

УДК 551.510.42:620.187:544.774

МОРФОЛОГИЯ ЧАСТИЦ БИОАЭРОЗОЛЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА

© 2023 г. Д. П. Губанова^{1,*}, Н. В. Садовская², А. А. Виноградова¹, М. А. Иорданский¹

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 17.11.2022 г.

Поступило 01.12.2022 г.

После доработки 08.12.2022 г.

Принято к публикации 09.12.2022 г.

Методом сканирующей электронной микроскопии исследованы морфологические свойства биогенных частиц в составе приземного аэрозоля в Москве. Обобщены результаты анализа аэрозольных проб, отобранных в 2019–2022 г. в рамках комплексного эксперимента в ИФА РАН по изучению изменчивости физико-химических свойств аэрозольных частиц в различных синоптико-метеорологических условиях. Выявлены основные типы частиц приземных биоаэрозолей, определены их форма и размер. Впервые в натурных наблюдениях морфологических характеристик приземного аэрозоля в Москве идентифицированы брохосомы.

Ключевые слова: морфологическая структура, первичный биологический атмосферный аэрозоль, анализ отдельных частиц, сканирующая электронная микроскопия, атмосфера, Москва

DOI: 10.31857/S2686739723700093, **EDN:** NZYEJA

ВВЕДЕНИЕ

Биологические аэрозольные частицы (биоаэрозоли) играют решающую роль в системе взаимодействия биофизических элементов Земли (литосферы, гидросферы и атмосферы) [1–7]. Первичные биоаэрозоли (ПБА) представляют собой подмножество частиц биогенного происхождения, выбрасываемых непосредственно в атмосферу, и включают живые и мертвые организмы (водоросли, археи, бактерии и др.), дисперсионные единицы (грибковые споры, пыльца растений) и различные фрагменты или выделения. ПБА характеризуются разнообразной формой и структурой, а их размеры сильно изменчивы (от ультрадисперсной до грубодисперсной фракции аэрозолей) [2]. ПБА вносят значительный вклад в глобальную эмиссию всех типов аэрозолей. Выбросы первичных биогенных частиц составляют около 1000 Тг в год, в то время как выбросы морской соли оцениваются в 3300 Тг, а минеральной пыли – 2000 Тг [4]. Такие биогенные частицы, как микробные патогены, аллергены и микробные компоненты, например, эндотоксины, ми-

котоксины и глюканы, оказывают инфекционное, аллергическое или токсическое воздействие на живые организмы, воздействуя на здоровье населения и сельское хозяйство в местном, региональном и глобальном масштабах. Многие патогены растений, животных и человека способны переноситься с воздушными массами на большие расстояния, распространяя болезни по континентам и между ними [2]. Первичные биоаэрозоли участвуют в глобальных круговоротах углерода, азота, серы и фосфора; в облакообразовании, формировании и выпадении осадков; в гетерогенных и многофазных физико-химических атмосферных процессах и потенциально оказывают влияние на изменение климата [1–7]. Специфику протекания атмосферных гетерогенных процессов и изменение химического состава, радиационных и оптических характеристик атмосферы обуславливает реакционная способность первичных биологических аэрозольных частиц. ПБА принципиально отличаются от неорганических аэрозолей, они более сложны, многообразны по размеру и форме, несут различные функциональные группы, по-разному реагируют на резкие изменения условий в атмосфере, таких как относительная влажность, температура и химическая активность малых газовых составляющих [4]. Установлено, что биоаэрозоли более эффективно и легко, чем большинство других типов аэрозольных частиц, вступают в реакции в качестве ядер конденсации облаков или ядер льда. Крупные ПБА (зёрна пыльцы, споры грибов)

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской академии наук, Москва, Россия

² Федеральный научно-исследовательский центр
“Кристаллография и фотоника”
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: gubanova@ifaran.ru

способны действовать как гигантские ядра конденсации облаков [1–5].

Реакционная способность ПБА, как и других аэрозольных частиц, связана с их морфологической структурой [4–6]. В последние годы, благодаря развитию аналитических методов и приборов, мировым научным сообществом стало уделяться большее внимание исследованию характеристик биоаэрозолей, в том числе морфологических [5–9]. Однако публикации отечественных исследователей на эту тему немного (например, [10, 11]), а статьи, посвященные морфологии атмосферных ПБА, практически отсутствуют.

