

УДК 504.3.054:551.521.31(477.75)

В.А. Лапченко¹, Н.Е. Чубарова², Е.Ю. Жданова³, В.А. Розенталь⁴

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА, АЭРОЗОЛЯ И СОЛНЕЧНОЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ РАДИАЦИИ В ЮГО-ВОСТОЧНОМ КРЫМУ

Получены оценки пространственных закономерностей распределения концентраций приземного озона и аэрозольной оптической толщины в районе Карадагской станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ) ФГБУН «КНС-ПЗ РАН», в рекреационных и подверженных антропогенному загрязнению зонах юго-восточного Крыма. Выявлены существенные флуктуации концентраций приземного озона (от +15 до –22 мкг/м³) относительно фоновых значений с характерным уменьшением его концентраций на Симферопольском шоссе при активном автомобильном движении и повышением концентраций у берега моря. Аэрозольная оптическая толщина в городской среде (непосредственно в Коктебеле) была больше на 0,02–0,04, чем фоновые значения. При росте антропогенного загрязнения наблюдалось увеличение волнового экспонента Ангстрема (до 0,5 в Коктебеле по сравнению с фоновыми условиями) за счет увеличения мелкодисперсного аэрозоля. Уменьшение волнового экспонента Ангстрема наблюдалось при измерениях у береговой линии за счет увеличения доли грубодисперсной фракции аэрозоля. Модельные радиационные расчеты эритемной УФ радиации с учетом пространственной изменчивости концентраций приземного озона и аэрозольной оптической толщины для различных пунктов, в которых проводились измерения, выявили более важную роль флуктуаций аэрозольной оптической толщины (до 5%) по сравнению с концентрациями приземного озона (до 1%) в вариациях эритемной УФ радиации.

Ключевые слова: аэрозольные свойства, антропогенное загрязнение, эритемная УФ радиация, УФ индекс, станция фонового экологического мониторинга

Введение. Исследование пространственной изменчивости малых газовых примесей и аэрозоля и оценки ее воздействия на биологически активную УФ радиацию имеет особенно важное значение в южных регионах России, где сосредоточено большое число курортов и санаториев. Юго-восточное побережье Крымского полуострова является именно такой развивающейся рекреационной зоной. Этим обусловлена актуальность проведения специальных экспериментов для выяснения особенностей вариаций газовой-аэрозольного состава и их влияния на поступление УФ радиации к поверхности Земли.

Среди атмосферных малых газовых примесей озон является наиболее вредным для здоровья соединением. По стандартной классификации он относится к веществам первого класса опасности, и его высокие концентрации оказывают отрицательное воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Максимально разовые предельно допустимые концентрации приземного озона, принятые в России, составляют 160 мкг/м³, а среднесуточные предельно допустимые концентрации – 30 мкг/м³. В дозах, превышающих предельно допустимые концентрации, озон вызывает головную боль, раздражение дыхательных путей, кашель, головокружение, общую усталость. Более серьезные нарушения здо-

ровья, включая резкое ослабление сердечной деятельности, могут наблюдаться при концентрации приземного озона, достигающей 200 мкг/м³ и более в течение 8 часов. Концентрация озона более 80 мкг/м³ считается опасной для растений и может привести к понижению продуктивности и необратимым повреждениям листьев при длительном воздействии [Manning et al., 2002; Кунина, 1986]. Озон образуется под действием солнечного излучения в атмосфере, содержащей его предшественники, включающие оксиды азота и летучие органические соединения как естественного, так и антропогенного происхождения [Jacob, 1999; Белан, 2010; Ларин, 2013]. Метеорологические факторы оказывают заметное воздействие на концентрацию приземного озона (КПО), поскольку они определяют интенсивность вертикального перемешивания, распространение эмиссий газов-предшественников озона, скорости химических реакций [Jacob, 1999; Лапченко, Звягинцев, 2014; Звягинцев, Кузнецова, 2002; Tarasova, Karpetchko, 2003; Flaum et al., 1996]. Являясь химически активной примесью, озон во многом определяет химический состав атмосферы, воздействует на различные вещества и материалы. Необходимо отметить и защитную роль стратосферного озона в поглощении жесткого УФ излучения и в значитель-

¹ ФГБУН «Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН», науч. с.; e-mail: ozon.karadag@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: natalia.chubarova@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, науч. с., канд. геогр. н.; e-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии, инженер; e-mail: vandttqq@list.ru

ном ослаблении УФ радиации области В (280–315 нм).

В Европе и США наблюдаются повышенные КПО [Звягинцев, 2004; Климат Москвы, 2017; Crutzen, 1988; Solsberg et al., 2002]. В крупных городах Европы средние КПО составляют порядка 35–45 мкг/м³, в Москве КПО колеблются в диапазоне 25–35 мкг/м³, в Мехико (Мексика) средние КПО достигают 45 мкг/м³ [Доклад ..., 2016]. В частности, в Мехико, Сантьяго (Чили) и Лос-Анжелесе (США) могут наблюдаться короткопериодные изменения КПО, превышающие 400 мкг/м³ [Air quality, 2005].

За счет быстро протекающих фотохимических реакций и метеорологических факторов КПО могут значительно варьировать по территории. Например, в Калифорнии в районе Лос-Анджелеса на площади около 300 км² средние различия в пространственном распределении КПО составляли 9 ppb, а 95%-ные квантили пространственных различий достигали 25 ppb [Sadighi et al., 2018]. В Индии средние различия в КПО в области Ранчи составляют порядка 20–30 мкг/м³. В восточном густонаселенном районе Китая пространственная изменчивость КПО также велика и обуславливается во многом антропогенным влиянием, дальним переносом и также интенсивностью муссонной активности [Wang et al., 2011].

Исследования пространственных закономерностей в распределении приземного озона проводились по данным экспедиции «Тройка» [Elanski et al., 2009; Elanski, Lavrova, 2014], в ходе которой были определены тенденции уменьшения КПО в областях с высокими эмиссиями окислов азота (в центре городов по сравнению с окраинами). Изменчивость КПО за счет пространственных различий в концентрациях газов-предшественников озона была выявлена и на территории Московского мегаполиса, проявляясь, главным образом, в увеличении КПО в относительно чистых районах по сравнению с автомагистралями [Климат Москвы, 2017].

Наряду с приземным озоном, атмосферный аэрозоль также является существенным фактором загрязнения окружающей среды, и его пространственные особенности также могут быть заметными. Кроме этого, содержание аэрозоля в атмосфере и его микрофизические и оптические параметры оказывают заметное влияние на приход к поверхности Земли солнечной радиации. Приземные концентрации аэрозоля во многом коррелируют с концентрациями в столбе атмосферы, особенно в теплый период года [Губанова с соавт., 2017]. В то же время, сам уровень содержания аэрозолей может свидетельствовать об антропогенном загрязнении, его необходимо учитывать при оценке скоростей возможного формирования озона на частицах аэрозоля.

