

ПРИЗЕМНЫЙ ОЗОН В НЕПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНАХ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И КРЫМА ¹

Лапченко В. А.¹, Симакина Т. Е.², Крюкова С. В.²

¹ Карадагская научная станция им. Т. И. Вяземского – природный заповедник РАН – филиал

ФИЦ ИнБЮМ, г. Феодосия, Российская Федерация,

e-mail: ozon.karadag@gmail.com

² Российский государственный гидрометеорологический университет,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,

e-mail: tatiana.simakina@gmail.com

Аннотация: Приведены результаты сравнительного анализа данных измерений приземной концентрации озона на станциях Карадага (Крым) и Сестрорецка (Курортный район Санкт-Петербурга) за период с января по октябрь 2019 г. Несмотря на удалённость станций от промышленных центров и автомобильных дорог, в течение большей части измерительного периода значения концентрации приземного озона на обеих станциях превышают среднесуточное предельно допустимое значение, составляющее в Российской Федерации 30 мкг/м³. Выявлено превышение концентрации приземного озона на Карадаге по сравнению с Сестрорецком в течение большей части измерительного периода. Максимальные среднечасовые концентрации озона на Карадаге достигают значения максимально разовой предельно допустимой концентрации, равной 160 мкг/м³. В холодный период года, с января по апрель, наблюдались схожие тенденции изменения концентрации приземного озона на двух станциях. С наступлением тёплой погоды и повышением уровня инсоляции количество озона в Сестрорецке уменьшалось и типичный для ряда других районов весенне-летний максимум концентрации О₃ здесь отсутствовал. Выявлена корреляционная связь концентрации озона с метеорологическими параметрами на двух станциях, отмечены заметные отличия характера зависимости значений приземного О₃ от влажности и температуры воздуха для рассматриваемых территорий. Температура приземного воздуха на Карадаге положительно коррелирует с концентрацией озона, а относительная влажность — отрицательно. Таким образом, жаркая и сухая погода на Карадаге способствует эпизодам повышенных значений концентрации приземного озона. В Сестрорецке корреляция концентрации озона с температурой отрицательная.

Ключевые слова: приземный озон, Карадаг, Сестрорецк, температура, влажность воздуха.

Введение

Озон в нижних слоях атмосферы — токсичный газ, один из главных показателей качества воздуха, включенный ВОЗ в пятёрку основных загрязнителей атмосферы. В России тропосферный озон относится к веществам первого класса опасности. В группу риска попадают люди, страдающие астмой и другими хроническими заболеваниями органов дыхания, дети и лица пожилого возраста, а также те, кто занимается профессиональной деятельностью или спортом на открытом воздухе. Поэтому особенно важно контролировать его содержание в непромышленных районах, в курортно-туристических центрах, которые традиционно используются для отдыха и лечения населения.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме 121032300023-7 «Изучение особенностей структуры и динамики сухопутных экосистем в различных климатических зонах».

Агрессивное воздействие озона на человека обусловлено его сильным влиянием на окислительные процессы в организме, что может являться причиной эпидемий аллергических заболеваний [Пивоваров, Горбунов, Сальников, 2015]. Существует опасность мультипликативного эффекта от наложения последствий коронавируса, наиболее часто связанных с негативным влиянием на лёгкие, на результаты воздействия эпизодов подъёма концентраций приземного озона.

Анализ наблюдений за концентрацией приземного озона (КПО), исследование его временно-го и пространственного распределения, прогнозирование повышения его концентрации в конкретных местах, установление количественных связей озона с предикторами — такие задачи не перестают быть актуальными. Их решение осложняется высокой изменчивостью поля приземного озона как в пространстве, так и на разных временных масштабах, редкой сетью экологических станций.