В настоящей работе предпринята попытка выполнения данного пробела. Рассмотрены обобщенные результаты морфологического анализа частиц ПБА в составе приземного аэрозоля Московского мегаполиса, описаны основные типы идентифицированных биогенных частиц и особенности их морфологической структуры.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Морфологию ПБА изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения с автоэмиссионным катодом JSM 7500F фирмы “JEOL” (Япония). Микроскопические методы анализа нашли широкое применение при исследовании аэрозольных частиц различного происхождения, включая биогенные частицы [12, 13]. СЭМ — один из самых распространенных микроскопических методов, который в сочетании с методом рентгеноспектрального микроанализа позволяет определять не только морфологическую структуру, но и элементный состав аэрозольных частиц [6–9].

Элементный состав определяли с использованием аналитической приставки к сканирующему электронному микроскопу — энергодисперсионного микроанализатора INCA Penta FET-x3 фирмы “OXFORD INSTRUMENTS” (Великобритания). В результате сканирования образца электронным пучком получали ЭДС-спектры отдельных частиц [13].

Отбор аэрозольных проб на морфологический анализ осуществляли в 2019–2022 гг. в рамках комплексного натурного эксперимента по исследованию изменчивости физико-химических характеристик приземного аэрозоля, проводимого в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) и описанного в [14, 15]. Пункт отбора проб находился во дворе ИФА РАН, расположенного в административно-деловом и культурном центре столицы (Москва, Пыжевский пер., д. 3). Территория данного района сложена урбаноземами с искусственной интродуцированной растительностью. Значительные пло-

щади запечатаны дорожным покрытием и городской застройкой, незапечатанные участки составляют от 3 до 5%. Район характеризуется наличием густой сети дорог с малым и средним автотранспортным трафиком, проложенных вдоль улиц и переулков. В непосредственной близости от места отбора проб произрастает небольшое количество старых деревьев, двор ИФА РАН запечатан асфальтовым покрытием.

За весь период наблюдений в разные сезоны было отобрано 189 проб аэрозоля на гидрофобные мембранные фильтры из политетрафторэтилена или волокнистые фильтры из ткани Петрянова с помощью малообъемного пробоотборника воздуха на высоте 2 м от подстилающей поверхности. Время отбора проб составляло от 12 до 24 ч в разные дни в зависимости от сезона, синоптической обстановки и метеорологических условий.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование морфологической структуры и состава частиц приземного аэрозоля позволило определить их природу. Наряду с твердыми минеральными частицами, а также частицами антропогенного происхождения, содержащими металлы, серу и углерод, в пробах, преимущественно в теплое время года (апрель–октябрь), были выявлены биогенные частицы разных типов. Они относятся к группе органических аэрозолей и состоят в основном из углерода и кислорода. В следовом количестве в некоторых частицах биоаэрозолей присутствовали минеральные элементы (Na, Mg, Ca, K, Al, Fe, Si) и элементы преимущественно антропогенной природы (S, P, Pb и Cu) [14, 15].

Споры и конидии грибов. Споры и конидии грибов — наиболее распространенный из типов частиц ПБА, выявленных в разные годы в летних пробах (рис. 1), в период основной активности их размножения в Московском регионе. Споры и конидии выбрасываются грибами в струях жидкости или каплями (эффекты осмотического давления и поверхностного натяжения), но возможно отделение сухих спор ветром или под действием другим внешних сил [3, 8, 16]. Концентрация спор, выделяемых сухим способом, как правило, возрастает в теплую, сухую погоду, в то время как количество спор, выделяемых влажным способом, увеличивается во влажных условиях, в ночные и ранние утренние часы. Поэтому возможно наличие взаимосвязи между процессами эмиссии/рассеивания спор и различными метеорологическими параметрами [3].

