———— ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ——

## ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ МЕР ВО ВРЕМЯ ПАНДЕМИИ COVID-19 НА АЭРОЗОЛЬНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

© 2021 г. О. Б. Поповичева<sup>*a*,\*</sup>, М. А. Чичаева<sup>*a*,\*\*</sup>, Н. С. Касимов<sup>*a*,\*\*\*</sup>

<sup>а</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: olga.popovicheva@gmail.com

\*\*E-mail: machichaeva@gmail.com

\*\*\*E-mail: nskasimov@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2021 г. После доработки 24.01.2021 г. Принята к публикации 05.02.2021 г.

Пандемия COVID-19 привела к введению режима самоизоляции и приостановке деловой активности во всём мире. В статье на основе измерений концентраций индикатора аэрозольных эмиссий продуктов сжигания топлива – чёрного углерода – показано значительное влияние снижения экономической деятельности населения на загрязнение атмосферы Москвы. Уменьшение интенсивности потока транспорта и изменение режима работы промышленных и теплоэнергетических предприятий города в период ограничительных мер весной 2020 г. определяется по динамике суточного и недельного хода чёрного углерода. Снижение доли сжигания природного топлива в это время коррелирует с увеличенным вкладом сжигания биомасс в жилом секторе и во время сельскохозяйственных пожаров вокруг мегаполиса. Наблюдаются изменения интенсивности и направления источников высоких концентраций чёрного углерода в период восстановления экономической активности летом 2020 г. Уменьшение концентраций чёрного углерода и мелкодисперсных частиц размером менее 2.5 мкм (PM2.5) в городской атмосфере отражает спад экономической активности, улучшение качества воздуха и условий для сохранения здоровья населения Москвы в период пандемии COVID-19.

*Ключевые слова*: COVID-19, Москва, самоизоляция, ограничительные меры, транспортный поток, загрязнение атмосферы, качество воздуха, концентрация чёрного углерода, PM2.5 и PM10.

DOI: 10.31857/S0869587321040083

Во второй половине XX в. ответом на экономический рост во всём мире стало повышение концентрации загрязняющих веществ в атмосфере [1] и, как следствие, увеличение экологического ущерба [2]. Вклад хозяйственной деятельности человека в этот процесс, включая эмиссии авто-



ПОПОВИЧЕВА Ольга Борисовна — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова. ЧИЧАЕВА Марина Александровна — кандидат физикоматематических наук, младший научный сотрудник географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. КАСИ-МОВ Николай Сергеевич — академик РАН, президент географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, заведующий кафедрой геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Таблица 1. Стандарты качества воздуха и нормативы ПДК (мкг/м<sup>3</sup>), принятые ВОЗ, Американским агентством по защите окружающей среды (ЕРА), Евросоюзом (ЕС) и РФ

	Период	BO3	EPA	EC	РΦ*
PM2.5	ежегодно среднее	10	12	25	25
	суточные	25	35		25
PM10	ежегодно среднее	20	_	40	40
	суточные	50	150	50	60

\*Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений".

транспорта, теплоэнергетики, промышленных объектов, уже превысил вклад природных источников — пожаров и пылевых бурь.

Загрязнение городской атмосферы. Сейчас качество воздуха определяется массовыми концентрациями наиболее опасных газообразных загрязнителей CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> и мелкодисперсных частиц размером менее 10 мкм (РМ10)<sup>1</sup>. Химический состав РМ10 определяется антропогенными и природными источниками. Особое внимание уделяется мельчайшей вдыхаемой фракции аэрозолей размером менее 2.5 мк (РМ2.5), формирующейся в эмиссиях первичных источников (транспорта, промышленности, строительства, дорожной пыли, пожаров) и образующихся в атмосфере в результате фотохимических реакций газообразных выбросов SO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> теплоэлектростанциями и двигателями внутреннего сгорания. Высокие концентрации РМ2.5 вызывают токсичное воздействие на организм человека, обострение астмы, рак лёгких и сердечно-лёгочные заболевания [3, 4]. В связи с этим Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и агентствами по защите окружающей среды в разных странах введены предельно допустимые концентрации для усреднённого за год и суточного содержания РМ10 и PM2.5 в воздухе (табл. 1). Самыми загрязнёнными считаются мегаполисы с уровнем РМ2.5, превосходящим 89 мкг/м<sup>3</sup>, самыми чистыми – с ежегодным средним значением PM2.5 менее 10 мкг/м<sup>3</sup> [5].

