

УДК 502.53:631.46

## ОРГАНИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ И БИОТА В СОСТАВЕ ГОРОДСКОГО АТМОСФЕРНОГО ПЫЛЕАЭРОЗОЛЯ: ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ НА ГОРОДСКИЕ ПОЧВЫ

© 2021 г. Т. В. Прокофьева<sup>a, \*</sup>, С. А. Шоба<sup>a</sup>, Л. В. Лысак<sup>a</sup>, А. Е. Иванова<sup>a, b</sup>,  
А. М. Глушакова<sup>a, c</sup>, В. А. Шишков<sup>d</sup>, Е. В. Лапыгина<sup>a</sup>, П. Д. Шилайка<sup>a</sup>, А. А. Глебова<sup>b</sup>

<sup>a</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

<sup>b</sup>ИПЭЭ им. Северцова РАН, Ленинский пр-т, 33, Москва, 119071 Россия

<sup>c</sup>НИИ вакцин и сывороток им. И.И. Мечникова, Малый Казенный пер., 5А, Москва, 105064 Россия

<sup>d</sup>Институт географии РАН, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: [tatianaprokofieva@yandex.ru](mailto:tatianaprokofieva@yandex.ru)

Поступила в редакцию 27.12.2020 г.

После доработки 22.03.2021 г.

Принята к публикации 31.03.2021 г.

Основным компонентом твердого аэрозоля атмосферы являются почвенно-породные частицы, поднимаемые с поверхности земли в результате эрозионных процессов, и первичные биологические аэрозольные частицы. На территориях с активной антропогенной деятельностью в составе атмосферного аэрозоля появляется много загрязнителей минеральной и органической природы. На двух участках г. Москвы (территории музея-усадьбы Л.Н. Толстого в Хамовниках и Ботанического сада биологического факультета МГУ) был собран летний выпавший из атмосферы пылеаэрозоль (твердые атмосферные выпадения). Проведены морфологические и микробиологические исследования с целью охарактеризовать состав органической составляющей городских твердых атмосферных выпадений и ее возможное влияние на почвы и экосистему города в целом. Обнаружено, что состав органической части образцов был идентичен и включал в себя не только представителей аэропланктона и другие частицы биологического происхождения, но и скопления пленок нефтепродуктов, волокна пластмасс, углистые частицы и др., что говорит о приносимом из атмосферы углеродородном загрязнении и загрязнении микропластиком. Состав исследованных групп организмов в пыли и почвах города аналогичен, что указывает на тесные экологические связи между городским пылеаэрозолем и почвами. По биомассе среди исследованных групп организмов твердых атмосферных выпадений доминируют грибы, многие из которых являются потенциально патогенными и аллергенными организмами. Кроме того, атмосферные пылеаэрозоли в городе, видимо, являются переносчиком микробиологического загрязнения, связанного с фекалиями животных. Наличие таких частиц в воздухе свидетельствует о недостаточной активности почв как “бактериально-го фильтра”.

**Ключевые слова:** биологические аэрозольные частицы (primary biological aerosol particles), аллергенные и потенциально патогенные грибы, санитарно-показательные микроорганизмы, микропластик, городские экосистемы

**DOI:** 10.31857/S0032180X21100099

### ВВЕДЕНИЕ

Твердые атмосферные частицы, или пыль, циркулируют в приземных слоях атмосферы и связывают компоненты внутри экосистем и различные экосистемы между собой. Поднимаясь с одних участков и оседая на других, пылевые частицы осуществляют связь между местообитаниями [28, 33]. Таким образом, происходит перенос субстратов между участками не только в местном масштабе, но и на далекие расстояния [3, 50]. Если на природных территориях неорганическая

часть атмосферной пыли состоит в основном из почвенно-породных частиц, то на городских территориях в нее добавляются микрофрагменты искусственных материалов, в том числе от дорожных конструкций и зданий [20, 54].

Кроме минеральных частиц переносу подвергаются и живые организмы – аэропланктон или их остатки – “первичные биологические аэрозольные частицы” [34]. Диаметр частиц биоаэрозоля варьирует от 0.3 до 100 мкм [32, 39]. Ежегодно с одного континента на другой воздушные потоки переносят с водно-пылевой взвесью примерно

$10^{18}$  живых клеток микроорганизмов, эндотоксинов, микотоксинов и пыльцы растений, расширяя их биогеографию [37]. Например, споры грибов можно обнаружить во всех частях Земного шара в течение всего года [30, 42, 51], даже в экстремальных условиях Антарктиды [49]. Культивируемые формы бактерий и грибов находят и высоко в стратосфере, потому их вклад в общее содержание углерода в атмосфере нуждается в дальнейшем изучении [29]. Помимо бактерий и грибов в атмосфере обнаруживается огромное количество живых клеток водорослей, лишайников, мхов и одноклеточных животных [52]. Благоприятные мягкие условия городского микроклимата способствуют выживанию в городской среде множества адвентивных видов.

Известно, что на городских территориях вблизи автомобильных магистралей запыленность в десятки–сотни раз больше, чем на природных территориях [1], больше интенсивность загрязнения, поступающего через атмосферу, а также активнее локальный перенос рыхлого материала между участками.

Для прогнозирования развития почвы и сообщества почвенных организмов важно знать не только количество и концентрацию загрязнителей в пылевых выпадениях, но общий состав городской пыли, особенно его органическую часть. Ранее обнаружено, что городская пыль характеризуется большим содержанием органического углерода. При микроскопических исследованиях определяется много компонентов, имеющих углеродородный состав, присущий молекулам органических веществ. По нашим данным содержание органического углерода в образцах из разных районов г. Москвы составляет до 10% от массы выпавшего материала [20, 54], что не противоречит другим исследованиям [57].

Пыль может служить источником новых субстратов для питания почвенных организмов, источником нового видового разнообразия, может создавать новые свойства почв и экологические ниши за счет поступления не типичных для природной среды субстратов, меняя условия жизни почвенных организмов. Несмотря на контроль показателей общей запыленности атмосферы (показатели PM<sub>2.5</sub> и PM<sub>10</sub>), экологическая роль твердых частиц, перемещающихся в атмосфере, и их влияние на почвы мало изучены.

Цель исследований — охарактеризовать состав органической составляющей и отдельных групп организмов городских твердых атмосферных выпадений в образцах, собранных на территории г. Москвы, как потенциальный источник влияния на свойства почв и разнообразие почвенных организмов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на территории г. Москвы. Москва расположена в центре Восточно-Европейской равнины, сложенной рыхлыми мелкодисперсными отложениями преимущественно ледникового и водно-ледникового происхождения. Климат в целом умеренно континентальный с холодной снежной зимой и умеренно теплым летом. В XX в. зафиксировано образование теплового острова над городом. Среднегодовая температура воздуха и почв в городе неуклонно повышается [10, 47, 48]. Вторая половина июля и август в г. Москва обычно наиболее благоприятны для сбора сухих пылеаэрозолей. В августе 2019 г. в период сбора материала для исследования погода имела обычный характер: средняя температура составила +17,6°C, количество выпавших осадков 42 мм, средняя скорость ветра 1,2 м/с ([https://tr5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Москве\\_\(центр,\\_Балчуг\)](https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Москве_(центр,_Балчуг))).

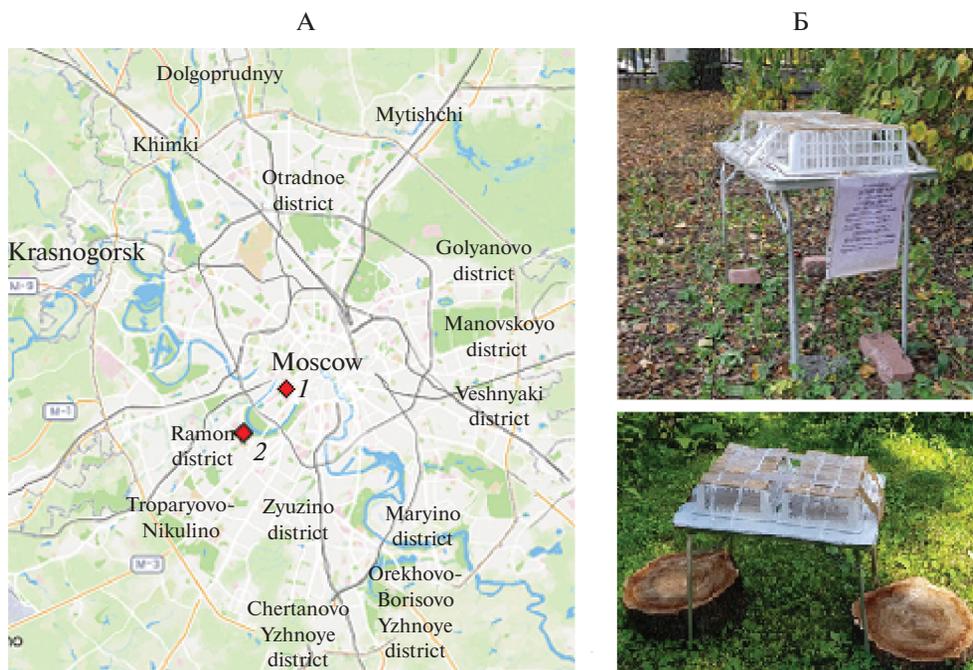
Сбор атмосферных выпадений проводили на высоте 80 см от поверхности почвы. Пылевую нагрузку пересчитывали в расчете на год.