Образование озона и его сток в приземной атмосфере происходит в результате нескольких десятков фотохимических и химических реакций газовых компонент [Monks et al., 2015; Котельников, Степанов, 2015; Звягинцев и др., 2018], на которые оказывает влияние целый ряд метеорологических параметров: температура, влажность, направление ветра, инсоляция, загрязнённость воздуха аэрозолями различных типов и т. п. Среди процессов, обуславливающих содержание озона в приземном слое атмосферы, главными являются вертикальный перенос озона из верхних слоёв атмосферы и химические реакции, протекающие в условиях антропогенного загрязнения. Второй процесс фотохимического образования озона осуществляется в результате реакций с участием оксидов азота при наличии достаточного количества углеводородных соединений — источников пероксидных радикалов. Источниками окислов азота служат автотранспорт, ТЭЦ и высокотемпературные производства.

Значимость двух механизмов образования озона может различаться в индустриальных и курортных зонах. При прочих равных условиях в непромышленных районах первый фактор может быть более существенен, особенно если такие районы не располагаются с подветренной стороны от промышленных.

В настоящей работе проведено сравнение КПО, измеренных на территории горного массива Карадаг в Крыму и в пригороде Санкт-Петербурга — г. Сестрорецке Курортного района. Обе станции мониторинга относятся к равнинным (ниже 1000 м над уровнем моря [Борисов, Шалыгина, Лезина, 2020]) и располагаются на значительном расстоянии от источников промышленного загрязнения атмосферы. Карадаг находится южнее Сестрорецка на 15 градусов широты.

Исходные материалы

Станция фоновое экологического мониторинга (СФЭМ) находится на территории Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского. Карадагская научная станция, в свою очередь, является филиалом Института биологии южных морей им. А. О. Ковалевского и представляет собой природный заповедник РАН, расположенный на территории горного массива Карадаг на юго-восточном побережье Крымского полуострова. СФЭМ находится на северо-восточном склоне горы Святой (44°55' с. ш., 35°14' в. д.), на высоте 180 м над у. м. С южной стороны станция окружена горными хребтами: с юго-востока — хребтом Кок-Кая (320 м над у. м.) [Андреев и др., 2020], с юга — хребтом Магнитным, с юго-запада — горой Святой. Удаление СФЭМ от моря с юго-восточной стороны составляет около 1.5 км, с южной — 3 км, с юго-западной — около 6 км, расстояние до ближайшего поселка Коктебель — около 1.5 км.

Измерения концентрации приземного озона на СФЭМ «Карадаг» проводились с помощью автоматического газоанализатора APOA 370 (HORIBA) на высоте двух метров и усреднялись за часовой интервал наблюдений, затем при анализе данные усреднялись посуточно. Метеопараметры измерялись с помощью метеостанций WS-600 и «Тропосфера-Н» [Лапченко, Звягинцев, 2014; Шалыгина, Кузнецова, Лапченко, 2019].

Станция Сестрорецк ($60^{\circ}06'$ с. ш., $29^{\circ}58'$ в. д.) расположена на восточном берегу Финского залива Балтийского моря, на расстоянии около 1 км от залива, на высоте 2 м над уровнем моря, в 6 км на север от кольцевой автомобильной дороги. Станция входит в сеть экологического мониторинга Санкт-Петербурга, организованную Комитетом по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности г. Санкт-Петербурга. Данные КПО взяты с официального сайта Комитета [[Экологический портал Санкт-Петербурга](#)] и представляют собой результаты измерений концентрации приземного озона, осреднённых посуточно и помесечно, за январь — октябрь 2019 г.