Отметим, что работ, посвященных оценкам пространственных особенностей распределения приземного озона и аэрозоля на масштабах десятков километров, довольно мало, что связано со сложностью

проведения мобильных экспериментов и дороговизной приборного парка.

На станции фонового экологического мониторинга (СФЭМ) (44°55' с. ш., 35°14' в. д., 180 м над ур. м.), расположенной на территории Карадагского природного заповедника, непосредственно примыкающей к курортным зонам, с 2013 г. ведется мониторинг концентраций основных малых газовых составляющих атмосферы, а непрерывный мониторинг КПО осуществляется с 2006 г. Знания о пространственных вариациях КПО и свойств аэрозоля на рекреационной территории имеют особое значение. Помимо непрерывного мониторинга, необходимо проводить измерения КПО и в разных пунктах. КПО в пунктах зависит от эмиссий естественных и антропогенных веществ, свойств подстилающей поверхности, степени удаленности от интенсивных автодорог. Вследствие близости моря и интенсивного автомобильного движения, пространственные распределения КПО и параметров аэрозоля могут испытывать существенные вариации и значительно отличаться от наблюдений в одном пункте. Солнечная УФ радиация также может иметь пространственные вариации вследствие изменения этих и других атмосферных факторов.

Задача исследования состояла в оценке пространственной изменчивости КПО, аэрозольных характеристик и в выяснении возможных причин их флуктуаций, а также в определении влияния изменчивости этих факторов на эритемную УФ радиацию, имеющую максимальную чувствительность в УФ-В области спектра. Для этого были проведены специальные натурные эксперименты в районе Карадагского природного заповедника, расположенного на юго-восточном побережье Крымского полуострова. Отметим, что до настоящего времени исследования пространственных закономерностей распределения указанных характеристик на территории Крымского полуострова не проводились.

Методика. В 2017 г. были проведены две серии экспериментов в весенний и осенний периоды года (периоды 18–21.05.2017, 26–28.09.2017 соответственно) по оценке пространственных вариаций КПО, аэрозольных характеристик и солнечного УФ излучения. В качестве реперных измерений использовались наблюдения на станции фонового экологического мониторинга, расположенной на территории заповедника. Наблюдения на СФЭМ включают в себя измерения температуры и влажности воздуха, давления, скорости и направления ветра, температуры почвы (метеостанция Тропосфера – Н, метеостанция WS – 600), кислотности жидких осадков, а также измерения газовых составляющих: озона, оксидов азота и оксида углерода (газоанализаторы HORIBA.Ltd, Япония). Измерения КПО на СФЭМ проводятся с помощью автоматического газоанализатора: АРОА 370, в котором реализован оптический метод определения концентрации газовой смеси по поглощению излучения в УФ области спектра. Отбор проб осуществляется с использованием тефлоновых трубок на высоте трех метров от по-

верхности земли. Данные непрерывной регистрации КПО усреднялись за минутный, получасовой и часовой интервал наблюдений с сохранением информации в регистраторе I/O–EXPANDER HORIBA. Предел обнаружения КПО составляет 1 мкг/м³.

Параллельно с измерениями на СФЭМ проводились комплексные измерения в районе фоновой станции в области 10×10 км² при стабильных метеорологических условиях. Расположение пунктов измерений в период весеннего и осеннего экспериментов приведено на рис. 1. Выбор пунктов характеризовался разной степенью удаленности от мест загрязнения (городского поселения и автомобильного Симферопольского шоссе). Дополнительно измерения были проведены на берегу моря, поскольку, как было получено на основании многолетних измерений на СФЭМ, КПО при адвекции с моря обычно больше фоновых значений.

При проведении мобильных измерений использовался портативный озонометр Model 202 фирмы

2B Technologies, который позволяет проводить измерения КПО с погрешностью ±3 мкг/м³. Принцип действия прибора, так же как и у прибора на фоновой станции, основан на оптическом методе поглощения УФ излучения на длине волны 254 нм (<http://www.twobtech.com/model-202-ozone-monitor.html>). Период установления сигнала озонометра составлял примерно 30–40 минут, серия измерений проводилась с минутным разрешением в течение 10–15 мин.

Для измерения аэрозольных характеристик атмосферы использовались портативные солнечные фотометры GLOBE (<https://www.globe.gov/web/europe-aerosols-campaign/overview/instruments>), с помощью которых восстанавливались величины аэрозольной оптической толщины на нескольких длинах волн (AOT_{λ} – нижний индекс лямбда – $\lambda=385, 505, 625$ и 870 нм) и определялись значения волнового экспонента Ангстрема (alpha), который рассчитывался методом регрессии для спектрального диапазона 505–870 нм:



Рис. 1. Расположение пунктов мобильных измерений и СФЭМ. 1 см – 1,6 км. Условные обозначения: 1 – СФЭМ, ФГБУН «ЖНС – ПЗ РАН»; 2 – Коктебель; 3 – въезд в Коктебель; 4 – поворот на Наниково; 5 – соленое озеро Бараколь; 6 – шоссе на Симферополь; 7 – дорога на Орджоникидзе; 8 – берег моря, Орджоникидзе; 9 – правый поворот дороги; 10 – левый поворот дороги

Fig. 1. Location of mobile measurement points and the Karadag background environmental monitoring station. 1 cm – 1,6 km. 1 – Karadag background environmental monitoring station; 2 – Koktebel; 3 – Entrance to Koktebel; 4 – Turn on Nanikovo; 5 – the Barakol salt lake; 6 – Highway to Simferopol; 7 – Road to Ordzhonikidze; 8 – Seashore, Ordzhonikidze; 9 – Right turn of the road; 10 – Left turn of the road

$$\alpha = \ln AOT_{\lambda} / \ln \lambda \quad (1)$$

Волновой экспонент Ангстрема позволяет качественно оценивать размер частиц.

Наличие разорванной облачности в дни проведения экспериментов не позволило провести оценки пространственных вариаций солнечной радиации. Вместо этого использовались модельные расчеты ультрафиолетового излучения для условий ясного неба с учетом измеренных вариаций КПО и аэрозольной оптической толщины.

Регистрация данных измерений велась с помощью специально разработанного аппаратно-программного комплекса SUN software [Розенталь с соавт., 1997].

Для выяснения возможных различий в показаниях двух озонметров (станционного и портативного) были проведены параллельные измерения КПО двумя приборами. Результаты сравнений показали хорошее согласие: различия между показаниями озонметров 2B Technologies и APOA 370 Horiba Ltd составили $6,9 \pm 3,7$ мкг/м³, что лежит в пределах погрешности измерений КПО.

Калибровка портативных фотометров была уточнена по данным измерений аэрозольных оптических толщин в Москве в Метеорологической обсерватории МГУ в 2017 г. по солнечному фотометру CIMEL и в горных условиях в Хибинах с использованием долгого метода Бугера при небольшом содержании аэрозоля. Погрешность измерений аэрозольной оптической толщины составляет около 0,02.