**Участки исследования.** Обе площадки для сбора твердых атмосферных выпадений расположены на озелененных территориях с ограниченной рекреационной нагрузкой в районах с разной удаленностью от центра города (рис. 1), в непосредственной близости от улиц с автомобильным движением. Поскольку тепловой остров, сформировавшийся над городом, распространяется за его границы, метеорологические обсерватории фиксируют существенное повышение температур воздуха и почвы за прошедшее столетие, можно считать, что оба участка находятся в центральной зоне теплового острова [10, 47, 48].

*Первый участок* — мемориальный сад усадьбы Л.Н. Толстого в Хамовниках, филиал Государственного музея Л.Н. Толстого — расположен в центральном административном округе Москвы. Высота участка над уровнем моря 140 м.

Территория усадьбы занимает площадь примерно 1 га и в настоящее время окружена жилыми кварталами и офисными зданиями, на месте ранее существовавших производственных предприятий (ткацкой фабрики, пивного завода и др.). Доступ в парк имеют только посетители музея. На территории сада имеется несколько мемориальных деревьев, культивируются растения, выращиваемые в садах второй половины XIX в.

*Второй участок* — Ботанический сад биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (БС МГУ) на Воробьевых горах (территория кампуса университета). Высота участка над уровнем моря 195 м. В середине XX в. это была окраина города. В настоящий момент территория может рассматриваться как часть городского ядра. Объект расположен в Юго-Западном административном округе г. Москвы. Ботанический сад занима-



**Рис. 1.** Участки исследования на карте города (А): 1 – мемориальный парк усадьбы Л.Н. Толстого в Хамовниках, 2 – Ботанический сад биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова и установки для сбора атмосферных выпадений на участках (Б).

ет площадь более 30 га. Доступ на его территорию имеют сотрудники и учащиеся МГУ, а также небольшие экскурсионные группы, что значительно снижает объемы рекреационной нагрузки.

**Сбор атмосферных выпадений.** Материал для исследования собирали путем непосредственного осаждения аэрозольных частиц из атмосферы в экспонируемые контейнеры. Использовали авторский метод сбора сухих атмосферных пылеаэрозолей, подобные методы ранее апробированы и описаны другими исследователями как для открытых, так и для лесных природных территорий [25, 26]. На раскладных столах помещали по 8 предварительно взвешенных пластиковых контейнеров размером 11 × 13.5 см. Контейнеры прикрывали сверху глубокими хозяйственными лотками, в боковых стенках которых были проделаны отверстия для свободной циркуляции воздуха. В контейнерах накапливались твердые атмосферные выпадения. Контейнеры выставляли в течение 46 суток с конца июля до середины сентября 2019 г. Небольшое количество влаги, попадавшее в контейнеры, испарялось естественным путем. Ловушки устанавливали на открытых, по возможности продуваемых площадках.

После окончания экспериментов вычисляли пылевую нагрузку на участках исследования по формуле:  $P = P_a / (ST)$ , где  $P_a$  – вес осаждаемой пыли, г;  $S$  – проективная площадь осаждения, м<sup>2</sup>;

$T$  – временной интервал проведения эксперимента, сутки. Результат умножали на 365.

**Лабораторные методы.** Морфологическую диагностику состава образцов проводили при помощи бинокулярной лупы непосредственно на поверхности контейнеров (увеличение ×4...×56), а также на сканирующем электронном микроскопе JEOL 6610 LV с энергодисперсионным спектрометром INCA XACT.

По три контейнера с каждой площадки использовали для проведения электронного микроскопирования. Содержание грибов анализировали в трехкратной повторности из трех контейнеров с каждой точки, содержание бактерий – в двухкратной из оставшихся контейнеров.

**Выделение биологических компонентов аэрозолей из проб пыли.** Пыль из каждого контейнера смывали стерильной водой (аликвота 10 мл), в которую вносили 1 каплю (0.025 мл) Twin-80 для снижения электростатических свойств пластика – материала контейнеров. Смывы аккуратно взбалтывали по поверхности внутри контейнера и переносили в стерильную пробирку.

**Оценку грибной биомассы и численности бактерий** проводили методом прямой люминесцентной микроскопии: грибы учитывали при окрашивании калькофлюором белым (Fluorescent brightener 28, Sigma), бактерии – акридином оранжевым [17]. Для десорбции грибных структур смывы пыли предварительно обрабатывали на приборе Vor-

**Таблица 1.** Пылевая нагрузка на участках исследования, г/м<sup>2</sup> в год

Участок исследования (повторность)	Нагрузка				Стандартное отклонение ( $\sigma$ )
	min	max	med	средняя ( $\mu$ )	
Сад усадьбы в Хамовниках ( $n = 7$ )	10.69	64.12	21.37	26.72	17.99
БС МГУ ( $n = 8$ )	10.69	42.75	21.93	23.38	12.93

tex (3000 об./мин, 2 мин). Для десорбции бактерий с поверхности частиц пыли водную суспензию обрабатывали ультразвуком на приборе УДЗН (22 кГц, 0.44 А, 2 мин). Количество грибных пропагул и бактериальных клеток на 1 г субстрата рассчитывали согласно стандартной методике [19]. При расчете грибной биомассы (мг/г почвы) учитывали, что плотность спор равна 0.837 г/см<sup>3</sup>, а мицелия – 0.628 г/см<sup>3</sup> [19].

*Культивируемые микроскопические грибы* выделяли из водных смывов пыли методом посева серийных разведений С. Ваксмана в модификации Д.Г. Звягинцева [17]. Посевы осуществляли глубинным способом на агаризованную минеральную питательную среду Чапека [31]. Таксономическую идентификацию чистых культур проводили на основании культурально-морфологических признаков на среде Чапека и также средах, рекомендованных для конкретных групп грибов, с помощью современных определителей для соответствующих родов и групп [31, 35]. Виды относили к аллергенным и потенциально патогенным на основании известных литературных данных [16, 43].

*Культивируемые сапротрофные бактерии* выделяли из водных смывов пыли методом посева на универсальную агаризованную глюкозо-пептонно-дрожжевую среду, которая позволяет выделить из почвы до 50 родов блока аэробных и факультативно-анаэробных бактерий [17]. Таксономическую идентификацию бактерий до рода проводили на основании фенотипических признаков [11, 18].

*Содержание санитарно-показательных микроорганизмов* в образцах изучали в соответствии с методическими указаниями Федерального центра Госсанэпиднадзора Минздрава России (МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест). В образцах почвенной пыли определяли численность бактерий группы кишечной палочки в соответствии с методическими рекомендациями (МР ФЦ/4022 Методы микробиологического контроля почвы). Рассчитывали численность общих колиформных бактерий и термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ) в 1 г почвенной пыли в КОЕ/г. Колонии ТКБ выделяли в чистую культуру для последующей генетической идентификации штаммов (принадлежность к санитарно-показательному виду *Escherichia coli*). Для этого изучали вариабельный участок V3–V4 гена 16S рРНК с использованием программы

BLAST [13]. ДНК выделяли по методике, описанной ранее [5]. Анализ последовательностей гена 16SpРНК проводили в Научно-производственной компании “Синтол” (Москва).

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы MS Excel.