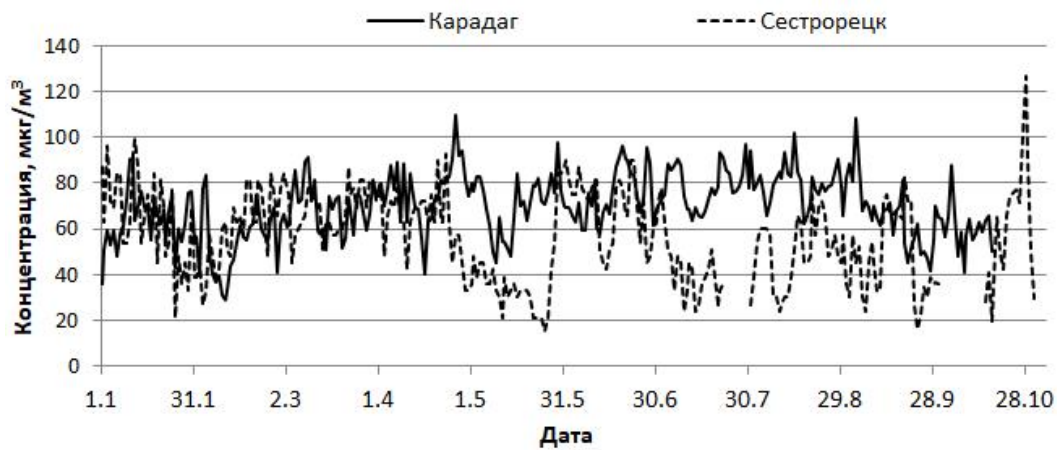
Результаты исследований и их обсуждение

Временной ход среднесуточных КПО на Карадаге и в Сестрорецке за рассматриваемый период представлен на рис. 1а. Для анализа совместной динамики на рис. 1б приведены средние КПО, полученные скользящим осреднением временных графиков на двух станциях. Скользящее осреднение по 11 точкам позволило выявить колебательный характер КПО с периодом около 20–25 дней, вариации с таким периодом присутствуют в течение всего интервала наблюдений и особенно заметны в Сестрорецке.

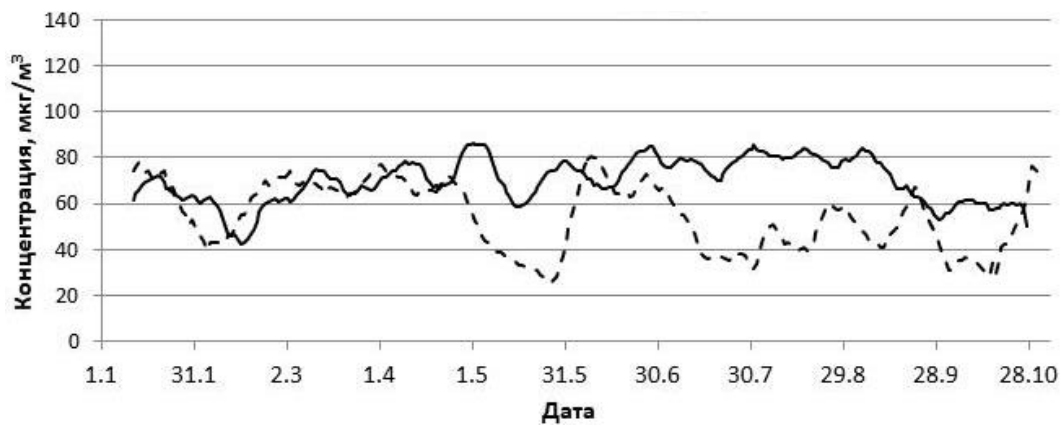
Можно отметить близость средних значений концентрации на двух станциях в холодный период, с января по апрель, с минимумом концентрации в конце января — начале февраля. Схожесть многодневных тенденций изменения КПО на Карадаге и в Сестрорецке в этот период подтверждает статистически значимый, с доверительной вероятностью 95 %, коэффициент корреляции (0,22), в то время как в целом по временному ряду за весь рассматриваемый период он крайне низкий (0,08). Для иллюстрации отсутствия связи между временными рядами КПО на рассматриваемых станциях за весь период наблюдений и наличия таковой в холодный период построены диаграммы рассеяния (рис. 2). Окончание периода «близости» совпадает с началом мая, когда происходит увеличение потока ультрафиолета и повышение температуры, что на более южной станции сказывается заметнее, чем на северной.