Результаты. Общая характеристика КПО и аэрозольной оптической толщины в юго-восточном Крыму. По данным Карадагской СФЭМ в сезонном ходе КПО наблюдается классическая картина с максимумами концентрации в апреле и июле-августе (табл. 1). Как и в других районах европейской территории России, КПО характеризуется двумя максимумами в весенние и летние месяцы, однако в южных регионах главный максимум наблюдается в летние месяцы. Рост КПО в теплый пери-

од определяется более высокими уровнями солнечной УФ радиации за счет больших высот Солнца, что приводит к диссоциации молекулы кислорода. Кроме того, летом наблюдается рост концентрации органических соединений в атмосфере, которые являются газами – предшественниками озона. Весной увеличение КПО определяется также переносом озона из верхних слоев тропосферы и стратосферы, где в это время наблюдается сезонный максимум концентрации озона.

Превышение порогов максимально разовых ПДК в этом регионе достигается редко. Максимум КПО летом наблюдался 16 июля 2013 г. (168 мкг/м³), а максимум КПО в весенний период года был зарегистрирован 20 мая 2016 г. (181 мкг/м³). Величины, близкие к максимально разовому значению ПДК, обычно наблюдаются в период с июля по сентябрь, но очень редко возможны и весной. В то же время, в течение всего года наблюдается превышение среднесуточных значений ПДК, как это и отмечалось в 2017 г.

На КПО оказывает существенное влияние комплекс метеорологических факторов. Так, максимальные значения КПО в теплый период года обычно наблюдаются при восточном, юго-восточном и южном направлениях ветра, что относительно расположения Карадагской СФЭМ, характеризуется адвекцией преимущественно со стороны моря. Возможное объяснение этого факта может быть связано с низкой скоростью осаждения приземного озона над морской поверхностью и, как следствие, его накоплением [Белан, 2010]. В табл. 2 приведены метеорологические характеристики, а также КПО на СФЭМ в периоды проводимых экспериментов. Суточный ход КПО в период эксперимента в мае характеризовался уменьшением концентрации в утренние часы до 8:00 (43 мкг/м³), и суточным максимумом в 17:00 часов (66 мкг/м³) (рис. 2). Таким образом, проявлялось два максимума КПО: ночной

Таблица 1

Среднемесячные и экстремальные значения концентрации приземного озона, полученные при среднечасовом усреднении в 2017 г. (мкг/м³)

Месяц	Максимальные	Средние	Минимальные
Январь	77	52	12
Февраль	98	65	25
Март	107	64	24
Апрель	122	77	26
Май	105	68	24
Июнь	85	58	25
Июль	127	82	37
Август	135	81	26
Сентябрь	128	76	26
Октябрь	106	57	19
Ноябрь	79	43	10
Декабрь	77	51	8

П р и м е ч а н и е. Предельно допустимые концентрации максимально разовые – 160 мкг/м³, среднесуточная – 30 мкг/м³.

Таблица 2

Основные метеорологические характеристики, КПО и содержание оксидов азота на фоновой станции в период проведения активных мобильных исследований

Время	Облачность и атмосферные явления	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость ветра, м/с	Направление ветра, градусы	Озон	NO/NO ₂
						мкг/м ³	
Весенний эксперимент, 19.05.2017							
10:30–11:00	Ясно	14,3	50	3,2	342	57	0,4/0,6
11:00–11:30	Переменная облачность, 1/1 Cu, Cu fractus	14,7	48	2,9	338	59	
11:30–12:00	Переменная облачность, 1/1 Cu, Cu fractus	14,8	48	2,8	332	60	0,5/0,6
12:00–12:30	Переменная облачность, 1/1 Cu, Cu fractus	14,9	47	2,4	340	60	0,5/0,6
12:30–13:00	Переменная облачность, 1/1 Cu	15,1	46	2,9	343	61	
13:00–13:30	Переменная облачность, 1/1 Cu	15,1	46	2,8	342	62	0,5/0,6
13:30–14:00	Переменная облачность, 1/1 Cu, Cu fractus	15,2	45	2,7	342	63	
Весенний эксперимент, 20.05.2017							
10:30–11:00	Переменная облачность, 9/8, Ci, Ac, Cu, Cu fractus	14,6	65	1,0	223	62	0,3/0,0
11:00–11:30	Переменная облачность, 9/8, Ci, Ac, Cu, Cu cong, Cb	16,1	58	0,9	304	63	
11:30–12:00	Пасмурно, 9/8, Ci, Ac, Cu, Cu cong, Cb	16,1	57	1,1	112	65	0,4/0,2
12:00–12:30	Пасмурно, 8/7, Ci, Cu, Cu cong, Cb	15,7	62	1,7	146	66	0,3/0,0
12:30–13:00	Дождь	15,3	66	2,5	171	67	
13:00–13:30	Дождь	14,2	70	2,6	168	66	
13:30–14:00	Дождь	13,8	79	2,8	161	65	
Осенний эксперимент, 29.09.2017							
10:30–11:00	Ясно, солнечно, 1/0, Ci	12,6	53	6,6	10	58	1,1/0,0
11:00–11:30	Ясно	13,2	49	6,1	10	60	1,1/0,0
11:30–12:00	Ясно	13,8	46	5,9	5	63	
12:00–12:30	Ясно					65	1,1/0,0
12:30–13:00	Ясно	14,3	45	5,7	8	69	
13:00–13:30	Ясно	14,7	44	5,4	12	73	1,1/0,0
13:30–14:00	Ясно	14,9	43	5,7	15	78	

Примечание. Балл облачности (общая/нижняя облачность) и форма облачности отмечены в пунктах мобильных наблюдений.

(вторичный) и дневной (основной), что является типичным для данного времени года. В сентябре суточный ход КПО в период эксперимента характеризовался одним максимумом, который приходился на 14–15 часов.

Рассмотрим типичные аэрозольные свойства атмосферы на территории Крыма. Наиболее надежными измерениями аэрозольных характеристик атмосферы в столбе атмосферы характеризуется сеть АЭРОНЕТ [Holben et al., 1998]. Ближайшая станция наблюдения к Карадагской СФЭМ расположена в г. Севастополь, где измерения проводи-

лись в период с 2007 по 2015 гг. Сопоставление измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) между Севастополем и Карадагской СФЭМ, полученные по спутниковым данным MODIS (коллекция 5), показали различия, не превышающие 0,03 в видимом диапазоне спектра, в мае и в сентябре, что близко к погрешности определения АОТ. Это позволяет использовать в первом приближении измерения в Севастополе для характеристики типичных аэрозольных свойств в исследуемом районе. По данным многолетних измерений АЭРОНЕТ сезонные изменения АОТ также характеризуются

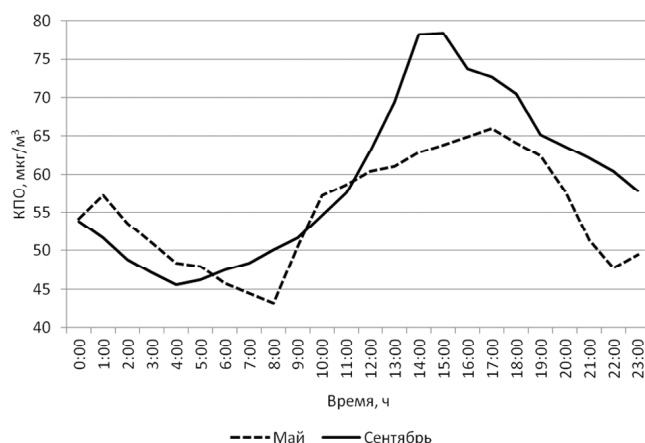


Рис. 2. Суточный ход КПО (мкг/м³) на СФЭМ 19 мая и 29 сентября 2017 г.