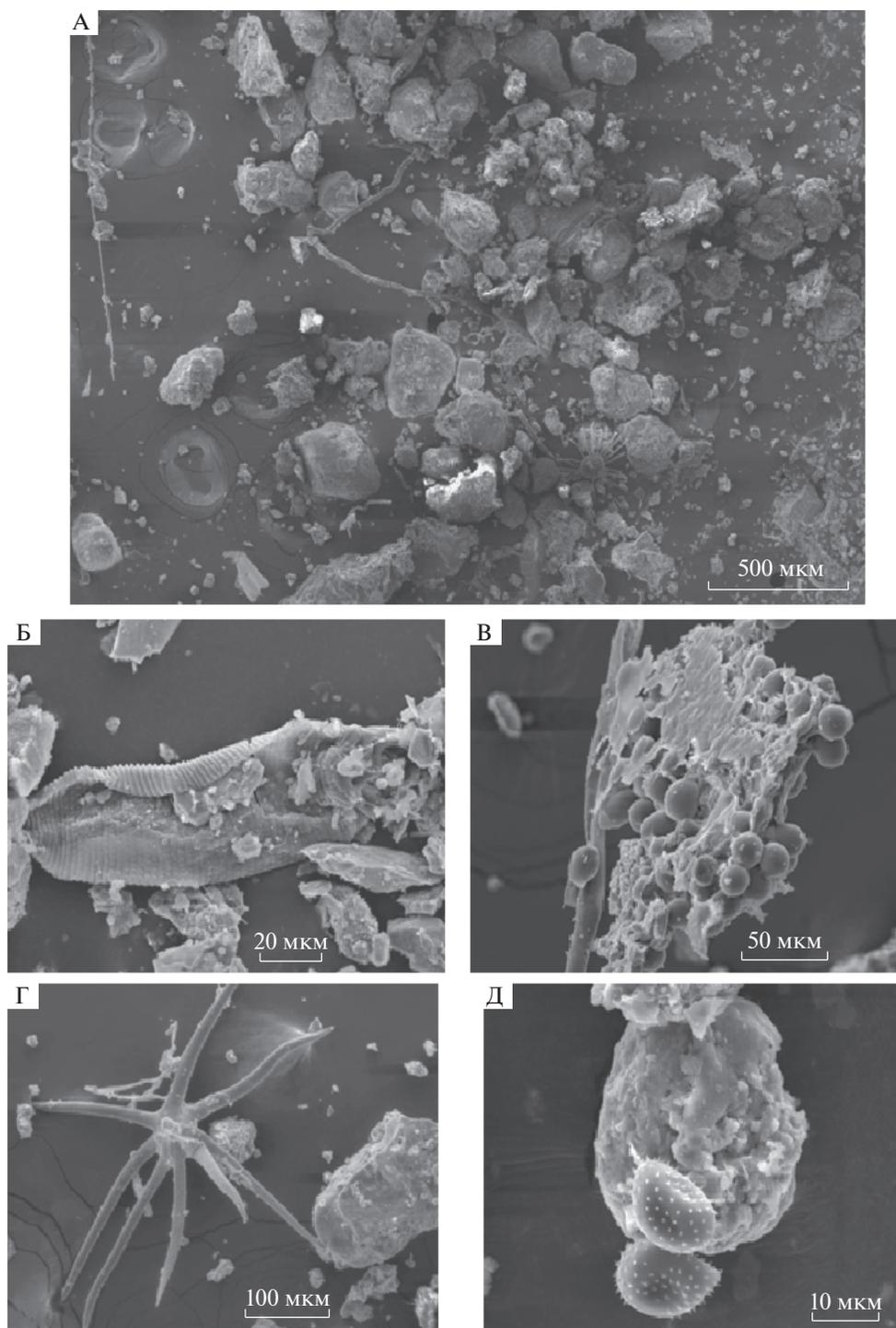
## РЕЗУЛЬТАТЫ

В целом пылевая нагрузка на обоих участках исследования за время наблюдения была низкой. На участке, расположенном в центральной части города, она была ожидаемо большей (табл. 1).

**Разнообразие объектов органического состава в образцах атмосферных выпадений.** Несмотря на различное расположение участков, общий характер образцов был одинаков. Все объекты, формирующие состав изучаемых твердых атмосферных выпадений, были условно разделены на неорганические и органические. Все исследуемые образцы имеют в своем составе минеральные зерна и агрегаты относительно крупных размеров (от десятков мкм до 1 мм), состоящие из кварцевых и др. силикатных зерен. Эти частицы имеют наибольшую долю в составе минерального компонента образцов. Среди минеральной части твердых выпадений представлены фрагменты карбонатных строительных растворов, дорожных покрытий, твердые магнитные частицы.

Число отдельных фрагментов отмерших растительных и животных тканей в образцах выпадений по сравнению с количеством единиц минерального компонента заметно меньше. Однако из-за размеров они занимают значительный объем. При небольших увеличениях под бинокулярной лупой установлено, что обилие первичных биологических аэрозольных частиц составляет около 40–50% от объема исследуемых образцов (рис. 2, А, табл. 2). В составе летних пылеаэрозолей обнаружены фрагменты листовых пластинок и тел насекомых, семена, гифы и споры грибов, водоросли, органические остатки, также волокна искусственного происхождения и пятна-пленки нефтепродуктов.

Фрагменты растительных тканей в составе твердых атмосферных выпадений, так же как крупные минеральные зерна, хорошо адсорбируют на своей поверхности мелкие зерна и кристаллы, и наоборот – поверхность минеральных агре-



**Рис. 2.** Первичные биологические частицы внутри аэрозоля: А – общий вид пылеаэрозоля при увеличении  $\times 45$  (сад усадьбы в Хамовниках), Б – хитиновый покров животного с налипшими минеральными частицами (сад усадьбы в Хамовниках), В – обрастания микроагрегата пыли одноклеточными водорослями (БС МГУ), Г – трихома с налипшими минеральными частицами (БС МГУ), Д – грибные конидии, адсорбированные на окатанном минеральном агрегате пылеаэрозоля (сад усадьбы в Хамовниках).

гатов содержит на себе объекты биоаэрозоля (рис. 2, Б–2, Д).

При первичном описании образцов под бинокулярной лупой на поверхности контейнеров от-

мечены зеленовато-желтые и коричневатые пятна-пленки, занимающие около 3% от общей площади контейнера. Позже на электронном микроскопе определен их углеводородный состав. Выдвинуто

**Таблица 2.** Примерные соотношения компонентов в составе пылевых выпадений: результаты осмотра образцов при увеличении до  $\times 50$ 

Содержимое образца	Сад усадьбы в Хамовниках	БС МГУ
	доля в общем объеме, %	
Минеральная составляющая		
Матовые светлые неокатанные карбонатные частицы (фрагменты строительных растворов)	5	10
Прозрачные, бежевые и розоватые матовые частицы, иногда с острыми краями (зерна силикатов)	10	20
Темно-серые к черному частицы и агрегаты разного размера, неокатанные (до 1 мм, некоторые очень мелкие <0.1 мм)	10	20
Крупные темные обломки (асфальтобетон)	<3	<3
Округлые темные частицы (магнитные)	<3	<3
Красноватая крошка (кирпич, красный асфальтобетон)	–	<3
Органическая составляющая		
Фрагменты листовых пластин	10	–
Семена растений (в основном березы)	5	5
Тонкие гладкие прозрачные нитевидные структуры (возможно, корни, гифы и др.)	5	5
Мелкие насекомые и их фрагменты (крылья, конечности)	5	10
Тонкие цветные (красные, синие) и бесцветные нити, отдельные или несколько спутанных	<3	<3
Красные округлые частицы (подсохшие водоросли)	40	25
Коричневые агрегаты (органические остатки?) частично ассоциированы с нитевидными структурами	5	<3
Желтовато-зеленые и коричневые пятна-пленки (углеводородные пленки)	<3	<3

предположение, что это конденсат выхлопов автотранспорта. Для подтверждения предположения о происхождении пленок отобран и проанализирован материал из выхлопной трубы автомобиля. Его элементный состав идентичен составу углеводородных пленок (рис. 3).

В образцах обоих объектов обнаружены засохшие фрагменты фекальных масс. Фрагменты идентифицировали по высокому содержанию в валовом составе углерода, а также фосфора, доля которого составляла более 5% от массы исследуемого субстрата (рис. 4, А).

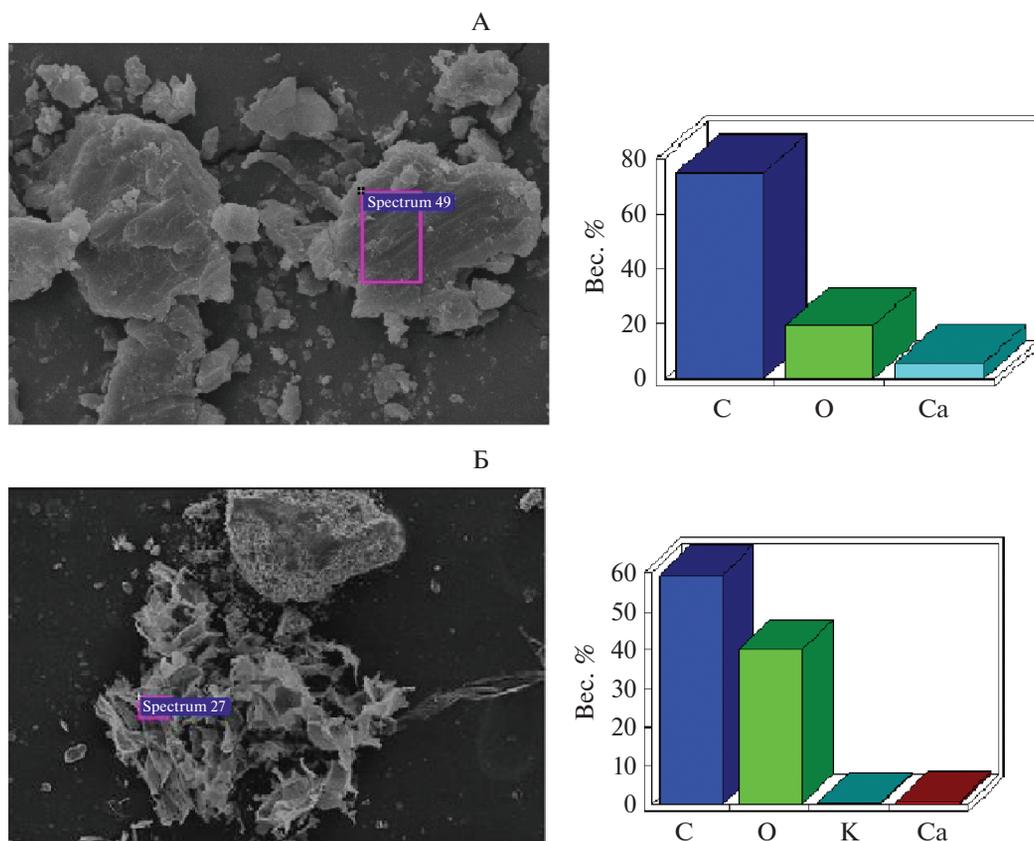
В опытных контейнерах обеих площадок исследования обнаружены мелкие (средний размер единичной водоросли около 10 мкм) красные водоросли, покрывающие около 40% поверхности контейнера (рис. 2, В).