Уменьшение КПО в Сестрорецке с наступлением весны, по сравнению с периодом январь — апрель, может быть обусловлено сходом снежного покрова. Снег, согласно работе [[Шаманский, Потемкин, 2011](#)], уменьшает скорость осаждения озона на 1–2 порядка по сравнению с грунтовым покрытием, что препятствует разрушению озона. Тем самым в холодных заснеженных районах сток озона на земную поверхность может идти менее интенсивно, чем в бесснежных. Таким образом, таяние снежного покрова в Сестрорецке могло увеличить осаждение озона на земную поверхность. С другой стороны, рост температуры и УФ-излучения, способствующие увеличению образования озона, не смог скомпенсировать этот процесс, что привело к меньшим значениям КПО в Сестрорецке в тёплый период по сравнению как с холодным периодом, так и со значениями на Карадаге.

Одним из процессов образования озона, присущим тропосфере Сестрорецка, может оказаться диссоциация кислорода под действием ионизирующих излучений. В работе [[Шаманский, Потемкин, 2011](#)] указано на корреляцию между концентрацией озона и радона. В приземном слое атмосферы Санкт-Петербурга и Ленинградской области основным ионизатором является радон, который, влияя на диссоциацию кислорода, может способствовать формированию озона. Однако вряд ли такой механизм является существенным, поскольку повышение температуры в летние месяцы должно приводить к росту концентрации радона, а следовательно и озона, чего мы не наблюдаем в Сестрорецке.



а)



б)

Рис. 1. Временной ход среднесуточных значений КПО (а) и осреднённых по 11 точкам (б) на Карадаге и в Сестрорецке

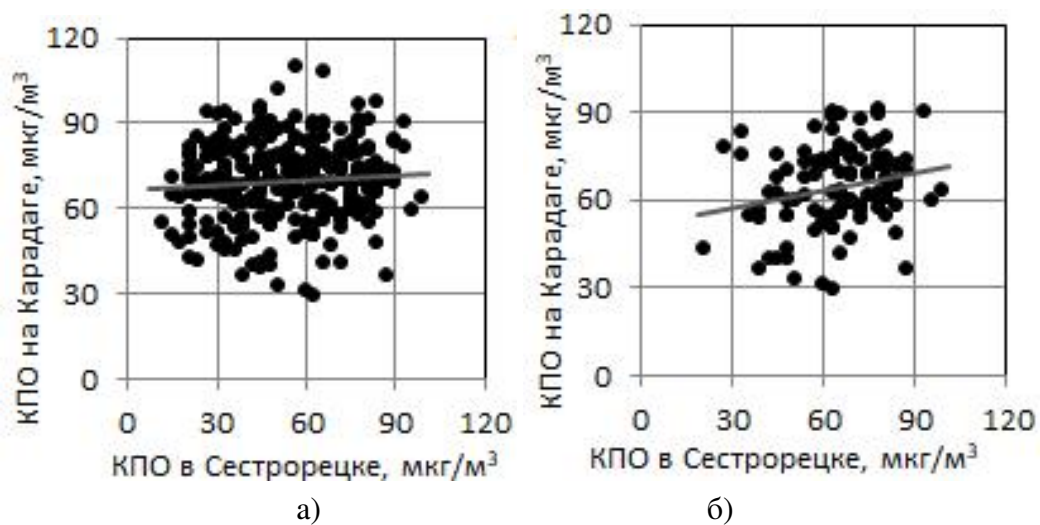


Рис. 2. Корреляционная диаграмма среднесуточных КПО на Карадаге и в Сестрорецке с прямой регрессии за весь период ($r = 0.08$) (а) и за период январь — середина апреля ($r = 0.22$) (б)

Весенне-летний максимум и осенний минимум, причины которых обсуждались в работе [Симакина, Крюкова, 2020], в графике средних значений на Карадаге в 2019 г. не выражены. В целом значения КПО на этой станции осенью более низкие по сравнению с предшествующим периодом с зимы до лета. Также полностью отсутствуют весенне-летний максимум и осенний минимум в графике КПО Сестрорецка. В мае и июле наблюдаются минимумы приземного озона.

Максимумы, минимумы и среднесуточные значения КПО на двух станциях ежемесячно представлены на рисунках (3а, 3б, 3в).