Чёрный углерод (black carbon – BC) – продукт неполного сжигания природного ископаемого топлива в транспортных двигателях, теплоэнергетических установках и горения биомасс в жилом секторе, в дымах сельскохозяйственных и лесных пожаров. Он формируется в виде агломератов размером 100–200 нм, состоящих из наночастиц диаметром 20–50 нм (рис. 1, *a*). Глобальные антропогенные выбросы чёрного углерода оцениваются примерно в 7.2 Тг (тераграмма) в год и составляют ~15% от массовой концентрации PM2.5, для транспортного сектора эта величина достигает 50% [6]. Антропогенное влияние города идентифицируется по характерному суточному ходу чёрного углерода, отражающему изменчивость интенсивности эмиссий продуктов сжигания в соответствии с режимом работы предприятий и потоком транспорта [7]. В процессе сжигания топлива формируется уникальная структура микрокристаллитов графита (рис. 1,  $\delta$ ), благодаря которой чёрный углерод остаётся единственным компонентом аэрозолей, хорошо поглощающим солнечное излучение и определяющим радиационный баланс атмосферы и климат.

Чёрный углерод – наиболее опасный и токсичный компонент PM2.5 с точки зрения влияния на здоровье населения эмиссий продуктов сжигания по сравнению с другими источниками. В крупных городах увеличивается риск хронических и респираторных заболеваний из-за высокой степени загрязнения воздуха чёрным углеродом от выхлопов автомобильных двигателей [8]. Эмиссии сжигания ископаемого топлива – самая значительная экологическая угроза для здоровья детей во всём мире [9]. Благодаря ряду характерных свойств чёрный углерод сегодня относят к важнейшим индикаторам воздействия на здоровье людей и окружающую среду [8]. Массовая его концентрация принята мировыми агентствами охраны окружающей среды как характеристика непрерывного мониторинга степени аэрозольного загрязнения атмосферы [10].

Москва – один из крупнейших мегаполисов мира с высокой плотностью населения, развитой транспортной, теплоэнергетической и промышленной инфраструктурой, использующей природные топлива (газ, дизель, бензин), что сопровождается большими объёмами выбросов аэрозольных загрязнений в атмосферу. В столице зарегистрировано около 630 промышленных предприятий различных отраслей машиностроения и металлообработки, энергетики, химии и нефтехимии, лёгкой и пищевой промышленности, строительной индустрии. Около 50% загрязняющих веществ выбрасывается предприятиями, производящими и перераспределяющими энергию, газ и воду. Зоны промышленного производства занимают около 17% площади города, 14 крупнейших предприятий обеспечивают до 85% валового загрязнения от стационарных источников [11]. В обшем объёме промышленных выбросов преобладают перерабатывающие производства и предприятия распределения электроэнергии, на долю газа приходится 96.7% потребления топлива. В Москве функционирует система центрального отопления, биомасса для отопления помещений не используется, в отличие от крупных городов Китая и Европы [12,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> РМ (от англ. *particulate matter*) – твёрдые частицы.



**Рис. 1.** Структура микрочастиц чёрного углерода: агломераты в эмиссии дизельного двигателя автомобильного транспорта [33] (*a*), внутренняя структура микрокристаллитов графита [35] (*б*)

13]. Считается, что сжигание биомасс вносит малую долю в загрязнение атмосферы города.

В 2019 г. среднегодовые концентрации РМ10 и транспортные выбросы в столице составили 0.8 ПДК (см. табл. 1) и до 93% валового загрязнения [14]. Анализ динамики основных загрязнителей, определявших качество воздуха в 2005-2014 гг., показал, что Москва сопоставима по этому показателю с городами Европы [15]. Однако в РФ до сих пор не принята методика мониторинга продуктов сжигания в атмосфере, отсутствуют нормативы ПДК для чёрного углерода. Измерения его массовых концентраций проводятся только с научными целями [16, 17]. В августе 2010 г. во время экстремальных загрязнений дымовыми эмиссиями пожаров вокруг Московского мегаполиса были зарегистрированы аномально высокие концентрации РМ10 и чёрного углерода, в 34 раза превосходящие ПДК по нормативам ЕС (см. табл. 1) и в 7 раз – уровень ПДК в нормальный период [18].