Диаметр спор грибов может варьировать в диапазоне 1–50 мкм в зависимости от биологического вида, возраста и условий окружающей среды [2, 3]. Идентифицированные в пробах приземного аэрозоля в Москве споры и конидии грибов ха-

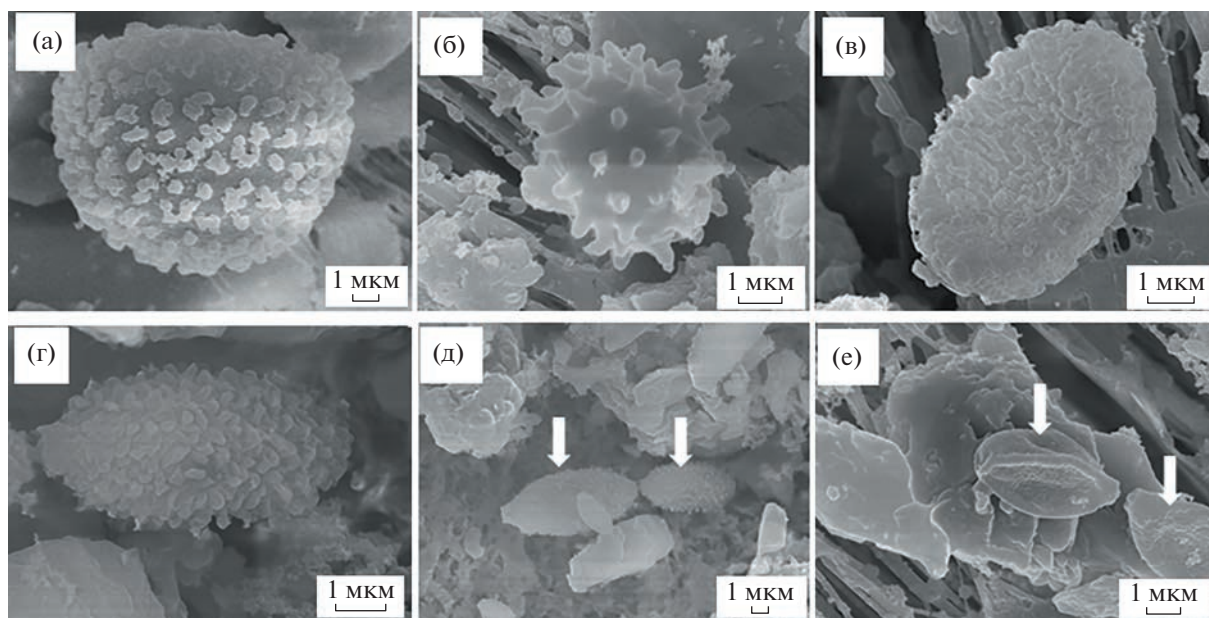


Рис. 1. СЭМ-изображения спор различных видов грибов. На микрофотографиях (д) и (е) показаны цепочки из пар конидий.

рактизовались средним размером 4–7 мкм. Кроме того, были обнаружены конидии, объединенные в пары (рис. 1 д, е). Способность спор грибов объединяться в длинные цепочки определяет их аэродинамический диаметр. Данный параметр обуславливает время жизни этих биогенных частиц в атмосфере и способность их осаждения в дыхательных путях и в легких человека [3].

Счетная и массовая концентрация грибковых спор в воздухе континентального пограничного слоя оцениваются соответственно в $\approx 10^4 \text{ м}^{-3}$ и 1 мкг/м^3 . На их долю приходится до 10% органического углерода и 5% аэрозольных частиц PM_{10} в городах и пригородах [3].

Пыльца. Зёрна пыльцы являются вторым по распространенности и одним из самых крупных по размеру (до 100 мкм) типов ПБА. В приземном слое атмосферы Московского мегаполиса наибольшее количество зёрен пыльцы было обнаружено в весенних пробах (рис. 2), что связано со спецификой вегетационного периода растительности. Зёрна пыльцы могут иметь различную форму и твердую оболочку и существовать как ПБА в виде целых единиц или фрагментов. При высокой влажности они способны разрываться на фрагменты размером 30 нм – 5 мкм. Особенности рассеивания пыльцевых зёрен в атмосфере зависят от метеорологических условий (влажность, температура, ветер, осадки). Присутствие пыльцы в воздухе четко соответствует сезонному циклу, связанному с сезонами цветения растительных источников. Кроме того, для пыльцы, как и для спор грибов, характерен определен-

ный суточный ход. Пыльцевые зёрна, как ПБА крупных размеров, обычно имеют короткое время жизни. Однако при определенных условиях они способны подниматься на большие высоты, достигая значений концентрации, соизмеримых с величиной концентрации ледяных ядер, и участвовать в процессах зарождения льда [3].