Среднечасовые максимумы КПО на Карадаге выше, чем в Сестрорецке, практически на протяжении всего года и достигают наибольших значений ($156\text{--}160\text{ мкг/м}^3$) в апреле и августе (рис. 3б), что, возможно, связано с переносом озона в приземный слой атмосферы из вышележащих слоёв. В максимумах КПО на Карадаге заметен сезонный ход с подъёмом весной и летом и спадом в холодное время года [Шалыгина, Кузнецова, Лапченко, 2019].

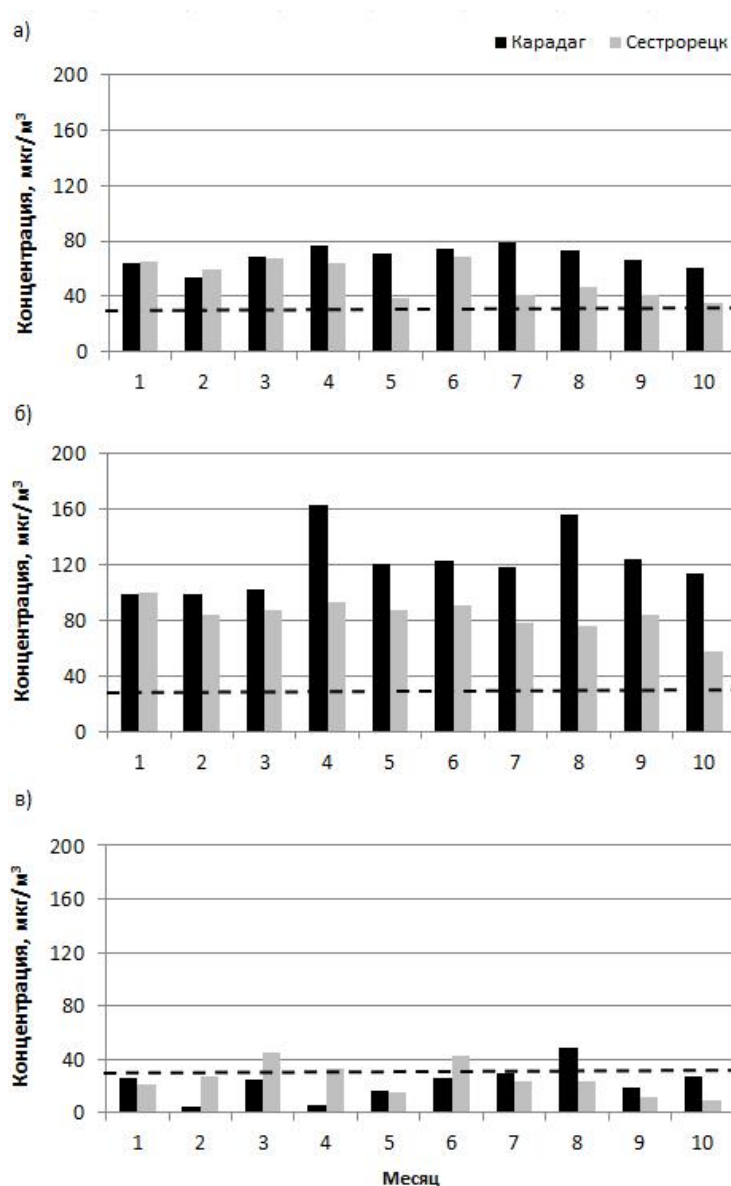


Рис. 3. Сравнительная сезонная диаграмма средней (а), максимальной (б) и минимальной (в) КПО в Крыму и Сестрорецке (горизонтальной штриховой прямой отмечен уровень $\text{ПДК}_{\text{ср}} = 30\text{ мкг/м}^3$)

Среднемесячные КПО на станциях наблюдения на Карадаге и в Сестрорецке с января по апрель и в июне практически одинаковы, в остальные месяцы наблюдается превышение значений КПО на Карадаге (рис. 3а). В минимумах КПО в Сестрорецке заметны весенний (март — апрель) и летний (июнь) рост и осеннее (октябрь) уменьшение концентрации O_3 (рис. 3в).

