисов Д.В., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А. Исследование сезонной и суточной изменчивости концентраций приземного озона // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 122-135.

4. ГН 2.1.6.1338-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест.
5. Еланский Н.Ф. Российские исследования атмосферного озона в 2015–2018 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 2. С. 141-155.
6. Ефимов В.В., Крупин А.В. Бризовая циркуляция в районе Черного моря // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 18-26.
7. Звягинцев А.М. Основные периодичности временного хода приземного озона в Европе // Метеорология и гидрология. 2004. № 10. С. 46-55.
8. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лезина Е.А., Лапченко В.А., Никифорова М.П., Демин В.И. Исследования и мониторинг приземного озона в России // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 365. С. 56-70.
9. Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Лапченко В.А., Бруслова Н.Е., Архангельская А.А., Терёб Н.В., Лезина Е.А. Причины и факторы положительных аномалий концентрации озона в Московском регионе и на юго-восточном побережье Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 6. С. 493-502.
10. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Малые газовые составляющие атмосферы в Карадагском природном заповеднике в Крыму // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 178–181.
11. Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Приземный озон в Крыму // Пространство и время. 2014. № 2 (16). С. 254-257.
12. Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2019 г. М.: ИГКЭ, 2020. 100 с.
13. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Звягинцев А.М., Лапченко В.А. Приземный озон на побережьях Балканского полуострова и Крыма // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 515-523.
14. Шалыгина И.Ю., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А. Режим приземного озона на станции Карадаг в Крыму по наблюдениям 2009–2018 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 102-113.
15. Angevine W.M., Senff C.J., White A.B., Williams E.J., Koerner J., Miller S.T.K., Talbot R., Johnston P.E., Mckeen S.A., Downs T. Coastal boundary layer influence on pollutant transport in New England // J. Appl. Meteor. 2004. Vol. 43. P. 1425-1437.
16. Duenas C., Fernandez M.C., Canete S., Carretero J., Liger E. Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast // The Science of the Total Environment. 2002. Vol. 299. P. 97-113.
17. EEA, 2010. The European environment. State and outlook 2010. Synthesis. Copenhagen: European Environment Agency, 2010. 228 p.
18. Harucha M.J., Legohn A.S. Nonlinearity in human health response to ozone: Experimental laboratory consideration // Atmos. Environ. 2007. Vol. 41, no. 22. P. 4559-4570.
19. Martins D.K., Stauffer R.M., Thompson A.M., Knepp T.N., Pippin M. Surface ozone at a coastal suburban site in 2009 and 2010: Relationships to chemical and meteorological processes // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117 (D5). DOI: 10.1029/2011JD016828.
20. Ribas A., Penuelas J. Temporal patterns of surface ozone levels in different habitats of the North Western Mediterranean basin // Atmos. Environ. 2004. Vol. 38. P. 985-992.
21. Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P., Zvyagintsev A.M., Kuznetsov G.I. A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results // Atmos. Chem. Phys. 2007. Vol. 7. P. 6099-6117.

## References

1. Andreev V.V., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B. et al. Tropospheric ozone content over the Russian Federation in 2020. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2022, Vol. 35, no. 6. In print.
2. Belan B. D. Ozon v troposfere. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2010, 525 p. [in Russ.].
3. Borisov D.V., Shalygina I.Yu., Lezina E.A. Studying seasonal and daily variability of surface ozone. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, no. 3 (377), pp. 122-135. [in Russ.].

4. GN 2.1.6.1338-03. Gigienicheskie normativy. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernom vozduhe naseleennyh mest. [in Russ.].
5. Elansky N.F. Russian studies of atmospheric ozone and its precursors in 2015–2018. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020, vol. 56, no. 2, pp. 141-155.
6. Efimov V.V., Krupin A.V. Breeze circulation in the Black Sea Region. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, no. 4, pp. 18-26.
7. Zvyagintsev A. M. Basic Characteristics of Tropospheric Ozone Variations over Europe. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, no. 10, pp. 36-45.
8. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I.N., Shalygina I.Yu., Lezina E.A., Lapchenko V.A., Niki-forova M.P., Demin V.I. Investigation and monitoring of surface ozone in Russia. *Trudy Gidrometsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2017, vol. 365, pp. 56-70. [in Russ.].
9. Zvyagintsev A.M., Kuznetsova I. N., Shalygina I.Yu., Lapchenko V.A., Brusova N.E., Arkhangel'skaya A.A., Tereb N.V., Lezina E.A. Causes and Factors of Positive Surface Ozone Anomalies in the Moscow Region and on the Southeastern Coast of the Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, vol. 29, no. 05, pp. 551-560.
10. Lapchenko V.A., Zvyagintsev A.M. Trace Atmospheric Gases in the Karadag Nature Reserve in Crimea. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2015, vol. 28, no. 04, pp. 308-311.
11. Lapchenko V. A., Zvyagintsev A. M. Surface Ozone in Crimea. *Prostranstvo I Vremya [Space and time]*, 2014, no. 2(16). pp. 254-257. [in Russ.].
12. Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchej prirodnoj sredy na territorii stran SNG za 2019 g. M.: IGKE Publ, 2020. 100 p. [in Russ.].
13. Shalygina I. Yu., Kuznetsova I. N., Zvyagintsev A. M., Lapchenko V. A. Surface ozone at coasts of the Balkans and the Crimea. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2017, vol. 30, no. 6, pp. 515–523 [in Russi].
14. Shalygina I.Yu., Kuznetsova I.N., Lapchenko V.A. Surface ozone regime at Kara Dag station in Crimea according to observations in 2009-2018. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2019, no. 2 (372), pp. 102-113. [in Russ.].
15. Angevine W.M., Senff C.J., White A.B., Williams E.J., Koerner J., Miller S.T.K., Talbot R., Johnston P.E., Mckeen S.A., Downs T. Coastal boundary layer influence on pollutant transport in New England. *J. Appl. Meteor.*, 2004, vol. 43, pp. 1425-1437.
16. Duenas C., Fernandez M.C., Canete S., Carretero J., Liger E. Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast. *The Science of the Total Environment*. 2002, vol. 299, pp. 97-113.
17. EEA, 2010. The European environment. State and outlook 2010. Synthesis. Copenhagen: European Environment Agency, 2010. 228 p.
18. Harucha M.J., Legohn A.S. Nonlinearity in human health response to ozone: Experimental laboratory consideration. *Atmos. Environ.* 2007, vol. 41, no. 22, pp. 4559-4570.
19. Martins D.K., Stauffer R.M., Thompson A.M., Knepp T.N., Pippin M. Surface ozone at a coastal suburban site in 2009 and 2010: Relationships to chemical and meteorological processes. *J. Geophys. Res.*, 2012, vol. 117 (D5). DOI: 10.1029/2011JD016828.
20. Ribas A., Penuelas J. Temporal patterns of surface ozone levels in different habitats of the North Western Mediterranean basin. *Atmos. Environ.* 2004, vol. 38, pp. 985-992.
21. Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Joeckel P., Zvyagintsev A.M., Kuznetsov G.I. A climatology of surface ozone in the extra tropics: cluster analysis of observations and model results. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, vol. 7, pp. 6099-6117.

Поступила 28.04.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;  
принята в печать 08.06.2022.

Submitted 28.04.2022; approved after reviewing 23.05.2022;  
accepted for publication 08.06.2022.