В образцах обнаружены отдельные фрагменты искусственных волокон с преобладанием в составе углерода, вероятно, пластмасс. Данный компонент атмосферных выпадений выявлен даже при визуальном осмотре образца – по ярким цветам окраски и форме (1–10 мкм). При нахождении кислорода в составе волокон в соотношении с углеродом 1 : 5 и по характерной “растрепанной” волокнистой структуре можно предположить их происхождение из целлюлозы или полиэтилен-терефталатов (химическая формула  $(C_{10}H_8O_4)_n$

(рис. 4, Б)). Обнаружены и пластиковые волокна преимущественно углеродного состава.

**Содержание грибной биомассы в атмосферных выпадениях.** Наиболее весомой биологической составляющей аэропланктона, присутствующей во всех исследуемых образцах, являются грибы. Методом прямой микроскопии выявлено, что грибная биомасса в составе пылевых выпадений по весу может достигать 0.3% (рис. 5). По биоморфологической структуре в составе грибной биомассы пылевых выпадений преобладают грибные споры, их биомасса в 7–12 раз больше, чем биомасса грибного мицелия. В 1 г пылевых выпадений содержатся сотни миллионов грибных пропагул. Средняя численность спор оказалась больше на участке БС МГУ, где достигала млрд. шт. в 1 г пылевых выпадений. На участке в саду усадьбы численность грибных спор была примерно на 30% меньше. Анализ размерной структуры грибных пропагул показал абсолютное доминирование по численности мелких спор (диаметром <3 мкм) в образцах обоих участков, такие споры входят в состав фракции пылевых выпадений PM2.5. В парке Хамовники при общей меньшей численности отмечена несколько большая (15%) доля спор средних размеров (3–10 мкм), входящих во фракцию PM10.

В составе твердых атмосферных выпадений, помимо грибных спор, выявлено присутствие фрагментов грибного мицелия (рис. 5). Суммарная длина мицелия не очень велика и составляла



**Рис. 3.** Сравнение состава углеводородных пленок, определенного полуколичественно при помощи энергодисперсионного микроанализатора (водород из спектра исключен): А – соскок из выхлопной трубы автомобиля, Б – сгусток пленок в составе пылевых выпадений (усадебка в Хамовниках).

$67 \pm 93$  и  $122 \pm 92$  м соответственно, в пылевых выпадениях в Хамовниках и БС МГУ. На втором участке преобладал тонкий мицелий, диаметром  $<4$  мкм, а на первом – толстый  $>4$  мкм.

#### Численность пропагул культивируемых грибов.

Общая численность колониеобразующих единиц (КОЕ) культивируемых грибов была почти вдвое больше на участке БС МГУ по сравнению с усадьбой в Хамовниках (табл. 3), что соотносится с данными прямой микроскопии.

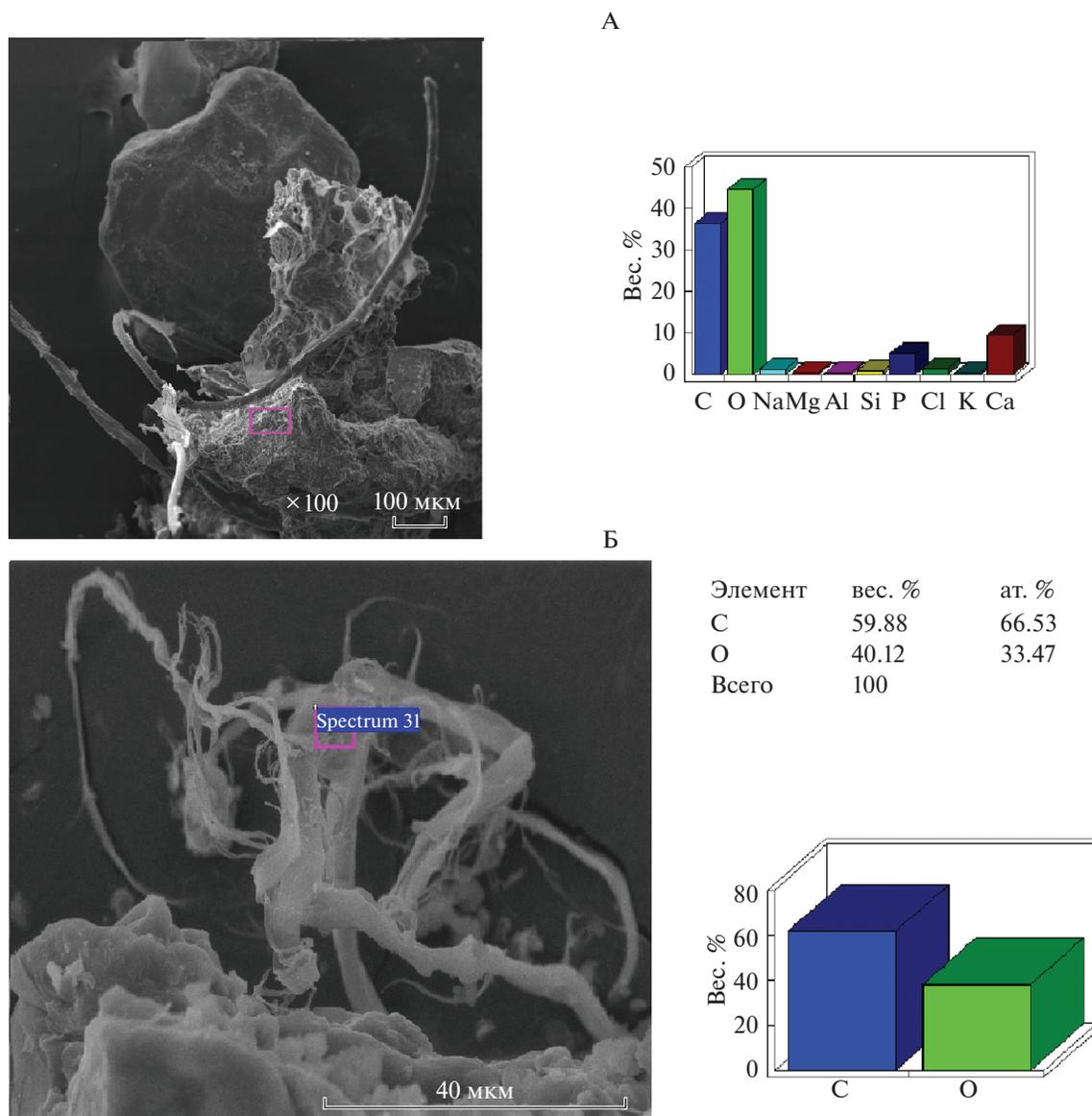
#### Таксономический состав культивируемых грибов.

В ходе проведенных исследований в опытных образцах выявлено более 30 видов, относящихся к 21 роду микроскопических грибов – представителей отделов Мисоготомусота, Аскомицота, Басидиомусота, а также присутствовало несколько форм без спороношений (табл. 3). Доминировали в составе пылевых атмосферных выпадений на обоих участках представители родов *Alternaria* (*A. alternata*, *A. tenuissima*), *Aureobasidium pullulans*, *Cladosporium* (*C. cladosporioides*, *C. macrocarpon* и др.), *Penicillium* spp. Как частые и обильные встречались виды рода *Trichoderma*.

Общее видовое богатство грибных комплексов на двух участках оказалось сопоставимо. В целом

отмечено высокое сходство состава выявленных на двух исследованных площадках грибных аэрозолей, коэффициент сходства Сьеренсена–Чекановского между ними составил 0.63. Что указывает на примерно одинаковые исходные субстраты, являющиеся основными источниками поступления грибных пропагул в воздух. В первую очередь сходство может быть обусловлено наличием древесных и травянистых растений на обоих участках.

Но можно отметить некоторые отличия видового состава и структуры грибной компоненты пыли на исследованных территориях. В саду усадьбы Хамовники в составе грибных пылевых выпадений доминировали представители рода *Penicillium* (*P. chrysogenum* Thom, *P. citrinum* Thom, *P. glabrum* (Wehmer) Westling, *P. janczewskii* K.W. Zaleski, и др.). Это типичные почвообитающие виды, в пылевые выпадения они могут попадать вместе с частичками почвы. А также здесь отмечено обильное присутствие грибов, типично развивающихся в филлоплане и на коре растений: это эккрисотрофы и фитопатогены родов *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Botrytis*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Epicoccum* [35]. Эти виды, как правило, образуют споры средних и крупных размеров, что согласует-



**Рис. 4.** Компоненты пылеаэрозоля и их состав (водород из спектра исключен): А – засохшие фрагменты фекальных масс (образец с участка БС МГУ), Б – волокна целлюлозного происхождения в твердых атмосферных выпадениях (усадыба в Хамовниках).