В обоих пунктах максимальные и среднемесячные значения КПО, а в некоторые месяцы (весна — лето) и минимальные — превышают ПДК_{сс}, составляющую в Российской Федерации 30 мкг/м^3 . На рис. 3 значение ПДК_{сс} отмечено штриховыми прямыми. На Карадаге весь тёплый период максимальные среднемесячные значения КПО вдвое выше предельной нормы. Максимальные среднечасовые концентрации озона на Карадаге достигают значений максимально разовой ПДК (160 мкг/м^3). Такие концентрации одного из смертельно опасных газов в воздухе районов, предназначенных для лечения, отдыха и спорта, должны приводить к незамедлительным мерам по экологической защите населения. С другой стороны, отсутствие публикаций, убедительно доказывающих «смертельность» приземного озона, позволяет усомниться в обоснованности принятых в нашей стране значений ПДК. Необходимость пересмотра действующих на территории РФ стандартов обсуждалась авторами ранее [Симакина, Крюкова, 2020; Демин, Звягинцев, Кузнецова, 2009].

Для анализа связи КПО с метеорологическими параметрами были рассчитаны парные коэффициенты корреляции и построены диаграммы рассеяния: КПО — температура и КПО — влажность (рис. 4).

В среднем за год влажность в Крыму была ниже, чем в Санкт-Петербурге, на 10 %, а её зависимость от приземного O_3 сильнее — коэффициент корреляции составил 0.74.

Сестрорецк находится на восточном берегу Финского залива, ветер практически круглый год имеет западное направление, но адвекция влажного воздуха слабо влияет на КПО, судя по графику (рис. 4г).

Температура воздуха в Крыму выше, корреляционная связь с КПО заметная (коэффициент корреляции составил 0.63) и положительная, в Сестрорецке — обратная (–0.44). Все значения коэффициентов корреляции статистически значимые.

Жаркая и сухая погода (температура приземного воздуха более 27°C) способствует эпизодам роста концентрации озона на СФЭМ «Карадаг». Наблюдения на ряде других российских станций выявили похожую зависимость [Холявицкая и др., 2011; Систер и др., 2014].

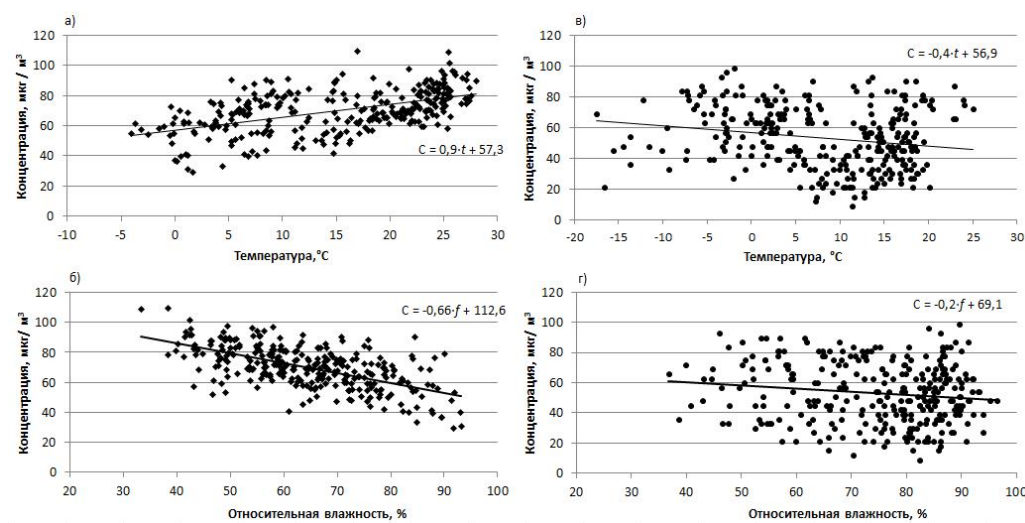


Рис. 4. Диаграммы рассеяния среднесуточных КПО — температура и КПО — влажность на СФЭМ «Карадаг» (а, б) и в Сестрорецке (в, г)

В последнее время в Крыму наблюдается рост температуры и усиление континентальности климата [Пивоваров, Горбунов, Сальников, 2015], что может иметь результатом снижение количества осадков, а следовательно и влажности воздуха. Хотя увеличение сухости климата может сопровождаться увеличением ливневых осадков, едва ли это приведёт к «вымыванию» озона каплями большого размера [Лапченко, Звягинцев, 2014]. Таким образом, в Крыму формируются благоприятные условия для повышения концентраций приземного озона в дальнейшем.