Fig. 2. Daily variation of ground-level ozone concentrations at the Karadag background environmental monitoring station on May 19 and September 29, 2017 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

двумя максимумами – весенним и летним. Среднемесячные значения АОТ в мае и сентябре в целом характеризуются примерно одинаковыми значениями АОТ на длине волны 500 нм, составляющими около 0,2 (рис. 3).

Пространственные особенности распределения КПО и параметров аэрозоля по данным мобильных экспериментов. Пространственные изменения КПО. Как видно из рис. 1, выбор пунктов измерений определялся степенью удаленности от оживленных автомагистралей, которые являются основными загрязнителями рассматриваемого региона в теплый период года. Самое загрязненное место расположено на Симферопольском шоссе. Однако надо отметить, что в осеннем эксперименте, в сентябре, из-за шторма Керченская переправа была закрыта, и интенсивность движения на шоссе была сопоставима с движением на небольших автотрассах (всего 6–8 машин в минуту).

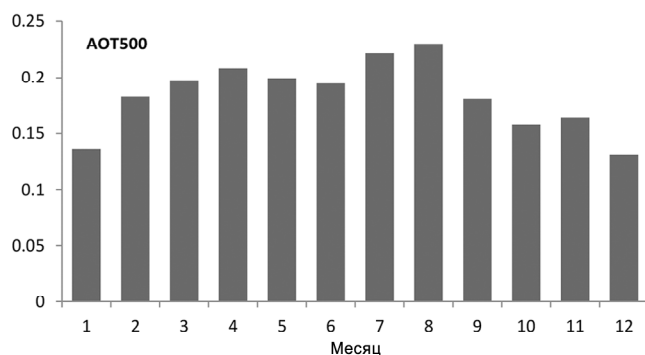


Рис. 3. Сезонные изменения аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм по данным АЭРОНЕТ (Севастополь, 2007–2014 гг, уровень 1.5, версия 3)

Fig. 3. Seasonal changes in aerosol optical thickness at 500 nm wavelength according to AERONET data (Sevastopol, 2007–2014, level 1.5, version 3)

Метеорологические условия в период проведения весеннего и осеннего экспериментов характеризовались примерно одинаковыми температурно-влажностными условиями и ветром с преобладанием северных румбов в мае (за исключением второй половины дня 20 мая, когда шел дождь и измерения не проводились) и в сентябре (табл. 2). На высоте 500 мб анализ обратных траекторий с использованием кинематической модели (<http://db.cger.nies.go.jp>) за 5 дней показал адвекцию воздуха с севера ЕТР и районов Карского моря в мае, и с востока – из центральных районов Евразии – в сентябре.

Рассмотрим особенности пространственного распределения КПО на анализируемой территории. На рис. 4 приведены средние значения КПО и 95%-ные доверительные интервалы для пунктов измерений и их отклонения от одновременных измерений на СФЭМ. Хорошо видно, что максимальные значения КПО наблюдались на проселочных дорогах, где практически отсутствовало автомобильное движение и выбросы оксидов азота были минимальными, или с наветренной стороны от оживленного Симферопольского шоссе (на расстоянии приблизительно 200 м от шоссе). Повышенные КПО также наблюдались на берегу моря в Орджоникидзе в период как весеннего, так и осеннего экспериментов.

Статистически значимые пониженные КПО (примерно на $17,6 \text{ мкг}/\text{м}^3$ относительно фоновой станции) отмечались весной на Симферопольском шоссе при активном автомобильном движении, а также в районе непосредственно Коктебеля и села Наниково, где трасса была менее загружена, однако пункты измерений находились вблизи центра локального антропогенного загрязнения (поселка Коктебель). Отметим, что осенью при слабом автомобильном потоке по Симферопольскому шоссе КПО на шоссе была больше примерно на $10\text{--}14 \text{ мкг}/\text{м}^3$, чем в других пунктах наблюдений и близка к фоновым значениям (рис. 4). В то же время весной, как отмечено выше, на Симферопольском шоссе наблюдались максимальные отрицательные отклонения КПО от фоновых значений. Такие изменения КПО в весенний и осенний периоды на Симферопольском шоссе объясняются флуктуациями выбросов оксидов азота, большие концентрации которых вели к разрушению озона весной и к менее активному разрушению осенью вследствие отсутствия автомобильного трафика. В целом, наибольшие значения КПО относительно фоновых ($+15 \text{ мкг}/\text{м}^3$) наблюдались на берегу моря, рядом с пляжем в Орджоникидзе, в осенний период. Отметим, что хотя здесь сами КПО не превышали максимально разовые значения ПДК, однако были гораздо больше среднесуточных ПДК. При сохранении такой тенденции в течение длительного времени КПО могут наносить вред здоровью отдыхающих, что требует проведения дополнительного мониторинга КПО.

Интересно, что полученные повышенные значения КПО и в мае, и в сентябре на берегу моря в