ся с полученными данными о большей доле и биомассе таких спор в составе общей грибной биомассы на территории парка.

В БС МГУ в составе пылевых выпадений отмечено значительное присутствие мелкоспоровых видов родов *Acremonium*, *Cephalótrichum*, *Paecilomyces*, *Phoma*, развивающихся на живых и мертвых растительных субстратах [35], некоторые типичные компоненты филопланы, обычно встречающиеся при накоплении различных экссудатов растений. Очень обильны грибы родов *Botrytis*, *Epicoccum*, *Mucor*, *Rhizopus*, *Trichoderma*. Таксономический состав выявленных на этом участке грибов коррелирует с полученными данными о преобладании мелких и зна-

чительной доле крупных спор в составе грибной биомассы.

**Общая численность бактерий в исследованных образцах.** Показатель общей численности бактерий в образце атмосферных выпадений, отобранном на территории сада усадьбы, составлял 8.4 млрд кл./г, на территории БС МГУ – 5.2 млрд кл./г. Общая численность бактерий на территории сада усадьбы почти в 2 раза больше, чем на территории БС МГУ (табл. 4). Полученные показатели близки к значениям общей численности бактерий, которые фиксируются в образцах верхнего горизонта почв БС МГУ, и составляют от 1 до 10 млрд кл./г почвы [21].

**Численность и таксономический состав культивируемого сапротрофного бактериального комплекса.** Численность культивируемого сапротрофного комплекса бактерий (СБК) незначительно различалась. На территории БС МГУ показатель составил 2.3 млн КОЕ/г, в саду усадьбы – 2.5 млн КОЕ/г.

Проанализирован таксономический состав бактериального комплекса. В образцах обеих опытных площадок в значительных количествах присутствовали бактерии родов *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*. Меньше было содержание рода *Erwinia* и семейства Enterobacteriaceae. В образцах, отобранных на территории БС МГУ, присутствовали бактерии родов *Cytophaga* и *Rhodococcus*.

**Определения содержания санитарно-показательных микроорганизмов.** Обнаружение санитарно-показательных организмов и их высокое относительное обилие является важным свидетельством антропогенной нагрузки на почву, а присутствие их в атмосферных выпадениях говорит о наличии фекального загрязнения.

Колиформные бактерии были выделены из пылевых выпадений на обоих исследованных участках. В БС МГУ их содержание составило 9%, в саду усадьбы – 15% от числа СБК (табл. 5). Относительное обилие термотолерантных колиформных бактерий от числа общих колиформных бактерий в БС МГУ составило 2.2%, в саду усадьбы – 10.6%.

Среди группы ТКБ, идентифицированной на основании секвенирования фрагмента гена 16S рРНК, обнаружены штаммы санитарно-показательного вида *Escherichia coli* (сходство 99.99%). Штаммы *E. coli* обнаружены в пылевых выпадениях в обоих участках. В исследованных образцах пыли, отобранной на территории сада усадьбы в Хамовниках, содержание *E. coli* больше, чем в образцах с территории БС МГУ. Руководствуясь санитарными нормативами, разработанными для почв, образцы атмосферных выпадений следует рассматривать как сильнозагрязненные (МР ФЦ/4022. Методы микробиологического контроля почвы).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Более интенсивная пылевая нагрузка в центральном округе города была ожидаема. В целом низкие уровни пылевой нагрузки на обоих участках исследования связаны с конструкцией ловушек для пыли, а также с регулярным промыванием атмосферы дождями. Общее количество осадков было мало, дожди не интенсивны, но регулярны. Это заставило нас использовать полузакрытую конструкцию, а не размещать контейнеры на открытом воздухе.

Разделение на органические и неорганические компоненты частиц пылеаэрозоля условно, так как в исследованном материале присутствовали и

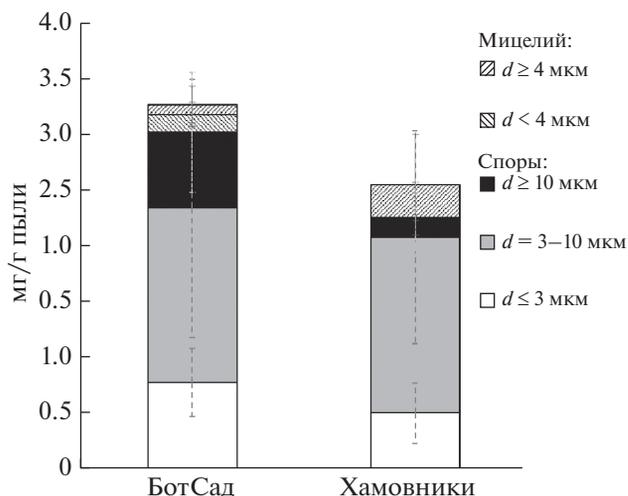


Рис. 5. Содержание и структура грибной биомассы в пылевых выпадениях на исследуемых площадках.

агрегаты смешанного состава. Часто фрагменты, имеющие биологическое происхождение и углеводородный состав, плотно ассоциированы с минеральной частью атмосферных выпадений.

Органические компоненты в составе исследуемых образцов твердых атмосферных выпадений очень разнообразны. Здесь обнаружены как фрагменты и остатки живых организмов и их зачатки – составная часть аэропланктона (семена, споры грибов и пыльца растений), так и фрагменты фекальных масс и детрита. Заметную долю в образцах занимают гифы грибов и разросшиеся во влажной среде контейнеров водоросли.

Согласно полученным данным, грибы по биомассе достигают 2.5–3.5 мг/г пылевых выпадений. Такие значительные объемы грибной биомассы в пыли отмечены благодаря выбранному сезону сбора пылевых выпадений. Ранее показано, что наибольшая седиментация грибных пропагул (до сотен тысяч на м<sup>2</sup> в сутки) отмечается именно в августе [14].

В саду усадьбы в Хамовниках общая меньшая численность грибных пропагул обусловлена уменьшением присутствия мелких и крупных спор. Однако отмечено одинаковое по биомассе содержание спор средних размеров (3–10 мкм) (рис. 5). Эту фракцию обычно составляют дрожжи и споры грибов, обитающих на поверхности растений и в наземном ярусе. Возможно, такое распределение обусловлено особенностями почвенного покрова и длительностью использования участков. Уровень присутствия спор разных размеров фракций в воздушной пыли зависит не только от заселения грибами поверхностей наземного и наземного яруса, но и от состава почвенного грибного сообщества, споры которого могут попадать с пылью в воздух. Мелкие споры

**Таблица 3.** Таксономический состав и структура грибных комплексов в пылевых выпадениях на исследованных территориях (частота встречаемости (%)/относительное и видов (%))

Состав	Сад усадьбы в Хамовниках	БС МГУ
Отдел Mucoromycota		
<i>Absidia spinosa</i> Lendn.	11/0.2	–
<i>Mucor</i> spp.	11/2.8	22/6.0
<i>Rhizopus oryzae</i> Went & Prins. Geerl.	–	11/0.2
Отдел Ascomycota		
<i>Acremonium</i> spp.	11/1.4	22/17.5
<i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl.	67/7.1	44/4.9
<i>Alternaria tenuissima</i> (Kunze) Wiltshire	33/3.6	22/2.1
<i>Aspergillus ustus</i> (Bainier) Thom & Church	–	11/0.1
<i>Aspergillus niger</i> Tiegh.	22/2.0	–
<i>Aspergillus terreus</i> Thom	–	11/0.2
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen.	11/0.5	–
<i>Aureobasidium pullulans</i> (De Bary) G. Arnaud ex Cif., Ribaldi & Corte	44/14.9	56/14.0
<i>Botrytis cinerea</i> Pers.	–	44/2.2
<i>Candida</i> spp.	11/2.1	–
<i>Cephalótrichum stemonitis</i> (Pers.) Nees	–	44/5.3
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	67/8.6	33/1.5
<i>Cladosporium macrocarpum</i> Preuss	22/8.7	–
<i>Epicoccum nigrum</i> Link	11/0.4	44/5.8
<i>Fusarium</i> spp.	33/2.1	33/3.1
<i>Penicillium</i> spp.	100/30.1	44/8.4
<i>Phoma</i> sp.	11/0.9	33/4.1
<i>Purpureocillium lilacinum</i> (Thom) Luangsa-ard, Houbraken, Nywel-Jones & Samson	–	11/0.7
<i>Trichoderma</i> spp.	44/9.4	44/12.2
Отдел Basidiomycota		
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i> (A. Jörg.) F.C. Harrison	11/0.3	11/0.7
<i>Cystofilobasidium capitatum</i> (Fell, I.L. Hunter & Tallman) Oberw. & Bandoni	11/1.4	11/0.7
Стерильные мицелии	33/3.5	44/10.1
Число выявленных видов, <i>n</i>	26	25
Численность КОЕ/г пыли	$(0.567 \pm 0.351) \times 10^6$	$(1.008 \pm 0.872) \times 10^6$

чаще характерны для многих типичных почвенных сапротрофов, а к фракции крупных спор обычно относятся аскоспоры, некоторые базидиспоры и покоящиеся структуры грибов. Уменьшение присутствия разноразмерных грибных спор на участке парка может косвенно свидетельствовать о менее разнообразном почвенном грибном сообществе, о меньшей насыщенности почв этого участка разнообразными органическими субстратами. Однако пока не проанализированы почвы и почвенные сообщества, поэтому данное соображение является предположением.