Состояние окружающей среды во время пандемии. Пандемия COVID-19, объявленная ВОЗ 11 марта 2019 г., оказала значительное воздействие на здоровье населения и экономическую деятельность во всём мире. Во многих странах были введены режим самоизоляции, ряд мер, ограничивающих экономическую активность, движение транспорта. Стало очевидно, что последствия пандемии – это беспрецедентный по масштабам эксперимент по количественной оценке воздействия коллективных мер реагирования на состояние окружающей среды, включая качество воздуха в городе. Анализ данных о глобальном качестве воздуха показал значительное уменьшение концентраций оксидов NO<sub>2</sub> и CO, доминирующих в выбросах двигателей внутреннего сгорания автомобильного транспорта, по сравнению с уровнем 2019 г. [19]. В городах Европы зарегистрировано уменьшение выбросов CO<sub>2</sub> от 8 до 75% (https://www.icosср.eu/event/933) и NO2 до 62% [20]. Снижение атмосферных концентраций первичных загрязнителей (NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, летучих органических компонентов) привело к изменению в концентрациях озона вторичных органических аэрозолей в зависимости от метеорологических условий региона [21]. Предполагалось, что снижение экономической деятельности приведёт и к существенному сокращению РМ2.5 в аэрозольной нагрузке атмосферы. Однако измерения, проведённые в крупнейших городах мира, показали различные уровни падения массовых концентраций PM2.5 от максимального – на 35% [20] до отсутствия каких-либо изменений [22] из-за неоднозначной зависимости протекания процессов трансформации эмиссий первичных источников в атмосфере.

Чёрный углерод как непосредственный продукт сжигания топлива стал одним из наиболее значимых показателей влияния изменений потоков транспорта и промышленного производства на окружающую среду во время пандемии. По данным наблюдений 17 европейских станций, эмиссия чёрного углерода в Европе упала на 11% по сравнению с тем же периодом в предыдущие годы [23]. Значительные временные изменения концентрации чёрного углерода произошли в странах, которые ввели самые строгие ограничительные меры. В крупных городах его средняя концентрация во время карантина упала на 35-47% по сравнению с периодом до эпидемии [24, 25]. Снижение концентрации индикаторов первичных эмиссий транспорта – числа мелкодисперсных частиц и чёрного углерода, зарегистрированное на дорогах разного класса интенсивности движения, достигало 60-68% и 22-46% соответственно [26]. Самая высокая эмиссия чёрного углерода наблюдалась весной 2020 г. в жилом секторе городов за



**Рис. 2.** Число зарегистрированных случаев заболеваний COVID-19 с апреля по август 2020 г. в Москве

счёт интенсивного сжигания биомасс во время низкой температуры воздуха [23].

В Москве число зарегистрированных случаев заболеваний COVID-19 с апреля по июнь 2020 г. увеличивалось, но к концу лета ситуация стабилизировалась (https://www.rospotrebnadzor.ru/region/korono virus/epid.php) (рис. 2). Ограничительные меры в период пандемии повлияли на интенсивность хозяйственной деятельности мегаполиса. Карантин длился с 26 марта по 12 мая, после чего ряд предприятий получил разрешение на работу. С 1 июня в Москве началось ослабление строгих ограничений для передвижения и работы населения. 1 июня закончился период ограничительных мер и начался период восстановления. К 18 июня деловая активность вернулась в прежнее русло, и к концу лета жизнедеятельность в городе нормализовалась. Оценки изменений концентрации газообразных загрязнителей СО, NO<sub>2</sub>, NO и PM10, по данным Мосэкомониторинга, зафиксированы в работе [27], где представлены результаты анализа аэрозольного загрязнения атмосферы Московского мегаполиса во время пандемии COVID-19 на основе измерений важнейших индикаторов опасного воздействия на окружающую среду и здоровье людей – чёрного углерода и массовой концентрации РМ2.5. Показано влияние падения экономической активности и интенсивности потока транспорта в период ограничительных мер весной 2020 г. и последующего увеличения активности в восстановительный период летом 2020 г. на изменение массовой концентрации чёрного углерода, его суточного и недельного хода и направления источников высоких концентраций.

Методика измерений аэрозольного загрязнения. Измерения аэрозольной нагрузки атмосферы и метеопараметров проводились на юго-западе Москвы, в Метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова, которая расположена вдали от крупных предприятий и автомагистралей, а значит, может характеризовать условно фоновое состояние городской среды. Основные этапы сбора и анализа данных представлены на рисунке 3. Массовая концентрация РМ10 определялась с помощью оптического счётчика числа частиц TSI ОРС после калибровки с ТЕОМ 1405 (Thermo Fisher Scientific, USA). Выделялась вдыхаемая фракция частиц размером менее 2.5 мк (РМ2.5) и пылевая фракция наиболее крупных частиц размером от 2.5 до 10 мк (РМ2.5-10). Измерения оптических свойств аэрозолей проводились с помощью аэталометра AE33 (Magee Scientific, USA) на семи длинах волн в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного. Массовая концентрация чёрного углерода определялась по изменению ослабления излучения на длине волны 880 нм. По разнице спектрального поглошения эмиссий высокотемпературного сжигания природного топлива (fosiel fuel – FF) в двигателях и низкотемпературного горения биомасс (biomass burning – ВВ) в зависимости от длины волны оценивался вклад, определяемый процентной долей FF% и ВВ% на основе модели [28]. Данные о концентрации чёрного углерода и направлении ветра в виде розы загрязнений позволили выявить расположение локальных источников максимальных концентраций ВС. Региональное распределение источников сжигания биомасс (пожаров) вокруг Московского мегаполиса определялось путём соотношения рассчитываемых траекторий переноса воздушных масс за весь период к концентрации чёрного углерода в момент их попадания в точку наблюдений [29]. Для расчётов был использован массив обратных траекторий переноса воздушных масс с шагом 48 ч назад на высоте 500 м, полученный на основе модели