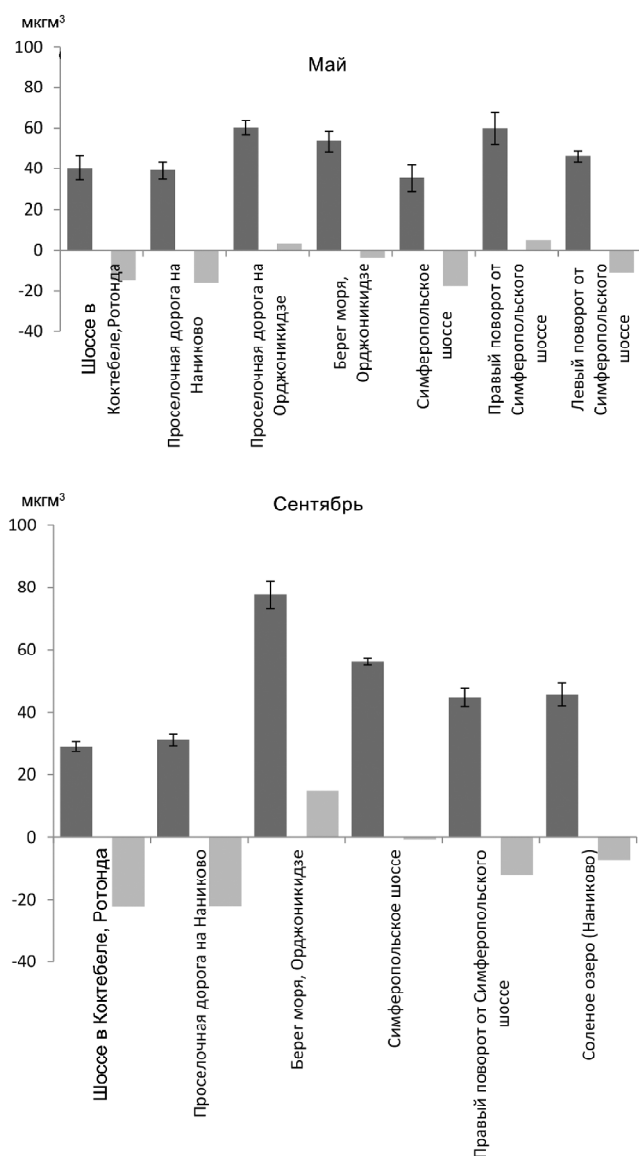


Рис. 4. Концентрации приземного озона (темные столбцы) в пунктах измерений в период экспериментов в окрестностях СФЭМ. Светлые столбцы – различия КПО в пунктах измерений с данными, полученными на СФЭМ

Fig. 4. Concentrations of ground-level ozone (dark columns) at the sites of measurements during the experiments in the vicinity of the Karadag background environmental monitoring station. Light columns – the differences of ground-level ozone concentrations at measurement sites with the data obtained at the Karadag background environmental monitoring station

Орджоникидзе хорошо согласуются с повышенными КПО на СФЭМ при ветрах со стороны моря. С одной стороны, это может быть связано с увеличением доли органических летучих соединений в морском воздухе или с дополнительной генерацией озона на крупных частицах (по данным оценок рост КПО за счет этого может достигать 15% [Dickerson et al., 1997]). Более крупный размер частиц подтвердился в ходе анализа волнового экспонента Ангстрема, определенного в период экспериментов. С другой стороны, повышенные КПО могут объяс-

няться влиянием дальнего переноса газов-предшественников. Исследование этого вопроса требует дополнительных измерений и планируется провести в последующем.

Наличие хода КПО в течение дня может иметь некоторое влияние на выявленные пространственные закономерности. Для выяснения роли внутрисуточной изменчивости были дополнительно проанализированы разности КПО между измерениями для каждого пункта мобильных измерений и параллельными измерениями на СФЭМ. Выявленные разности КПО между пунктами измерений по абсолютным значениям хорошо согласованы по знаку с разностями величин относительно измерений на СФЭМ (рис. 4). Коэффициент детерминации составляет более 98%.

Пространственные вариации аэрозольных свойств атмосферы. Аэрозольные оптические толщины на длине волны 500 нм были восстановлены с учетом волнового экспонента Ангстрема, полученного по измерениям на трех длинах волн 505, 625, 870 нм. В среднем для мая и сентября АОТ₅₀₀ составило 0,12 (0,06 – в мае и 0,15 – в сентябре, что значительно меньше, чем в среднем по данным многолетних измерений АЭРОНЕТ (соответственно 0,2 и 0,18, рис. 3). Низкие значения АОТ были обусловлены адвекцией холодного воздуха из северных континентальных регионов России и Евразии. Анализ гистограмм распределения АОТ на разных длинах волн демонстрирует спектральные особенности АОТ с выраженным максимумом в УФ диапазоне спектра (рис. 5). Средние значения волнового экспонента Ангстрема, рассчитанного с учетом измерений АОТ на этих длинах волн, свидетельствуют о преобладании мелкодисперсного аэрозоля и оказались в среднем близкими для весны и осени: соответственно $1,3 \pm 0,3$ и $1,2 \pm 0,1$. В то же время отмечались довольно существенные пространственные вариации волнового экспонента Ангстрема, связанные с локальными источниками аэрозоля.

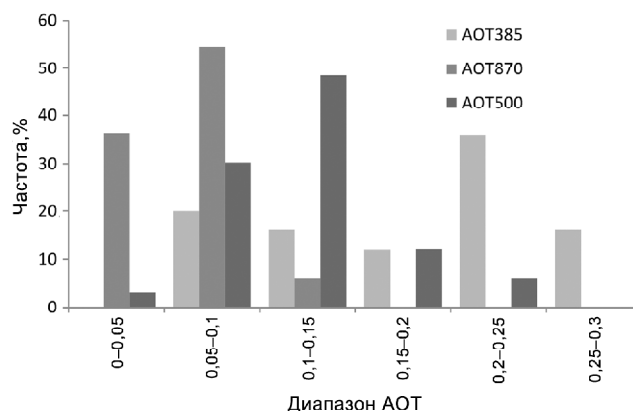


Рис. 5. Гистограмма распределения АОТ на длинах волн 385, 500 и 870 нм по данным двух экспериментов

Fig. 5. Histogram of AOT distribution at 385 nm, 500 nm and 870 nm wavelengths according to the data of two experiments