В составе грибных пылевых выпадений абсолютно преобладают пигментированные формы — это меланинсодержащие мицелиальные грибы родов *Alternaria*, *Aureobasidium*, *Cladosporium*, *Cephalosporium*, *Epicoccum* и др., а также каротинсодержащие дрожжи видов *Cystofilobasidium capitatum*, *Rhodotorula mucilaginosa*, обитающие на растениях. Наличие пигментов определяет устойчивость этих

грибов к различным факторам окружающей воздушной среды [4]. Аккумуляция пигментированных грибов является одной из характерных черт почвенной микобиоты городской среды [9, 15]. Видимо, такие грибы поступают в почву именно с городской пылью.

В настоящее время накоплен определенный массив информации о таксономическом и размерном составе грибных пропагул как компонентов биоаэрозолей, о соотношении бесцветных базидиальных спор и пигментированных аскоспор в воздухе разных регионов мира, хотя некоторые считают его недостаточным [38, 46, 56]. Полученные данные о видовом составе и биоморфологической структуре грибных пылеаэрозолей подтверждают описанную закономерность о преобладании в воздухе пропагул грибов-эпифитов и ксилотрофов со спорами средних размеров и фитопатогенов с крупными, часто меланизированными спорами, типично обитающими на расти-

**Таблица 4.** Общая численность бактерий, численность и таксономический состав культивируемых сапротрофных бактерий в исследованных образцах

Участок	Общая численность бактерий, млрд кл./г	Численность сапротрофных культивируемых бактерий, млн КОЕ/г	Таксономический состав сапротрофных культивируемых бактерий (на родовом уровне)
Сад усадьбы в Хамовниках	8.45 ± 0.85	2.50 ± 0.25	<i>Arthrobacter</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Erwinia</i> , сем. Enterobacteriaceae,
БС МГУ	5.20 ± 0.54	2.30 ± 0.24	<i>Cytophaga</i> , <i>Rhodococcus</i> <i>Arthrobacter</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Erwinia</i> , сем. Enterobacteriaceae

**Таблица 5.** Численность (над чертой, тыс. КОЕ/г) и доля (под чертой, %) бактерий семейства Enterobacteriaceae (ОКБ) и термотолерантных колиформных бактерий (ТКБ) в исследованных образцах

Участок	ОКБ	ТКБ	Присутствие <i>Escherichia coli</i>
Сад усадьбы в Хамовниках	240 ± 26	25.6 ± 2.5	+
	15	10.6	
БС МГУ	210 ± 24	4.4 ± 0.5	+
	9	2.2	

тельности. Это представители родов *Cladosporium*, *Alternaria*, *Fusarium*, *Epicoecum*, а также мелкоспоровых почвообитающих видов родов *Penicillium* и *Aspergillus* и др. В разных регионах соотношение доминантов и субдоминантов может несколько изменяться, но в целом состав ядра доминантов грибного аэропланктона на разных континентах и в регионах стабилен [16]. В составе грибных аэрозолей постоянно отмечается преобладание спор размерной фракции РМ10 [58]. На лесных участках благодаря обилию экссудатов на поверхности коры и листьев и также обилию растительных остатков создаются благоприятные условия для развития и спороношения грибов, возможно развитие на поверхности деревьев фитопатогенных грибов, имеющих крупные споры [45]. Ранее на участке БС МГУ (на территории метеостанции) проводился мониторинг присутствия в пылеаэрозолях грибных спор. Он выявил преобладание поздним летом и ранней осенью именно базидиоспор и конидий аскомицетов [8]. Полученные нами данные коррелируют с имеющимися в литературе. Однако следует отметить, что обычно анализ грибного аэропланктона осуществляют на урбанизированных территориях, и в меньшей степени интерес исследователей направлен на ненарушенные лесные территории. Это логично. Именно в городах отмечается большая численность грибных спор, составляющих фракцию РМ10. Следовательно, интенсивность рисков для здоровья населения увеличивается именно в городских экосистемах [53, 55].

Значительную долю в составе пылевых грибных выпадений на исследованных участках занимают представители родов *Alternaria* и *Cladosporium* — одного из самых распространенных агентов

аллергических заболеваний людей грибной этиологии [15, 16, 42, 43]. Среди выявленных грибов присутствуют представители родов *Absidia*, *Aspergillus*, *Candida*, *Fusarium*, некоторые виды которых известны как потенциально патогенные для человека [16, 43]. На территории сада усадьбы в Хамовниках разнообразие и обилие таких грибов больше, чем в БС МГУ. Это обусловлено особенностями расположения в центре города и интенсивностью рекреационного использования сада.

Обнаружены красные одноклеточные водоросли (багрянки), формирующие пленки на поверхности минеральных агрегатов в образцах, подвергавшихся увлажнению, или в виде окатанных конгломератов в сухих образцах. Вероятно, это аэрофильные водоросли, обитающие в условиях атмосферного увлажнения и испытывающие на себе постоянное чередование условий увлажнения—высыхания. Среди известных аэрофильных красных водорослей выделяют виды родов *Rhodospira*, *Phragmonema*, *Porphyridium*. Массовое развитие последних обычно связано с присутствием в почве значительных количеств органических соединений азота [2]. Попав в контейнеры, они обильно размножились во влажной среде, несколько увеличив общую массу образцов, так что один пришлось исключить при подсчете пылевой нагрузки. Можно отметить, что летом 2019 г. в Москве и окрестностях происходило массовое развитие красноватых водорослевых налетов на стволах деревьев.

Кроме первичных аэрозольных частиц, имеющих биологическое происхождение (микроорганизмы, фрагменты биологического материала, растительные остатки, фрагменты шерсти животных) [34], в образцах твердых пылевых выпадений

ний обнаружены частицы – носители органических загрязнителей почв. Это включения углеводородного состава в виде хорошо заметных, даже невооруженным глазом, но трудно идентифицируемых объектов – волокна пластмасс или тканей, чешуйки краски, а также углеводородные пленки. Энергодисперсионный микроанализатор не позволяет определить точные концентрации элементов в частицах и агрегатах или их ограниченных областях, но дает представление о составе и соотношениях основных элементов, составляющих исследуемый материал. В сочетании с характерными формами микрообъектов возможна их идентификация [20, 24, 27, 28].

Показатели общей численности бактерий в образцах почвенной пыли сравнимы таковыми поверхностных горизонтов городских почв [5, 12, 22]. Большие значения отмечены в образцах, отобранных в саду усадьбы, по сравнению с БС МГУ связаны с интенсивным движением транспорта и менее интенсивным воздухообменом из-за расположения территории ниже по абсолютной высоте. Таксономический состав сапротрофных культивируемых бактерий (на родовом уровне) также соответствует составу доминирующих родов в почвах города [12, 23]. Обращает на себя внимание высокое содержание бактерий сем. Enterobacteriaceae в исследованных образцах. Известно, что представители многих видов этого семейства могут вызывать кишечные и аллергические заболевания, а вид *E. coli* является индикатором фекального загрязнения почвы. Как правило в почве природных биогеоценозов представители этого семейства в значительных количествах не обнаруживаются, а если есть, то представлены сапротрофными видами и родами сем. Enterobacteriaceae [6, 7].

Известно, что накопление в городских загрязненных почвах потенциально патогенных (представители сем. Enterobacteriaceae), а также потенциально аллергенных бактерий из родов *Rhodococcus* и *Micrococcus*, сигнализирует о серьезном нарушении экологической функции почвы как “бактериального фильтра” и может представлять определенную опасность для человека [44]. Присутствие в исследуемых образцах этих бактерий свидетельствует о значительном бактериальном загрязнении воздуха в городе.

Выявленная доля ТКБ в пылевых выпадениях свидетельствует о сильной подверженности городской среды (в том числе воздуха) фекальному загрязнению, что является опасным для здоровья человека. Это подтверждается нахождением в составе пыли микрофрагментов фекальных масс (рис. 4). На участке в Хамовниках фекальная загрязненность оказалась больше, чем в БС МГУ. Видимо, это обусловлено наличием значительного фекального загрязнения городских почв селитебных территорий, находящихся в условиях высокой

антропогенной нагрузки, что может быть связано с хозяйственно-бытовой деятельностью человека, попаданием в нее экскрементов синантропных животных. Их можно встретить на обеих территориях. Но в районе Хамовники вокруг сада усадьбы более плотная застройка с небольшими участками открытых почв и зеленых насаждений. Жители выгуливают собак во дворах. На территории МГУ им. М.В. Ломоносова выгул собак менее интенсивен, так как плотность постоянных жителей меньше.