Фрагменты и выделения живых организмов. В теплые сезоны в пробах приземного аэрозоля в Москве были обнаружены и другие типы ПБА. Самыми крупными из них по размерам (20–40 мкм) оказались плоские чешуйки насекомых (рис. 3 а), выявленные в приземном слое атмосферы Московского мегаполиса весной 2021 г. Чешуйки насекомых являются довольно распространенными первичными биогенными частицами в атмосфере городов [8, 16]. Летом 2021 г. в составе приземных аэрозольных частиц в Москве был идентифицирован достаточно редкий для данного исследования тип ПБА – эпикутикулярный воск растения (рис. 3 б). Это восковое покрытие на внешней поверхности кутикулы растений, предназначенное для формирования ультрагидрофобной и самоочищающейся поверхности. Эпикутикулярный воск преимущественно состоит из алифатических углеводородов, содержащих различные функциональные группы и образует двух- и трехмерные структуры. Наиболее распространенными морфологическими типами эпикутикулярного воска являются тонкие пленки и несколько трехмерных структур: массивные корки, гранулы, пластинки, нити, стержни и полые трубочки. Размеры этих морфологических структур обычно изменяются в

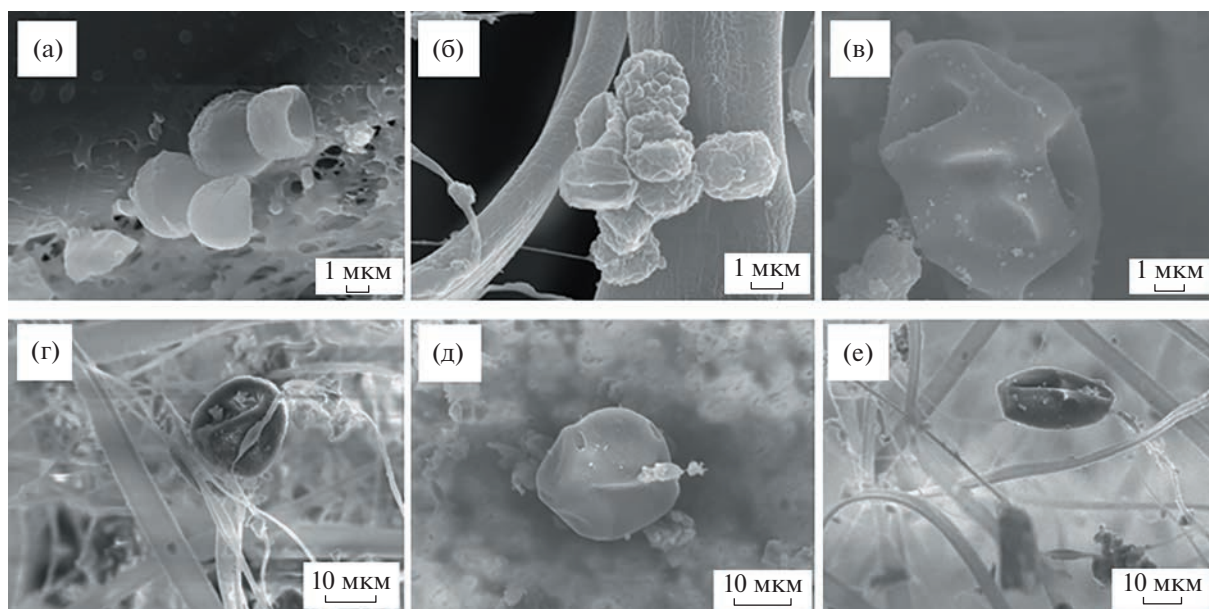


Рис. 2. СЭМ-изображения различных форм пыльцевых зёрен.