Выводы

Сравнительное исследование КПО за 2019 г. на двух станциях — СФЭМ «Карадаг» и «Сестрорецк» — позволило сделать следующие выводы.

1. Более 90 % времени значения КПО на обеих станциях превышают значение 30 мкг/м³, которое является ПДК_{сс} в РФ.
2. Значения КПО на СФЭМ «Карадаг» на протяжении тёплого периода выше, чем на станции в Сестрорецке, в холодный период значения КПО близки на обеих станциях.
3. Весенне-летний максимум и осенний минимум во временном ходе средних значений КПО, типичные для других станций, на Карадаге и в Сестрорецке не выражены. Сезонный ход с подъёмом весной и летом и спадом в холодное время года заметен лишь в максимумах КПО на Карадаге и минимумах КПО в Сестрорецке. В Сестрорецке наблюдаются майский и июльский минимумы приземного озона.
4. Заметны различия во влиянии метеофакторов на О₃ на двух станциях. На СФЭМ «Карадаг» обнаружена сильная положительная корреляция О₃ с температурой и отрицательная корреляция с относительной влажностью. В отличие от Карадага, в Сестрорецке выявлена отрицательная корреляционная связь О₃ с температурой.

Список литературы

1. Андреев В. В., Аришинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Еланский Н. Ф., Жамсуева Г. С., Заяханов А. С., Ивлев Г. А., Козлов А. В., Котельников С. Н., Кузнецова И. Н., Лапченко В. А., Лезина Е. А., Постыляков О. В., Савкин Д. Е., Сенник И. А., Степанов Е. В., Толмачев Г. Н., Фофонов А. В., Челибанов И. В., Челибанов В. П., Широтов В. Приземная концентрация озона на территории России в первом полугодии 2020 г. // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33, № 9. – С. 710–721. – <https://doi.org/10.15372/AOO20200908>
2. 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. – <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-122-135>
3. Демин В. И., Звягинцев А. М., Кузнецова И. Н. О действующих в Российской Федерации нормативах по содержанию озона в атмосферном воздухе // Экология человека. – 2009. – № 1. – С. 4–8.
4. Звягинцев А. М., Кузнецова И. Н., Шалыгина И. Ю., Нахаев М. И., Лезина Е. А., Лапченко В. А., Никифорова М. П., Демин В. И. Актуальность наблюдений и прогноза приземного озона в России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. 29, № 1. – С. 89–106. – <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2018-1-89-106>
5. Котельников С. Н., Степанов Е. В. Мониторинг тропосферного озона в атмосфере мегаполисов и малоурбанизированных районов // Труды института общей физики им. А. М. Прохорова РАН. – 2015. – Т. 71. – С. 42–71.