Вероятно, городские почвы в исследованных локациях нельзя рассматривать как эпидемически чистые, если руководствоваться нормативными документами (МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Пункт 8.1). Санитарно-гигиенические функции почвы очень важны. Они связаны с уничтожением патогенных микроорганизмов и стимулированием разложения органических остатков и продуктов обмена разнообразных живых организмов бактериями сапротрофного комплекса. Можно предположить, что в центре города из-за большей антропогенной нагрузки по сравнению с территорией МГУ, происходят серьезные нарушения и деградация всего природного комплекса, в том числе почвенного покрова [41]. Почва хуже справляется со своими санитарными функциями, и доля потенциально-патогенных, патогенных и аллергенных микроорганизмов в ней увеличивается. Это отражается на таксономическом составе культивируемых сапротрофных бактерий, присутствующих в твердых пылевых выпадениях.

Пылевые выпадения в мегаполисе могут служить не только источником новых, не характерных для природных ненарушенных экосистем субстратов для микроорганизмов, но и воздействовать на структуру микробного комплекса, увеличивая его видовое разнообразие за счет внесения синантропных видов [9]. Мониторинг пылевых выпадений мегаполиса позволяет выявлять тенденции количественного и качественного изменения состояния микробных комплексов окружающей природной среды в урбэкоосистеме, которая непосредственно влияет на здоровье человека [36, 40].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Загрязнение твердыми атмосферными частицами на опытных площадках в год наблюдения соответствовало низкому уровню пылевой нагрузки. Летняя пылевая нагрузка в саду усадьбы в Хамовниках при этом в целом больше, чем на территории БС МГУ.

В образцах летних атмосферных выпадений на обеих площадках исследования представлены материалы органического происхождения разного генезиса: как представители аэропланктона – во-

доросли, споры грибов, семена и пыльца, так и растительные и животные ткани разной степени разложения.

Во всех образцах отмечено присутствие микрофрагментов искусственных материалов углеводородного состава: скопления пленок нефтепродуктов, волокна пластмасс, углистые частицы и др., что говорит о приносимом из атмосферы углеводородном загрязнении и загрязнении микропластиком.

Состав исследованных групп микроорганизмов в пыли и почвах города аналогичен, что указывает на их тесные экологические связи. При атмосферном переносе аллергенные и потенциально-патогенные виды из филопланы, являющейся наиболее масштабным источником поступления грибных спор, попадают в городские почвы и накапливаются.

В таксономической структуре исследованных групп микроорганизмов твердых атмосферных выпадений доминируют грибы родов *Alternaria*, *Acremonium*, *Cladosporium*, *Penicillium* и бактерии родов *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Pseudomonas*, некоторые являются потенциально патогенными и аллергенными микроорганизмами.

Атмосферные пылеаэрозоли в городе служат переносчиком микробиологического загрязнения, связанного с фекалиями животных. Обнаружено значительное превышение относительно установленной для почв ПДК санитарно-показательной группы бактерий ТКБ на обоих объектах ( $3.5 \times 10^5$  и  $3.7 \times 10^4$  КОЕ/г). На участке в Хамовниках фекальная загрязненность больше. Вероятно, городские почвы на исследованных участках нельзя рассматривать как эпидемически чистые, если руководствоваться критериями гигиенической оценки качества почвы населенных мест.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Представленное исследование проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-50093) — сбор полевого материала, лабораторная обработка, интерпретация данных и по государственному заданию (№ 0148-2019-0006) — разработка подходов к исследованию состава пылевых выпадений при микроскопических исследованиях, микроскопирование.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ачкасов А.И., Башаркевич И.Л., Варава К.В., Самеев С.Б. Загрязнение снегового покрова под влиянием противогололедных реагентов // Разведка и охрана недр. 2006. № 9–10. С. 132–137.
2. Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П. Водоросли. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. 608 с.
3. Гендугов В.М., Глазунов Г.П. Ветровая эрозия почвы и запыление воздуха. М.: ФИЗМАЛИТ, 2007. 240 с.
4. Гесслер Н.Н., Егорова А.С., Белозерская Т.А. Меланиновые пигменты грибов в экстремальных условиях существования (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2014. Т. 50. № 2. С. 125–132.
5. Глушакова А.М., Лысак Л.В., Умарова А.Б., Прокофьева Т.В., Подушин Ю.В., Быкова Г.С., Малюкова Л.П. Бактериальные комплексы урбаноземов некоторых южных городов России // Почвоведение. 2021. № 2. С. 224–231. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21020052>
6. Добровольская Т.Г. Структура бактериальных сообществ почв. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2002. 282 с.
7. Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>
8. Еланский С.Н., Рыжкин Д.В. Концентрация спор грибов в атмосфере г. Москвы в связи с метеопараметрами // Фитопатология. 1999. Т. 33. Вып. 3. С. 188–192.
9. Иванова А.Е., Марфенина О.Е., Глушакова А.М. Накопление синантропных видов как свойство микробиоты современных и древних городских экосистем // Современная микология в России. Мат-лы 4-го съезда микологов России. М., 2017. Т. 6. С. 212–214. <https://doi.org/10.14427/cmrg.2017.vi.07>
10. Климат, качество атмосферного воздуха и здоровье москвичей / Под. ред. Б.А. Ревича. М.: Адамант, 2006. 255 с.
11. Лысак Л.В., Добровольская Т.Г., Скворцова И.Н. Методы оценки бактериального разнообразия почв и идентификация почвенных бактерий. М.: Макс-пресс, 2003. 120 с.
12. Лысак Л.В., Лапыгина Е.В. Разнообразие бактериальных сообществ городских почв // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1108–1114. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18090071>
13. Манучарова Н.А., Власенко А.Н., Турова Т.П., Пантелеева А.Н., Степанов А.Л., Зенова Г.М. Термофильные микроорганизмы-хитинолитики бурой пустынно-степной почвы // Микробиология. 2008. Т. 77. № 5. С. 683–688.
14. Марфенина О.Е., Колосова Е.Д., Глаголев М.В. Численность грибных диаспор, оседающих из приземного воздуха на участках с разным растительным покровом в г. Москве // Микология и фитопатология. 2016. Т. 50. № 6. С. 379–385.
15. Марфенина О.Е., Макарова Н.В., Иванова А.Е. Оппортунистические грибы в почвах и приземных