Рис. 3. Сбор и анализ данных аэрозольной нагрузки атмосферы в период пандемии COVID-2019

HYSPLYT и архивных метеорологических данных GDAS (http://www.arl.noaa.gov/ready).

Изменения массовой концентрации чёрного углерода во время пандемии. В период ограничительных мер наблюдались низкие значения чёрного углерода — в среднем  $0.95 \pm 0.7$  нг/м<sup>3</sup> (табл. 2), минимальное — ~48 нг/м<sup>3</sup>. В период восстановления его концентрация существенно возросла и составила  $1.6 \pm 1.4$  нг/м<sup>3</sup>, максимальные значения достигали ~13.6 мкг/м<sup>3</sup>. Изменения средних концентраций в эти промежутки показаны на рисунке 4. При переходе от одного периода к другому произошло значительное увеличение средней концентрации чёрного углерода, что на 75% связано с возобновлением потока автомобильного транспорта и экономической деятельности в Москве. Во время ограничительных мер после 12 мая, когда ряд предприятий получил разрешение на работу, средняя концентрация чёрного углерода увеличилась на 22%. Эти цифры хорошо согласовывались с данными ресурса ТотТот, предоставлявшего статистическую информацию о загруженности дорог (https:// www.tomtom.com/en\_gb/traffic-index/moscow-traffic).

В Москве в период ограничений (15 апреля – 1 июня 2020 г.) среднесуточный уровень загруженности дорог составлял от 2 до 20%, в период восстановления экономической активности (1 июня — 31 августа 2020 г.) он вырос в будни до 36-72%, а в выходные — до 40-45%.

При переходе от периода ограничительных мер к периоду восстановления увеличилась процентная доля сжигания природного топлива (FF%) с 79 до 87% (см. рис. 4), что указывало на рост его потребления при восстановлении интенсивности движения транспорта, работы энергетического и промышленного секторов. Компонент чёрного углерода, определяемый сжиганием биомасс, непосредственно не связан с экономической активностью. Он показывает обратную тенденцию: высокая процентная доля сжигания биомасс ВВ% (~20%) наблюдалась именно в период ограничительных мер (см. рис. 4). Так как в Москве в системе отопления не используется биомасса, источники её сжигания следует искать в выбросах мусоросжигательных заводов и среди эмиссий сжигания мусора и древесины в жилом секторе Московской области. Во время наиболее строгой самоизоляции значительная часть москвичей вынужденно переезжала за город и проживала на дачах в Московской области, где широко распространено сжигание биомасс для отопления домов и при уборке мусора. Период ограничений вклю-

Таблица 2. Средние и среднеквадратичные ошибки массовой концентрации чёрного углерода (ВС), РМ10, РМ2.5 и РМ2.5–10, доли сжигания природного топлива FF%, биомасс BB% и метеопараметров в период ограничительных мер и в период восстановления. Метеопараметры: температура (Т), скорость ветра (WS) и осадки

Характеристика	Период ограничительных	Период восстановления				
	мер					
	ВС и РМ					
BC, мкг/м <sup>3</sup>	$0.9\pm0.7$	$1.6 \pm 1.4$				
РМ2.5, мкг/м <sup>3</sup>	$3.5 \pm 2.7$	$5.1 \pm 3.0$				
РМ2.5—10, мкг/м <sup>3</sup>	$12.4 \pm 8.1$	$11.2 \pm 7.0$				
РМ10, мкг/м <sup>3</sup>	$16 \pm 10$	$16.3\pm9.3$				
Доля сжигаемого топлива и биомасс						
FF%	$79.5\pm9.9$	$86.8\pm3.8$				
BB%	$20.5\pm9.9$	$13.2\pm3.8$				
Метеопараметры						
<i>T</i> , °	$8.3\pm4.6$	$18.5 \pm 3.5$				
WS, м/с	$2.0\pm0.8$	$1.7\pm0.6$				
осадки, мм	$4.3\pm7.0$	3.9 ± 8				

чал праздники 1 и 9 мая, во время которых отмечалась особенно высокая доля населения, проживавшего за городом.