6. Лапченко В. А., Звягинцев А. М. Приземный озон в Крыму // *Пространство и время*. – 2014. – № 2 (16). – С. 254–257.
7. Пивоваров В. Г., Горбунов Р. В., Сальников А. И. О необходимости создания системы мониторинга приземного озона в Крыму // *Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2015. – № 3. – С. 69–76.
8. Симакина Т. Е., Крюкова С. В. Пространственно-временное распределение концентрации приземного озона в Санкт-Петербурге // *Гидрометеорология и экология*. – 2020. – № 61. – С. 407–420. – <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2020-61-407-420>
9. Систер В. Г., Цедилин А. Н., Воробьёва Н. В., Воробьёв Ю. В. Результаты статистической обработки концентраций тропосферного озона в Московском регионе // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. – 2014. – № 1 (50). – С. 74–81.
10. Холявицкая А. А., Потёмкин В. Л., Голобокова Л. П., Ходжер Т. В. Апробация пассивного метода для измерения концентраций озона в приземной атмосфере (ст. Монды, Восточная Сибирь) // *Оптика атмосферы и океана*. – 2011. – Т. 24, № 9. – С. 828–831. – <https://doi.org/10.1134/S1024856012010046>
11. Шалыгина И. Ю., Кузнецова И. Н., Лапченко В. А. Режим приземного озона на станции Карадаг в Крыму по наблюдениям в 2009–2018 гг. // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. – 2019. – № 2 (372). – С. 102–113.
12. Шаманский Ю. В., Потемкин В. Л. Приземный озон и электрическое состояние атмосферы // *Известия Иркутского государственного университета. Сер.: Науки о Земле*. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 213–220.
13. Экологический портал Санкт-Петербурга [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.infoeco.ru/index.php?id=53> (дата обращения: 10.03.2021).
14. Monks P. S., Sommariva R., Archibald A. T., Colette A., Cooper O., Granier C., Coyle M., Fowler D., Derwent R., Law K. S., Mills G. E., Stevenson D. S., Tarasova O., Thouret V., Von Schneidmesser E., Wild O., Williams M. L. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015. – Vol. 15, iss. 15. – P. 8889–8973. – <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>

GROUND-LEVEL OZONE IN NON-INDUSTRIAL AREAS OF ST. PETERSBURG AND CRIMEA

Lapchenko V. A.¹, Simakina T. E.², Kryukova S. V.²

¹ T. I. Vyazemsky Karadag Scientific Station – Nature Reserve of RAS – Branch of IBSS,
Feodosiya, Russian Federation,
e-mail: ozon.karadag@gmail.com

² Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: tatiana.simakina@gmail.com

Abstract: The results of a comparative analysis of the results of measurements of ground-level ozone concentration at the stations Karadag (Crimea) and Sestroretsk (Kurortny district of St. Petersburg) for the period from January to October 2019 are presented. Despite the remoteness of the stations from industrial centers and highways, for most of the measuring period, the values of ground-level ozone concentration at both stations exceed the average daily limit. The permissible value in the Russian Federation is 30 micrograms/m³. The excess of ground-level ozone concentrations in Karadag compared to Sestroretsk was revealed in most months. The maximum hourly average concentrations of ozone at Karadag reach the maximum one-time maximum permissible concentration of 160 micrograms/m³. During the cold period of the year, from January to April, there were similar trends in changes in ground-level ozone concentrations at two stations. With the onset of warm weather and an increase in the level of insolation, the amount of ozone in Sestroretsk decreased, and the spring-summer maximum concentration of O₃,

typical for a number of other areas, was absent here. The correlation of ozone concentration with meteorological parameters at two stations was revealed, noticeable differences in the nature of the dependences of surface O_3 values on humidity and air temperature for the territories under consideration were noted. The temperature of the surface air on Karadag positively, and the relative humidity negatively correlate with the concentration of ozone. Thus, hot and dry weather on Karadag contributes to episodes of elevated values of the concentration of surface ozone. In Sestroretsk, the correlation of ozone concentration with temperature is negative.

Keywords: ground-level ozone, Karadag, Sestroretsk, temperature, air humidity, empirical distribution function of tropospheric ozone concentration.

Сведения об авторах

Лапченко
Владимир
Александрович

научный сотрудник Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН – филиала ФИЦ ИнБЮМ, ozon.karadag@gmail.com

Симакина
Татьяна
Евгеньевна

кандидат физико-математических наук, доцент Российского государственного гидрометеорологического университета, tatiana.simakina@gmail.com

Крюкова
Светлана
Викторовна

кандидат физико-математических наук, доцент Российского государственного гидрометеорологического университета, krukos@rambler.ru

*Поступила в редакцию 29.09.2021 г.
Принята к публикации 17.06.2022 г.*