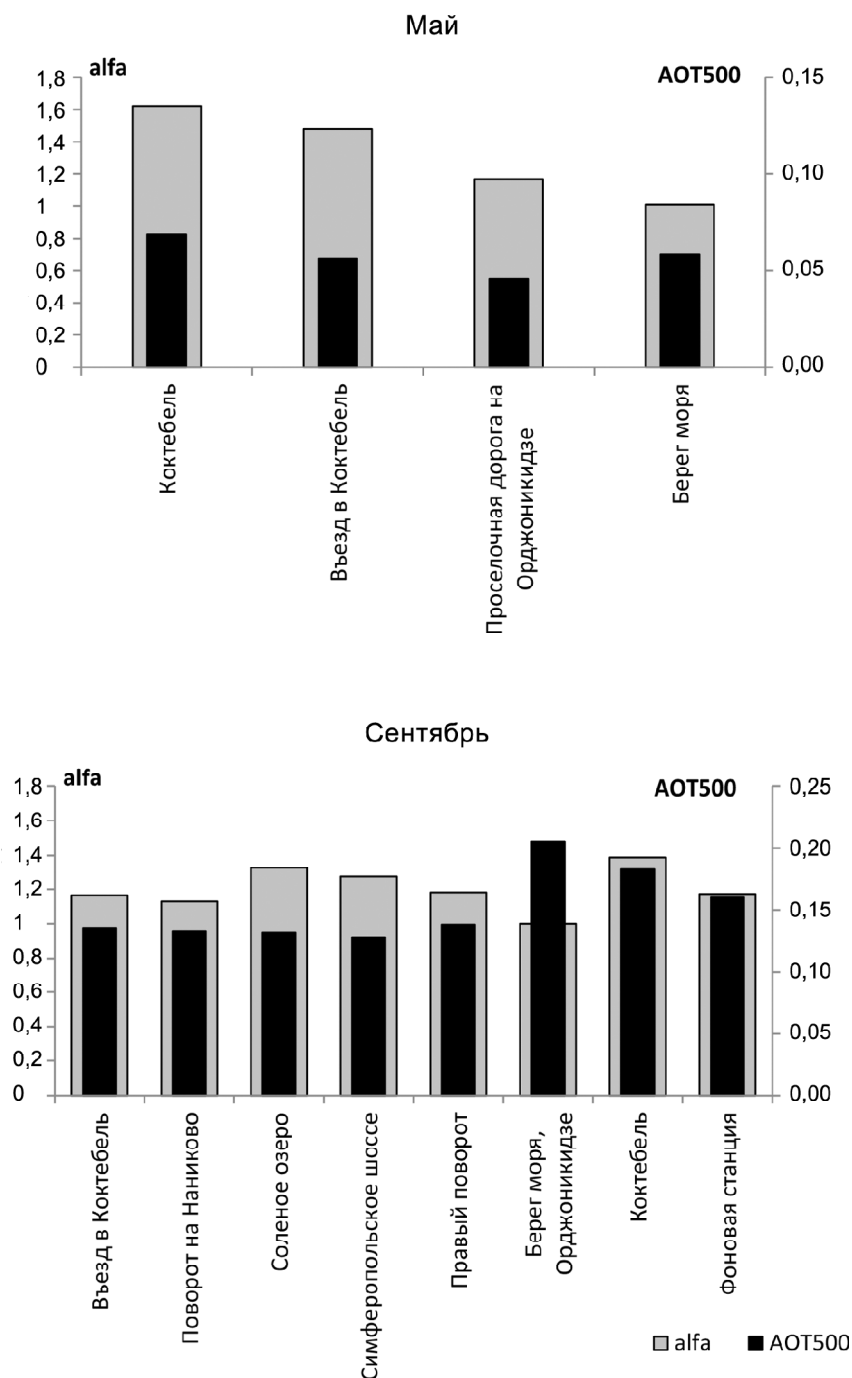


Рис. 6. Вариации АОТ на длине волны 500 нм и волнового экспонента Ангстрема в пунктах наблюдений в период проведения экспериментов

Fig. 6. Variations of AOT at 500 nm wavelength and the Angstrom parameter at observation sites during the periods of the experiments

Рассмотрим изменчивость АОТ500 и волнового экспонента Ангстрема в антропогенных (в поселке Коктебель) и естественных условиях (рис. 6). Если сравнивать измерения АОТ500 в Коктебеле со средними значениями, полученными в фоновых условиях вдали от источников загрязнения, то и весной, и осенью зарегистрировано некоторое превышение АОТ в поселке вдали от берега моря, которое составило около 0,02–0,04 или 20–30%. Отметим, что эта разница выше порога погрешности опреде-

ления АОТ. Также зарегистрировано и увеличение волнового экспонента Ангстрема на 0,1–0,5 по сравнению с фоновыми условиями, что свидетельствует о повышенной концентрации доли мелкодисперсной фракции в поселке по сравнению с измерениями в фоновых условиях. Однако самые высокие значения АОТ500 наблюдались осенью на берегу моря в поселке Орджоникидзе (до 0,2). Там же отмечалось уменьшение волнового экспонента Ангстрема до единицы, что обусловлено повышением concentra-

ции морского гигроскопичного аэрозоля, размеры которого существенно больше по сравнению с континентальным типом аэрозоля и наличие которого ведет к образованию так называемой прибрежной дымки. К сожалению, при измерениях на трассах диск Солнца был закрыт тонкими перистыми облаками, которые препятствовали определению аэрозольных свойств атмосферы.

Оценки пространственной изменчивости солнечного УФ излучения. Поскольку при проведении наблюдений в некоторые дни наблюдалась разорванная облачность, которая за счет процессов рассеяния в значительной степени изменяет поступление солнечной радиации, то были привлечены модельные расчеты для оценки пространственной изменчивости УФ излучения для условий ясного неба. Расчеты проводились в УФ диапазоне спектра с использованием модифицированного программного комплекса TUV (<https://www2.acom.ucar.edu/modeling/tropospheric-ultraviolet-and-visible-tuv-radiation-model>) с применением метода дискретных ординат в 8-ми п потоковом приближении [Chubarova, 2006]. Эритемная УФ радиация была рассчитана для максимальных высот Солнца, характерных для периода проведения экспериментов в мае и сентябре – 65 и 40 градусов соответственно. Профиль озона задавался по модели, типичной для этого региона, с 76%-ным содержанием озона в нижнем километровом слое (относительно его измеренной приземной концентрации) и 28%-ным – в слое 2 км. Выше распределение озона задавалось по стандартному профилю. Профиль АОТ задавался для аэрозоля континентального типа с максимумом в нижнем двухкилометровом слое. Отметим, что неопределенности в задании профилей аэрозоля и озона практически не сказываются на результатах численных экспериментов для набора использованных параметров. Альбеда однократного рассеяния аэрозоля варьировалось в пределах 0,91–0,96. Цель проведения расчетов заключалась в оценке изменчивости солнечного УФ излучения за счет изменений концентраций приземного озона и аэрозоля. Выполненные расчеты показали, что в мае УФ индексы (УФИ), которые вычисляются нормированием эритемной УФ радиации на 0,025, при средних измеренных атмосферных параметрах и при высоте Солнца 65° достигают очень высокой категории (УФИ=8), когда для второго типа кожи происходит образование эритемы (покраснение кожи) менее, чем за полчаса [Vanicek et al., 2000]. В сентябре за счет более низких высот Солнца уровень УФ индексов был примерно в два раза ниже

(УФИ=4,1). Однако и при таком уровне УФ излучение является избыточным и возможно получение эритемы (категория УФ избыточности средней степени).

Численные эксперименты с заданием реальной изменчивости аэрозоля и КПО по экспериментальной территории показали, что в целом изменчивость радиационных потоков за счет вариаций КПО и аэрозоля невелика и составляет около 2% в весенний и 4–6% – в осенний периоды суммарно за счет вариаций КПО и аэрозоля. Проведение дополнительных расчетов выявило, что главным образом вариации УФ радиации определяются изменениями оптических свойств аэрозоля. Для экспериментальных условий изменчивость КПО определяют изменения УФ индексов не более, чем на 1%, а изменчивость АОТ – в пределах 2–5% в зависимости от задания поглощательных свойств атмосферы.

Выводы:

- на основании двух серий мобильных экспериментов, проведенных в разные сезоны года, получены первые оценки пространственных закономерностей КПО и аэрозольных характеристик в районе Карадагской СФЭМ, в рекреационных и подверженных антропогенному загрязнению зонах;

- обнаружены довольно существенные флуктуации КПО (от +15 до –22 мкг/м³) относительно фоновых значений с характерным уменьшением КПО на Симферопольском шоссе при активном автомобильном движении и его фоновые значения при неработающей Керченской переправе. Повышенные КПО наблюдались непосредственно у берега моря;

- аэрозольные характеристики испытывали существенные флуктуации. В городской среде (непосредственно в Коктебеле) АОТ была на 0,02–0,04 выше фоновых значений. Повышенные значения АОТ наблюдались на берегу моря в осенний период года. С ростом антропогенного загрязнения увеличивался волновой показатель Ангстрема (увеличение достигало 0,5 по сравнению с фоновыми условиями) за счет увеличения доли мелкодисперсного аэрозоля. У береговой линии волновой показатель Ангстрема закономерно уменьшался за счет увеличения доли грубодисперсной фракции гидрофильного морского аэрозоля;

- модельные расчеты УФ индексов с учетом КПО и АОТ для различных пунктов показали более важную роль флуктуаций АОТ (до 5%) по сравнению с изменчивостью КПО (до 1%);

- полученные оценки носят предварительный характер и требуют проведения дополнительных экспериментов, в том числе и в другие сезоны года.