Так как эпидемия COVID-19 совпала с весенним сезоном сельскохозяйственных опалов вокруг Москвы, шлейфы дымов от пожаров могли вносить вклад в состав аэрозолей городской среды, как это было установлено весной 2017 г. [30]. В период восстановления хозяйственной активности населения с 1 июня наблюдалось уменьшение объёма сжигания биомасс в среднем до 13%, в дальнейшем это значение не менялось. По-видимому, данный уровень соответствует загрязнению городской среды г. Москвы эмиссиями сжигания биомасс в летний сезон.

Влияние ограничительных мер на изменение суточного и недельного хода концентрации чёрного углерода. Суточный ход концентрации аэрозолей зависит от высоты пограничного слоя атмосферы, определяемой процессами нагрева, смешения и фотохимической активности, а также изменчивостью эмиссий источников. Во время ограничительных мер в Москве суточный ход ВС значительно отличался от периода восстановления более низкими ежечасно усреднёнными значениями и пологой динамикой с отсутствием утреннего максимума (рис. 5). Такой суточный ход сформировался из-за низкой интенсивности движения транспорта и умеренной экономической активности города, в отличие от типичного для крупных городов хода в весенне-летнее время, когда в утренние часы наблюдается максимум концентрации чёрного углерода из-за роста интенсивности движения транспортных средств и максимума энергетической нагрузки [7, 31]. При этом в ночные часы его уровень поднимался до 1.4 мкг/м<sup>3</sup>, подобно измеренному сотрудниками Метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова весной 2017-2018 гг. [30]. Так как в выхлопах дизельных двигателей содержание чёрного углерода гораздо больше, чем у работающих на бензине, его высокий уровень в ночное время — это результат особенностей регулирования грузоперевозок в Москве, где днём въезд большегрузных автомобилей в центр города ограничен. Подобный суточный ход с высокими ночными концентрациями наблюдается в городах с регулируемым потоком грузового транспорта, которому разрешён проезд только в ночное время [32]. Во время восстановления экономической деятельности наблюдалось значительное увеличение концентрации чёрного углерода в любое время суток и изменение формы суточного хода. Восстановление хозяйственной активности привело к типичному для урбанизированной среды стабильно высокому уровню загрязнения эмиссиями продуктов сжигания топлива ночью и утром.

В период ограничительных мер характер суточного хода для доли сжигания биомасс отличался длительным дневным максимумом (см. рис. 5), который в весеннее время со средней температурой воздуха около 8° (см. табл. 2) соответствовал хозяйственной деятельности населения по интенсивному сжиганию мусора и обогреву загородных домов. Летом, в период восстановления, среднесуточная температура увеличилась до 18°, процент сжигания биомасс упал и суточный ход выровнялся.

Недельный ход концентрации чёрного углерода во время ограничений демонстрирует самый низкий уровень в середине недели и его увеличение к выходным дням (см. рис. 5), как это можно было бы ожидать в ситуации длительных нерабочих дней периода значительных ограничений рабочей активности городского населения. Восстановление экономической активности изменило недельный ход чёрного углерода: его высокие концентрации сместились на рабочие дни, что характерно для нормальной жизнедеятельности города. Пологий недельный ход ВС в период восстановления характерен для времени летних отпусков значительной части населения, когда практически отсутствует



**Рис. 4.** Средние массовые концентрации чёрного углерода (ВС), доли сжигания биомасс BB% и природного топлива FF%; средние массовые концентрации PM2.5, PM2.5–10 и PM10 в период ограничительных мер и в период восстановления. Показаны изменения в процентах за период восстановления по отношению к периоду ограничительных мер

разница в эмиссиях транспорта и предприятий между рабочими и выходными днями.

Изменения направления источников высоких концентраций чёрного углерода в период пандемии. Розы загрязнений чёрного углерода показывают, что во время ограничительных мер его концентрация редко превышала 3 мкг/м<sup>3</sup>, до 7 мая источники высоких концентраций – более 4 мкг/м<sup>3</sup> – находились на юго-западе от Метеорологической обсерватории МГУ, где в четырёх километрах располагается промышленная зона "Очаково" и крупнейшая ТЭЦ-25 (рис. 6). После отключения центрального отопления направление регистрации наиболее высоких концентраций изменилось на северо-западное - со стороны промзоны "Фили". В восстановительный период произошло увеличение концентрации чёрного углерода до 5-6 мкг/м<sup>3</sup> в направлении источника на юго-западе со стороны промзоны "Очаково", а также на юго-востоке, где располагаются наиболее близкие к обсерватории объекты ТЭЦ-20 и компании "АБЗ ПК Вираж" – Асфальтобетон Москвы.