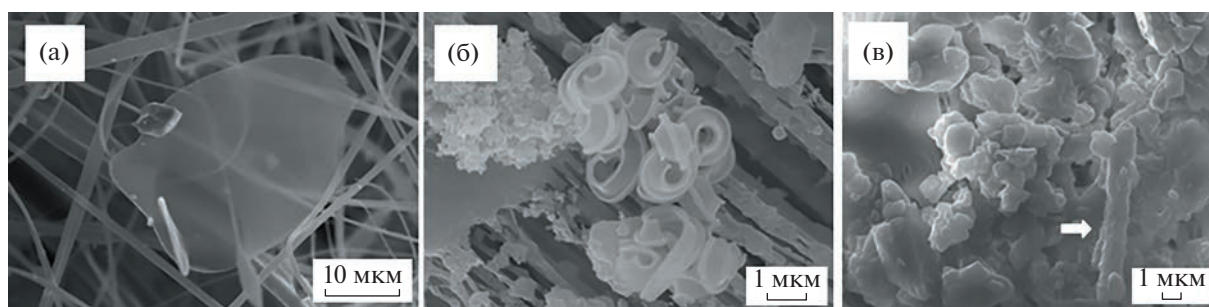


Рис. 3. СЭМ-изображения некоторых других видов ПБА: (а) — плоская чешуйка насекомого, (б) — эпикуткулярный воск растения, (в) — растительное волокно.

диапазоне 0.2–100 мкм [17]. В рамках настоящей работы идентифицирован эпикуткулярный воск в форме, напоминающей макаронные изделия (рис. 3 б). Такую же морфологическую структуру наблюдали и авторы [16].

В биосфере существует и много других биогенных частиц, из которых один из самых больших вкладов в общую массовую концентрацию ПБА вносят фрагменты растений, в том числе растительные волокна (рис. 3 в). Зачастую достоверно определить такие ПБА и другие органические вещества затруднительно, поскольку растительные материалы в конечном итоге могут быть расщеплены на гуминоподобные вещества путем окислительной модификации и деградации биополимеров [17].

Брохосомы. Это самый примечательный тип ПБА, обнаруженных в составе приземного аэрозоля в Московском мегаполисе. И, хотя они отно-

сятся к выделениям живых организмов, в данной работе рассмотрены отдельно. Брохосомы представляют собой квазисферические полые пористые образования размером 200–700 нм, выделяемые полужесткокрылыми насекомыми семейства цикадок (*Cicadellidae*) из белков и жиров [18]. Подобно растениям, вырабатывающим эпикуткулярный воск с целью защитных функций, выделяемые цикадками брохосомы являются супергидрофобными и служат для защиты от воды и загрязнений поверхностей крыльев, тела и отложенных яиц насекомых, а также препятствием для отражения света при маскировке их от хищников. Замечательность брохосом заключается в том, что большинство из них [20] имеют форму, подобную молекулярной структуре фуллерена C_{60} [19], представляющей собой полуправильный многогранник (усеченный икосаэдр) (рис. 4 а). Размеры геометрически подобных струк-