Благодарности. Проект выполнен при частичной поддержке гранта РГО «Крымская комплексная экспедиция» (договор № 20/2018-И от 06.07.2018). Численные и экспериментальные оценки влияния аэрозоля на УФ радиацию выполнялись при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-05-00700.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО-РАН, 2010. 376 с.
- Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Чубарова Н.Е. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей PM_{2.5} в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1033–1042.
- Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2015 году» Правительство Москвы, Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, Москва, 2016, <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/63286220/>.
- Звягинцев А.М. Аномалии приземного озона в Европе // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 387–396.
- Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н. Изменчивость приземного озона в окрестностях Москвы: результаты десятилетних регулярных наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 4. С. 486–495.
- Климат Москвы в условиях глобального потепления / Под ред. А.В. Кислова М.: Изд-во Моск. ун-та, 2017, 288 с. ISBN 978-5-19-011227-6
- Кунина И.М. Влияние озона на растения // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Т. 9. С. 44–86.
- Лапченко В.А., Звягинцев А.М. Приземный озон в Крыму // Пространство и время. 2014. № 2(16). С. 254–257.
- Ларин И.К. Химическая физика озонового слоя. М.: ГЕОС, 2013. 160 с.
- Розенталь В.А., Чубарова Н.Е., Изакова О.М., Шараев Г.А. Мониторинг радиационных потоков аппаратно-программным комплексом SUN // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 82–86.
- Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. WHO. 2006. ISBN 92 890 2192 6, 484 p.
- Chubarova N.E. Role of Tropospheric Gases In The Absorption of UV Radiation // Doklady Earth Sciences, Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), 2006. V. 407. № 2. P. 294–297.
- Chubarova N.Y., Sviridenkov M.A., Smirnov A., Holben B.N. Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. № 4. P. 367–378.
- Crutzen P.J. Tropospheric ozone: an overview / Ed. I.S.A. Isaksen Dordrecht: Reidel, 1988. P. 3–22.
- Dickerson R.R., Kondragunta S., Stenchikov G., Civerolo K.L., Doddridge B.G., Holben B.N. The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog // Science. 1997. V. 278. № 5339. P. 827–830.
- Elansky N.F., Belikov I.B., Berezina E.V. et al. Atmospheric Composition Observations over Northern Eurasia using the Mobile Laboratory: TROICA Experiment. ISTC. Moscow, 2009. 72 p. <http://www.ifaran.ru/troica/biblio/troica-en.pdf>.
- Elansky N.F., Lavrova O.V. Minor gases species in the atmosphere of Russian cities from mobile laboratory measurements (TROICA experiments) // Dokl. EarthSci. 2014. V. 459(2). P. 1603–1608.
- Flaum J.B., Rao S.T., Zurbenko I.G. Moderating the influence of meteorological conditions on ambient ozone concentrations // J. Air&Waste Manage. Assoc. 1996. V. 46. P. 35–46.
- Gorai A.K., Tchounwou P. B., Mitra G. Spatial Variation of Ground Level Ozone Concentrations Gargi and its Health Impacts in an Urban Area in India // Aerosol and Air Quality Research. 2017. V. 17. № 4. P. 951–964.
- Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Rem. Sens. Environ. 1998. № 66. P. 1–16.
- Jacob D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton University Press, 1999. 266 p. <http://acmg.seas.harvard.edu/publications/jacobbook/index.html>
- Manning W.J., Godzik B., Musselman R. Potential bioindicator plant species for ambient ozone in forested mountain areas of central Europe // Environ. Pollut. 2002. V.119. № 3. P. 283–290.
- Sadighi K., Coffey E., Polidori A., Feenstra Brandon, Henze D., Hannigan M. Intra-urban spatial variability of surface ozone and carbon dioxide in Riverside, CA: viability and validation of low-cost sensors // Atmos. Meas. Tech. Discuss. <https://doi.org/10.5194/amt-2017-183>
- Solberg S., Bergstroem R., Langner J., Laurila T., Sjoeborg K., Lindskog A. Changes in ozone episodes due to emission reductions: A Nordic study, Norwegian Institute for Air Research: Kjeller. EMEP/CCC-Report 10/2002. 74 p. <http://www.nilu.no>
- Tarasova O.A., Karpetchko A.Yu. Atmospheric chemistry and physics accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozero (Kola Peninsula) // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. P. 941–949.
- Vanicek K., Frei T., Litynska Z., Schmalwieser A. UV-Index for the Public. // Publication of the European Communities, Brussels, Belgium, 2000. http://www.higieneocupacional.com.br/download/uv_index_karel_vanicek.pdf
- Wang Y., Zhang Y., Hao J., Luo M. Seasonal and spatial variability of surface ozone over China: contributions from background and domestic pollution // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 3511–3525.

Поступила в редакцию 15.02.2018

После доработки 29.10.2018

Принята к публикации 06.12.2018

V.A. Lapchenko¹, N.Ye. Chubarova²,
E.Yu. Zhdanova³, V.A. Rozental⁴

SPATIAL VARIABILITY OF GROUND-LEVEL OZONE, AEROSOL AND SOLAR UV RADIATION IN SOUTHEAST CRIMEA

Specific features of spatial distribution of the ground-level ozone and aerosols in the neighborhood of the Karadag background environmental monitoring station were studied, both in the recreational zones and the anthropogenic pollution zones of the southeast Crimea. Significant ground-level ozone fluctuations (from +15 to –22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) were detected relative to background values with a noticeable decrease in ground-level ozone values along the Simferopol highway with intensive traffic and increased ground-level ozone concentrations near the sea shore. The aerosol optical thickness in urban environment (the Koktebel town) was 0.02–0.04 higher than the background values. With the growth of anthropogenic pollution, the increasing Angstrom parameter is observed (up to 0.5 in comparison with background conditions) due to the growth of fine aerosols. Along the shoreline the Angstrom parameter decreases because of the growth of coarse aerosol fraction. Model calculations of radiative transfer, with account of variations in ground-level ozone and aerosol for various points of observations, have shown more important role of aerosol optical thickness fluctuations (up to 5%) in comparison with the changes of ground-level ozone concentrations (up to 1%) for erythemally weighted UV radiation.