В период ограничительных мер зарегистрирована максимальная величина доли сжигания биомасс (~20%) в направлениях северо-восточного и северо-западного ветров (см. рис. 6). Потенциальным источником мог быть крупнейший в Москве мусоросжигательный Спецзавод № 2, расположенный в промзоне Северо-западного административного округа, который перерабатывает до 160 тыс. т мусора в год. Большой вклад могли вносить другие источники, связанные с переносом воздушных масс из Московской области с плотной жилой застройкой посёлков и дачных участков, где древесина широко используется при отоплении домов и сжигается при уборке мусора.

В апреле-мае вокруг Москвы значительный вклад в аэрозольную нагрузку атмосферы вносят дымовые эмиссии сельскохозяйственных пожаров (опалов) [34]. В 2020 г. в этот период спутниковые данные аномального теплового свечения показали высокую пожарную активность в Московском регионе. На рисунке 7 представлено региональное распределение источников сжигания биомасс (пожаров) вокруг Москвы, определяющих долю ВВ% во время ограничительных мер и в период восстановления. Самые высокие концентрации источников дымовых эмиссий обнаружены на севере от Москвы. В ходе восстановительного периода, длившегося всё лето, максимальная доля ВВ% не превышала 14%, значительных источников сжигания биомасс не наблюдалось (см. рис. 7). В это время по спутниковым данным лесные пожары были зарегистрированы только южнее Москвы.

Изменения массовой концентрации РМ в период пандемии. Анализ суточного хода массовой концентрации РМ2.5, проведённый сотрудниками



**Рис. 5.** Суточный (*a*) и недельный ( $\delta$ ) ход массовой концентрации чёрного углерода (BC) и доли сжигания биомасс BB% в период ограничительных мер (ПОМ) и в период восстановления (ПВ)

Метеорологической обсерватории МГУ с 2011 по 2013 г., указывает на общие антропогенные источники наиболее опасных газообразных загрязнителей атмосферы и первичных аэрозолей [34]. Значения массовых концентраций РМ10 были в 1.5-2 раза выше, чем РМ2.5, что определялось существенным вкладом в общую массу крупной пылевой фракции и частиц почвы в диапазоне от 2.5 до 10 мк (РМ2.5-10). В период строгих ограничений до 1 июня 2020 г. Метеорологической обсерваторией зарегистрировано низкое значение массовой концентрации РМ2.5 – в среднем  $3.5 \pm 1.7$  нг/м<sup>3</sup> (см. табл. 2), которое выросло на 43% в восстановительный период (см. рис. 4). Рост загрязнения атмосферы мелкодисперсными частицами при восстановлении экономической активности указывал на ухудшение качества воздуха в мегаполисе. Такой же тренд наблюдался при восстановлении промышленного производства и активности автомобильных перевозок в Москве после кризиса 2008–2009 гг. [34]. Доля чёрного углерода в РМ2.5 во время ограничений составила  $33 \pm 2\%$ , заметного изменения соотношения ВС к РМ2.5 в период восстановления не произошло.

Динамика изменения массовой концентрации более крупной пылевой фракции PM2.5—10 в период пандемии оказалась противоположной PM2.5 (см. табл. 2). Её увеличение во время ограничений продемонстрировало наиболее значимое для весеннего периода аэрозольное загрязнение атмосферы от подстилающей поверхности после схода снежного покрова и начавшегося процесса пыления почв. С 1 по 18 июня, во время максимальных осадков, достигших 7.5 мм (см. табл. 1), наблюдалась самая низкая концентрация PM2.5–10 – в среднем 7.8 ± 4.2 нг/м<sup>3</sup> – в результате вымывания с дождём из атмосферы крупных частиц.

В период строгих ограничений до 1 июня 2020 г. средняя массовая концентрация PM10 находилась на уровне  $16 \pm 10$  нг/м<sup>3</sup>, в период восстановления изменений не зарегистрировано. Можно сделать вывод, что массовая концентрация PM10 в наименьшей степени идентифицирует изменения хозяйственной активности населения города.