- слоях воздуха мегаполиса (на примере района Тушино г. Москвы) // Микология и фитопатология. 2011. Т. 45. Вып. 5. С. 397–407.
16. *Марфенина О.Е., Фомичева Г.М.* Потенциально патогенные мицелиальные грибы в среде обитания человека, современные тенденции // Микология сегодня. М., 2007. Т. 1. С. 235–266.
  17. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М., 1991. 304 с.
  18. Определитель бактерий Берджи / Пер. с англ. под ред. Дж. Хоулта и др. М.: Мир, 1997. Т. 1. 432 с. Т. 2. 368 с.
  19. *Полянская Л.М., Звягинцев Д.Г.* Содержание и структура микробной биомассы как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2003. № 6. С. 706–714.
  20. *Прокофьева Т.В., Шишков В.А., Кирюшин А.В., Калущин И.Ю.* Свойства твердых (пылеаэрозольных) атмосферных выпадений придорожных территорий г. Москвы // Известия РАН. Сер. географическая. 2015. № 3. С. 107–120.
  21. *Розанова М.С., Прокофьева Т.В., Лысак Л.В., Рахлева А.А.* Органическое вещество почв Ботанического сада МГУ им. М.В. Ломоносова на Ленинских Горах // Почвоведение. 2016. № 9. С. 1079–1092.
  22. *Стома Г.В., Манучарова Н.А., Белокопытова Н.А.* Биологическая активность микробных сообществ в почвах некоторых городов России // Почвоведение. 2020. № 6. С. 703–715. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2006012X>
  23. *Степанов А.Л., Манучарова Н.А., Смагин А.В., Курбатова А.С., Мяжкова А.Д., Башкин В.Н.* Характеристика биологической активности микробного комплекса городских почв // Почвоведение. 2005. № 8. С. 978–983.
  24. *Таловская А.В., Язиков Е.Г., Панченко М.В., Козлов В.С.* Мониторинг потоков аэрозольных выпадений в фоновых районах Томской области в зимний период 2006 и 2007 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 6. С. 498–503.
  25. *Тентюков М.П.* Способ выявления кислотного загрязнения приземного слоя атмосферы в зимний период и устройство для его осуществления. Пат. РФ №2012139298/04. Опубликовано 20.12.2013. Бюл. № 35. RU 2 459 191 C1.
  26. *Тентюков М.П.* Способ сбора сухих аэрозолей для контроля окружающей среды и устройство для его осуществления. Пат. РФ № 2314511. Опубликовано 10.01.2008. Бюл. № 1. RU 2314511 C2.
  27. *Язиков Е.Г., Голева Р.В., Рихванов Л.П., Дубинчук В.Т., Шатилов А.Ю.* Минеральный состав пылеаэрозольных выпадений снегового покрова Томской агропромышленной агломерации // Записки ВМО. 2004. № 5. С. 542–546.
  28. *Язиков Е.Г., Шатилов А.Ю.* Состав техногенных составляющих в снеговом покрове по данным микрорентгеноспектрального анализа // Вестник ТГУ. Проблемы геологии и географии Сибири. 2003. № 3. С. 237–239.
  29. *Bauer H., Kasper-Giebl A., Loflund M., Giebl H.* The contribution of bacteria and fungal spores to organic carbon content of cloud water, precipitation and aerosols // Atmospheric Res. 2002. V. 64. P. 109–119.
  30. *Caretta G.* Epidemiology of allergic disease: the fungi // Aerobiologia. 1992. № 8(3). P. 439–445.
  31. CBS Course of Mycology / Eds. W. Gams, E.S. Hoek-sna, A. Aptroot. Wagenigen, 1998. 165 p.
  32. *Cox C.S., Wathes C.M.* Bioaerosols handbook. Florida: CRC Press. Boca Raton, 1995. 623 p.
  33. *Da Costa Duarte A., Oliveira Duarte R.M.B.* Natural organic matter in atmospheric particles // Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems. N.Y.: Wiley, 2009. P. 451–485.
  34. *Després V.R., Huffman J.A., Burrows S.M., Hoose C., Safatov A.S., Buryak G., Fröhlich-Nowoisky J., Elbert W., Andreae M.O., Pöschl U., Jaenicke R.* Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review // Tell. B: Chem. Phys. Meteorology. 2012. V. 64. № 1. P. 1–53.
  35. *Domsh K.H., Gams W., Andersen T.H.* Compendium of soil fungi. London: Academic, 2007. V. 1. 1860 p.
  36. *Itani G., Smith C.* Dust rains deliver diverse assemblages of microorganisms to the Eastern Mediterranean // Sci. Rep. 2016. № 6. P. 22657. <https://doi.org/10.1038/srep22657>
  37. *Fenchel T.* Biogeography for bacteria // Science. 2003. V. 301. № 5635. P. 925–926.
  38. *Fröhlich-Nowoisky J., Burrows S.M., Xie Z., Engling G., Solomon P.A., Fraser M.P., Mayol-Bracero O.L. et al.* Biogeography in the air: fungal diversity over land and oceans // Biogeosciences. 2012. V. 9. P. 1125–1136.
  39. *Górny R.L., Dutkiewicz J., Kryszynska-Traczyk E.* Size distribution of bacterial and fungal bioaerosols in indoor air // Annals Agric. Environ. Medic. 1999. № 6. P. 105–113.
  40. *Griffin D.W., Kellogg C.A., Garrison V.H., Shinn E.A.* The global transport of dust: an intercontinental river of dust, microorganisms and toxic chemicals flows through the Earth's Atmosphere // Am. Scientist. 2002. V. 90. № 3. P. 228–235. <https://www.jstor.org/stable/27857658>
  41. *Hilbig W., Opp C.* The effects of antropogenic impact on plant and soil cover in Mongolia // Halle (Saale). 2005. № 5. P. 163–177.
  42. *Hjelmroos M.* Relationship between airborne fungal spore presence and weather variables: *Cladosporium* and *Alternaria* // Grana. 1993. № 32(1). P. 40–47.
  43. *Hoog de G.S., Guarro J., Gene J., Figueiras M.* Atlas of clinical fungi. Centraalbureau voor Schimmelcultures. Universitat Rovira, I Virgili. Reus, 2000. 1126 p.
  44. *Horner-Devine M.C., Carney K.M., Bohannan J.M.* An ecological perspective on bacterial biodiversity // Proc. R. Soc. Lond. 2004. V. 271. P. 113–122.
  45. *Kaczmarek J., Kedziora A., Brachaczek A., Latunde-Dada A.O., Dakowska S., Karg G., Jedryczka M.* Effect of climate change on sporulation of the teleomorphs of *Leptosphaeria* species causing stem canker of brassicas // Aerobiologia. 2016. V. 32. P. 39–51.
  46. *Kasprzyk I.* Aeromycology – main research fields of interest during the last 25 years // Ann. Agric. Environ. Med. 2008. V. 15. P. 1–7.
  47. *Korneva I.A., Lokoshchenko M.A.* Soil temperature in Moscow and its contemporary variations // Russ. Meteor. Hydroly. 2015. V. 40. № 1. P. 25–33.
  48. *Lokoshchenko M.A., Korneva I.A.* Underground urban heat island below Moscow city // Urban Climate. 2015. V. 13. P. 1–13.

49. Marshall W.A. Seasonality in Antarctic Airborne Fungal Spores // *Appl. Environ. Microbiol.* 1997. V. 63(6). P. 2240–2245.
50. Menendez I., Perez-Chacyn E., Mangas J., Tauler E., Engelbrecht J.P., Derbyshire E., Cana L., Alonso I. Dust deposits on La Graciosa Island (Canary Islands, Spain): texture, mineralogy and a case study of recent dust plume transport // *Catena*. 2014. V. 117. P. 133–144.
51. Millington W.M., Corden J.M. Long term trends in outdoor *Aspergillus/Penicillium* spore concentrations in Derby, UK from 1970 to 2003 and a comparative study in 1994 and 1996 with the indoor air of two local houses // *Aerobiologia*. 2005. V. 21. P. 105–113.
52. Morris C.E., Sands D.C., Bardin M., Jaenicke R., Vogel B. et al. Microbiology and atmospheric processes: an upcoming era of research on bio-meteorology // *Biogeosciences Discussions* // *Eur. Geosci. Union*. 2008. V. 5(1). P. 191–212.
53. Padoan E., Malandrino M., Giacomino A., Grosa M.M., Lollbrigida F., Martini S., Abollino O. Spatial distribution and potential sources of trace elements in PM 10 monitored in urban and rural sites of Piedmont Region // *Chemosphere*. 2016. V. 145. P. 495–507.
54. Prokof'eva T.V., Kiriushin A.V., Shishkov V.A., Ivanikov F.A. The importance of dust material in urban soil formation: the experience on study of two young technosols on dust depositions // *J. Soils Sediments*. 2017. V. 17. P. 515–524. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1546-7>
55. Rathnayake C.M., Metwali N., Baker Z., Jayarathne T., Kostle P.A., Thorne P.S., O'Shaughnessy P.T., Stone E.A. Urban Enhancement of PM10 Bioaerosol Tracers Relative to Background Locations in the Midwestern United States // *J. Geophys. Res. Atmosph.* 2016. V. 121. P. 5071–5089.
56. Rogers C. Outdoor airspora: patterns, prevalence & impacts // XVI Congress of European Mycologists. Halkidiki, 2011. P. 73–82.
57. Sugo T., Okochi H., Uchiyama R. et al. The role of humic-like substances as atmospheric surfactants in the formation of summer-heavy rainfall in downtown Tokyo // *City Environ. Int.* 2019. V. 3. P. 1–11.
58. Twaroch T.E., Curin M., Valenta R., Swoboda I. Mold Allergens in Respiratory Allergy: From Structure to Therapy Allergy // *Allergy, Asthma Immunology Res.* 2015. V. 7. P. 205–220.

## Organic Constituents and Biota in the Urban Atmospheric Solid Aerosols: Potential Effects on Urban Soils

T. V. Prokof'eva<sup>1,\*</sup>, S. A. Shoba<sup>1</sup>, L. V. Lysak<sup>1</sup>, A. E. Ivanova<sup>1,2</sup>, A. M. Glushakova<sup>1,3</sup>, V. A. Shishkov<sup>4</sup>, E. V. Lapygina<sup>1</sup>, P. D. Shilaika<sup>1</sup>, and A. A. Glebova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

<sup>2</sup> Severtsov Institute of Ecology and Evolution., Moscow, 119071 Russia

<sup>3</sup> Mechnikov Research Institute of Vaccines and Sera, Moscow, 105064 Russia

<sup>4</sup> Institute of Geography RAS, Moscow, 119017 Russia

\*e-mail: tatianaprokofieva@yandex.ru

The main components of solid atmospheric aerosol are soil and rock particles raised from the earth's surface as a result of wind erosion processes, and primary biological aerosol particles. In the composition of atmospheric aerosol, many pollutants, both mineral and organic, appear in areas with active human activity. Summer dust-aerosol (solid atmospheric fallouts) that fell out of the atmosphere was collected at two sites in Moscow (the territory of the Leo Tolstoy Museum-Estate in Khamovniki and the Botanical Garden of the Biological Faculty of Moscow State University). Its morphological and microbiological studies were carried out in order to characterize the composition of the organic part of urban solid atmospheric fallouts, and its possible impact on the soils and the urban ecosystem as a whole. It has been found that the composition of the organic part of the samples was identical and included: not only representatives of aeroplankton and other particles of biological origin, but also accumulations of oil films, plastic fibers, carbon particles, etc., which indicates hydrocarbon pollution and microplastic pollution brought from the atmosphere. The composition of the studied groups of microorganisms in atmospheric fallouts and in urban soils is similar and indicates close ecological links between urban dust aerosol and soils. The biomass of the studied groups of microorganisms of atmospheric solids is dominated by fungi, many of which are potentially pathogenic and allergenic organisms. Apparently, atmospheric solid aerosols are the transport of microbiological pollution associated with animal feces in the city. The presence of such particles in the air indicates insufficient soil activity as a "bacterial filter".

**Keywords:** primary biological aerosol particles, OR allergenic and opportunistic fungi, sanitary-indicative microorganisms, microplastic, urban ecotystems