Key words: aerosol features, anthropogenic pollution, erythemally weighted UV radiation, UV index, background environmental monitoring station

Acknowledgements. The project was partly financially supported by the Russian Geographical Society (The Crimean Complex Expedition, № 20/2018-II of 06.07.2018). Numerical and experimental estimates of the aerosol impact on UV radiation were partly financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 18-05-00700).

REFERENCES

- Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. WHO. 2006. ISBN 92-890-2192-6. 484 p.
- Belan B.D. Ozon v troposfere. [Ozone in the troposphere]. Tomsk: IOA SO RAN. 2010. 376 p. (In Russian)
- Chubarova N.E. Role of Tropospheric Gases In The Absorption of UV Radiation // *Doklady Earth Sciences*, Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation). 2006. V. 407. № 2. P. 294–297.
- Chubarova N.Y., Sviridenkov M.A., Smirnov A., Holben B.N. Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2011. № 4. P. 367–378.
- Crutzen P.J. Tropospheric ozone: an overview / Ed. I.S.A. Isaksen Dordrecht: Reidel, 1988. P. 3–22.
- Dickerson R.R., Kondragunta S., Stenchikov G., Civerolo K.L., Doddridge B.G., Holben B.N. The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog // *Science*. 1997. V. 278. № 5339. P. 827–830.
- Elansky N.F., Belikov I.B., Berezina E.V. et al. Atmospheric Composition Observations over Northern Eurasia using the Mobile Laboratory: TROICA Experiment. ISTC. Moscow, 2009. 72 p. <http://www.ifaran.ru/troica/biblio/troica-en.pdf>.
- Elansky N.F., Lavrova O.V. Minor gases species in the atmosphere of Russian cities from mobile laboratory measurements (TROICA experiments) // *Dokl. Earth Sci.* 2014. V. 459(2). P. 1603–1608.
- Flaum J.B., Rao S.T., Zurbenko I.G. Moderating the influence of meteorological conditions on ambient ozone concentrations // *J. Air&Waste Manage. Assoc.* 1996. V. 46. P. 35–46.
- Gorai A.K., Tchounwou P.B., Mitra G. Spatial Variation of Ground Level Ozone Concentrations Gargi and its Health Impacts in an Urban Area in India // *Aerosol and Air Quality Research*. 2017. V. 17. № 4. P. 951–964.
- Gubanova D.P., Belikov I.B., Elanskij N.F., Skorohod A.I., Chubarova N.E. Izmenchivost' prizemnoj koncentracii ajerozolej PM2.5 v g. Moskve po nabljudenijam v Meteorologicheskoy observatorii MGU. [Variability of surface concentrations of PM2.5 aerosols in Moscow according to observations at the MSU Meteorological Observatory] // *Atmospheric and ocean optics*. 2017. V. 30. № 12. P. 1033–1042. (In Russian)
- Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Rem. Sens. Environ.* 1998. № 66. P. 1–16.

¹ Karadag Nature Reserve, Russian Academy of Sciences, Research Scientist; *e-mail*: ozon.karadag@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail*: natalia.chubarova@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail*: ekaterinazhdanova214@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Meteorology and Climatology, engineer; *e-mail*: vandttqq@list.ru

Jacob D.J. Introduction to Atmospheric Chemistry. Princeton University Press, 1999. 266 p. <http://acmg.seas.harvard.edu/publications/jacobbook/index.html>

Klimat Moskvy v uslovijah global'nogo potepnenija [Climate of Moscow under global warming] / Ed. A.V. Kislov. Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta Moskva. ISBN 978-5-19-011227-6. 2017. 288 p. (In Russian)

Kunina I.M. Vlijanie ozona na rastenija [Influence of ozone on plants]. – In: Problemy jekologicheskogo monitoringa i modelirovanija jekosistem [Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modeling]. L.: Gidrometeoizdat. 1986. V. 9. P. 44–86. (In Russian)

Lapchenko V.A., Zvjagincev A.M. Prizemnyj ozon v Krymu [Ground-level ozone in Crimea] // Prostranstvo i vremja. 2014. V. 2(16). P. 254–257. (In Russian)

Larin I.K. Himicheskaja fizika ozonovogo sloja [Chemical Physics of the Ozone Layer]. M.: GEOS, 2013. 160 p. (In Russian)

Manning W.J., Godzik B., Musselman R. Potential bioindicator plant species for ambient ozone in forested mountain areas of central Europe // Environ. Pollut. 2002. V. 119. № 3. P. 283–290.

Report «O sostojanii okruzhajushhej sredy v gorode Moskve v 2015 godu» [On the state of nature environment in Moscow in 2015], Moscow Government, Department of Nature Management and Environmental Protection of Moscow. Moscow. 2016. <https://www.mos.ru/eco/documents/doklady/view/63286220/> (In Russian)

Rozental' V.A., Chubarova N.E., Izakova O.M., Sharaev G.A. Monitoring radiacionnyh potokov apparatno-programmym kompleksom SUN [Monitoring of radiation in the atmosphere by SUN software] // Atmospheric and ocean optics. 1999. V. 12. № 1. P. 82–86. (In Russian)

Sadighi K., Coffey E., Polidori A., Feenstra Brandon, Henze D., Hannigan M. Intra-urban spatial variability of surface ozone and carbon dioxide in Riverside, CA: viability and validation of low-cost sensors // Atmos. Meas. Tech. Discuss. <https://doi.org/10.5194/amt-2017-183>

Solberg S., Bergstroem R., Langner J., Laurila T., Sjoeborg K., Lindskog A. Changes in ozone episodes due to emission reductions: A Nordic study, Norwegian Institute for Air Research: Kjeller. EMEP/CCC-Report 10/2002. 74 p. <http://www.nilu.no>

Tarasova O.A., Karpetchko A.Yu. Atmospheric chemistry and physics accounting for local meteorological effects in the ozone time-series of Lovozero (Kola Peninsula) // Atmos. Chem. Phys. 2003. V. 3. P. 941–949.

Vanicek K., Frei T., Litynska Z., Schmalwieser A. UV-Index for the Public. // Publication of the European Communities, Brussels, Belgium, 2000. http://www.higieneocupacional.com.br/download/uv_index_karel_vanicek.pdf

Wang Y., Zhang Y., Hao J., Luo M. Seasonal and spatial variability of surface ozone over China: contributions from background and domestic pollution // Atmos. Chem. Phys. 2011. V. 11. P. 3511–3525.

Zvjagincev A.M. Anomalii prizemnogo ozona v Evrope [Anomalies of ground-level ozone in Europe] // Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2004. V. 40. № 3. P. 387–396. (In Russian)

Zvjagincev A.M., Kuznecova I.N. Izmenchivost' prizemnogo ozona v okrestnostjah Moskvy: rezul'taty desjatiletnih reguljarnyh nabljudenij [Variability of ground-level ozone in the vicinity of Moscow: results of decade-long regular observations] // Izvestija RAN. Fizika atmosfery i okeana. 2002. V. 38. № 4. P. 486–495. (In Russian)

Received 15.02.2018

Revised 29.10.2018

Accepted 06.12.2018