## \* \* \*

Во время пандемии COVID-19 весной 2020 г. введение строгих мер ограничений и самоизоляции привело к улучшению экологического состояния атмосферы Москвы по сравнению с последующим летним периодом. Чёрный углерод в эмиссиях сжигания топлив, используемых транспортом и предприятиями города, оказался эффективным показателем уменьшения аэрозольной нагрузки атмосферы и выбросов опас-



**Рис. 6.** Розы загрязнений чёрным углеродом (ВС) и доли сжигания биомасс ВВ% в период ограничительных мер (ПОМ) и в период восстановления (ПВ) (*a*); расположение ближайших к Московской обсерватории МГУ промышленных зон и объектов топливно-энергетического сектора (ТЭЦ, ТС, котельных), нефтеперерабатывающего и мусоросжигательных заводов (*б*)



**Рис.** 7. Региональное распределение доли BB% сжигания биомасс (пожаров) вокруг Москвы в период ограничительных мер (a) и в период восстановления  $(\delta)$ 

ных токсических веществ в атмосферу. Уменьшение потока автотранспорта привело к низким значениям концентрации чёрного углерода и пологой динамике его суточного хода из-за пониженной энергетической нагрузки в утренние часы. Изменение режима работы предприятий отразилось на перераспределении интенсивностей эмиссий от рабочих к выходным дням. Доля сжигания биомасс превысила летний уровень нормальной жизнедеятельности региона за счёт увеличенных эмиссий сжигания мусора и древесины в жилом секторе Московской области и сезонных сельскохозяйственных пожаров. В период восстановления экономической активности летом 2020 г. увеличилась интенсивность и изменилось направление источников высоких концентраций чёрного углерода со стороны крупных промзон и предприятий ТЭЦ. Существенно возросла массовая концентрация РМ2.5 вдыхаемой фракции аэрозолей, около 30% которой составил наиболее опасный и токсичный компонент — чёрный углерод. Экспериментальное изучение краткосрочных изменений состояния атмосферы при быстром экстремальном падении и последующем восстановлении экономической активности позволяет лучше понять процессы, происходящие в системе экономика—общество—окружающая среда больших городов.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Цикл атмосферных измерений выполнен при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 19-77-30004. Авторы признательны Русскому географическому обществу (договор 08/07-2020-Мо) за поддержу проведения анализа полученных данных.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Carrington G., Stephenson J.* The politics of energy scenarios: Are International Energy Agency and other conservative projections hampering the renewable energy transition? // Energy research & social science. 2018. V. 46. № 12. P. 103–113.
- Onafowora O.A., Owoye O. Bounds testing approach to analysis of the environment Kuznets curve hypothesis // Energy Economics. 2014. V. 44. № 7. P. 47–62.
- 3. *Pope III C.A., Dockery D.W.* Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // Journal of the air & waste management association. 2006. V. 56. № 6. P. 709–742.
- 4. *Ревич Б*. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // Проблемы экологическо-го мониторинга и моделирование экосистем. 2018. № 3. С. 53–78.
- Cheng Z., Lu L., Wang S. et al. Status and characteristics of ambient PM2.5 pollution in global megacities // Environment International. 2016. V. 89. № 90. P. 212– 221.
- 6. *Klimont Z., Kupiainen K., Heyes C. et al.* Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2017. V. 17. № 14. P. 8681–8723.
- Козлов В.С., Панченко М.В., Якушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосферы и океана. 2010. № 7. С. 561–569.
- Janssen N.A., Hoek G., Simic-Lawson M. et al. Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM(10) and PM(2.5) // Environmental Health Perspectives. 2011. V. 119. № 12. P. 1691–1699.
- 9. *Perera F.* Pollution from fossil-fuel combustion is the leading environmental threat to global pediatric health and equity: solutions exist // International journal of environmental research and public health. 2018. V. 15. № 1. P. 16.
- 10. Report to congress on black carbon. Department of the Interior, and Related Agencies. Edito, 2012.

- 11. Битюкова В., Саульская Т. Изменение антропогенного воздействия производственных зон Москвы за последние десятилетия // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 3. С. 24–33.
- 12. Diapouli E., Kalogridis A.-C., Markantonaki C. et al. Annual Variability of Black Carbon Concentrations Originating from Biomass and Fossil Fuel Combustion for the Suburban Aerosol in Athens, Greece // Atmosphere. 2017. № 12. V. 8. P. 234.
- 13. Cheng Y., Engling G., He K.-B. et al. Biomass burning contribution to Beijing aerosol // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. № 15. P. 7765–7781.
- Доклад о состоянии окружающей среды в городе Москве в 2019 году / Под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПиООС, 2020.
- Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M. et al. Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // Atmospheric Environment. 2018. V. 175. № 7. P. 54–64.
- Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А. и др. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2018. № 1. С. 5–10.
- 17. *Popovicheva O.B., Volpert E., Sitnikov N.M. et al.* Black carbon in spring aerosols of Moscow urban background // Geograpry, environment, sustainability. 2020. V. 13. Nº 1. P. 233–243.
- Поповичева О.Б, Кистлер М., Киреева Е.Д. и др. Состав и микроструктура аэрозоля задымлённой атмосферы г. Москвы в условиях экстремальных пожаров августа 2010 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. № 1. С. 56–65.
- 19. *Habibi H., Awal R., Fares A. et al.* COVID-19 and the Improvement of the Global Air Quality: The Bright Side of a Pandemic // Atmosphere. 2020. V. 11. № 12. P. 1279.
- Baldasano J.M. COVID-19 lockdown effects on air quality by NO<sub>2</sub> in the cities of Barcelona and Madrid (Spain) // Science of the Total Environment. 2020. V. 741. № 11. P. 140353.
- 21. Gaubert B., Bouarar I., Doumbia T. et al. Global Changes in Secondary Atmospheric Pollutants during the 2020 COVID-19 Pandemic // Earth and Space Science Open Archive ESSOAr. 2020. V. 741. № 11. P. 140353.
- 22. Adams M.D. Air pollution in Ontario, Canada during the COVID-19 State of Emergency // Science of The Total Environment. 2020. V. 742. №11. P. 140516.
- Evangeliou N., Platt S.M., Eckhardt S. et al. Changes in black carbon emissions over Europe due to COVID-19 lockdowns // Atmospheric Chemistry and Physics Discussions. 2020. P. 1–33. https://doi.org/10.5194/acp-2020-1005
- 24. Grivas G., Athanasopoulou E., Kakouri A. et al. Integrating in situ Measurements and City Scale Modelling to Assess the COVID–19 Lockdown Effects on Emissions and Air Quality in Athens, Greece // Atmosphere. 2020. V. 11. № 11. P. 1174.
- 25. Panda S., Mallik C., Nath J. et al. A study on variation of atmospheric pollutants over Bhubaneswar during imposition of nationwide lockdown in India for the

COVID-19 pandemic // Air Quality, Atmosphere & Health. 2020. V.14. №8. P. 1–12. https://doi.org/10.1007/s11869-020-00916-5

- 26. *Hudda N., Simon M.C., Patton A.P. et al.* Reductions in traffic-related black carbon and ultrafine particle number concentrations in an urban neighborhood during the COVID-19 pandemic // Science of the Total Environment. 2020. № 11. V. 742. P. 140931.
- 27. Гинзбург А.С., Семёнов В.А., Семутникова Е.Г. и др. Влияние ограничений, обусловленных COVID-19, на качество воздуха в Москве // Доклады РАН. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 74–79.
- Sandradewi J., Prévôt A.S., Szidat S. et al. Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter // Environmental science & technology. 2008. V. 42. № 9. P. 3316–3323.
- Lupu A., Maenhaut W. Application and comparison of two statistical trajectory techniques for identification of source regions of atmospheric aerosol species // Atmospheric Environment. 2002. V. 36. № 36–37. P. 5607– 5618.
- Popovicheva O., Padoan S., Schnelle-Kreis J. et al. Spring Aerosol in the Urban Atmosphere of a Megacity: Analytical and Statistical Assessment for Source Impacts // Aerosol and Air Quality Research. 2020. V. 20. № 4. P. 702–719.

- Ramachandran S., Rajesh T. Black carbon aerosol mass concentrations over Ahmedabad, an urban location in western India: comparison with urban sites in Asia, Europe, Canada, and the United States // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2007. V. 112. P. 1–19.
- 32. Garland R., Yang H., Schmi O. et al. Aerosol optical properties in a rural environment near the mega-city Guangzhou, China: implications for regional air pollution, radiative forcing and remote sensing // Atmospheric Chemistry and Physics. 2008. V. 8. № 3. P. 5161–5186.
- Popovicheva O.B., Kireeva E.D., Steiner S. et al. Microstructure and chemical composition of diesel and biodiesel particle exhaust // Aerosol Air Qual. Res. 2014. V. 14. № 5. P. 1392–1401.
- 34. Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф. и др. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей РМ2.5 в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // Оптика атмосферы и океана. 2017. № 12. С. 1033–1042.
- Popovicheva O.B. Combustion-Derived Carbonaceous Aerosols (Soot) in the Atmosphere: Water Interaction and Climate Effects // Aerosols-Science and Technology. A Comprehensive Handbook / Eds. I. Agranovski. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2010. P. 127– 157.