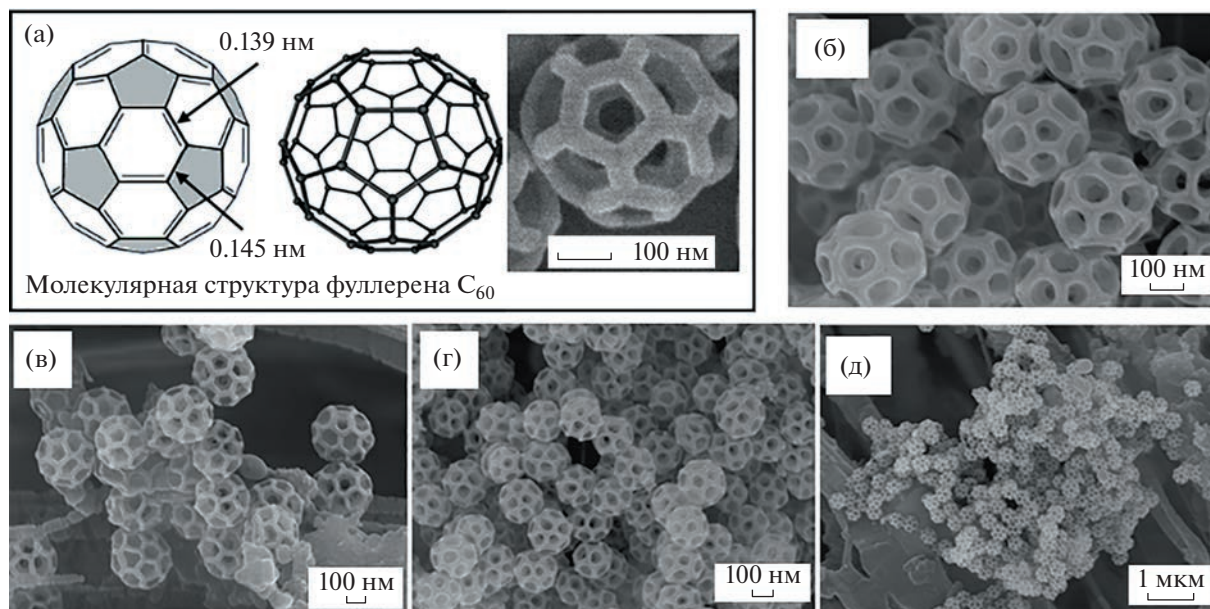


Рис. 4. Брохосомы: (а) — сравнение молекулярной структуры фуллерена C_{60} с брохосомой (справа), (б)—(д) — СЭМ-изображения агломератов брохосом в аэрозольных пробах, полученных во время наблюдений в Москве в июне—июле 2021 г.

тур брохосом и фуллерена C_{60} значительно отличаются, однако в литературе брохосомы называют “биологическими фуллеренами”. Брохосомы, обнаруженные в аэрозольных пробах в Москве летом 2021 г. (рис. 4 б—д), характеризуются размерами около 200–400 нм, в то время как размер молекулы фуллерена C_{60} значительно (более, чем на 2 порядка) меньше. Согласно экспериментальным и расчетным данным [19], длина двойной связи в углеродном каркасе молекулы C_{60} составляет 0.139 нм, а одинарной — 0.145 нм (рис. 4 а). Следует отметить специфическую особенность идентифицированных брохосом: в атмосфере они распространяются в виде больших агломера-

тов (замысловатых цепочек и рыхлых агрегатов подобно фрактальным кластерам частиц сажи). Кроме того, в аэрозольных пробах они обнаружены на поверхности или при непосредственном соприкосновении с более крупными минеральными частицами или их агломератами, как видно из рис. 5. Благодаря широкому распространению и обитанию сотни различных видов цикадок на кустарниках и деревьях (сирень, роза, липа, берёза, тополь и др.), в теплое время года в приземном слое атмосферы в составе аэрозольных частиц находится огромное количество выделяемых насекомыми брохосом и их агломератов, в том числе в городских условиях. Однако в публикациях зарубежных ученых, экспериментально изучающих морфологию приземных аэрозолей, сведения о брохосомах немногочисленны (например, в [8, 10, 17]). И нами брохосомы были обнаружены только в июне-июле 2021 г. в четырех из двадцати одной пробы, отобранной в этом сезоне. Других отечественных работ на эту тему авторами данной статьи не найдено. В этом смысле настоящее исследование является пионерским.

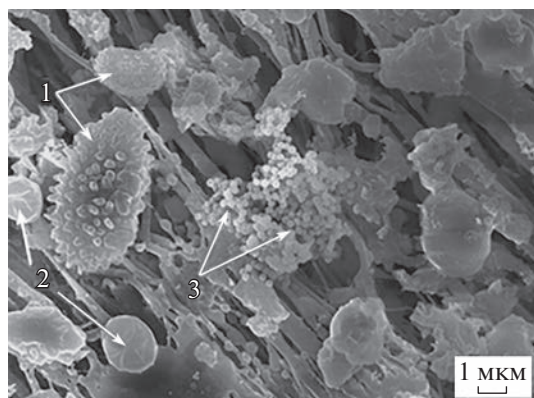


Рис. 5. Сравнение форм и размеров разных видов ПБА: 1 — конидии грибов, 2 — пыльцевые зёрна, 3 — агломерат брохосом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом СЭМ по данным многолетних наблюдений (2019–2022 гг.) исследована морфология частиц первичных биологических аэрозолей, содержащихся в приземном слое атмосферы Московского мегаполиса, и выявлены основные типы ПБА, их формы и размеры. В весенний период наибольшее количество обнаруженных ча-

стиц ПБА составляют пыльцевые зерна, в летний период — споры и конидии грибов. Кроме того, в аэрозольных пробах в теплое время года установлено наличие фрагментов и выделений живых организмов. Новым результатом в исследованиях отечественных ученых является идентификация в составе приземного аэрозоля в Москве агломератов “биологического фуллерена” — брохосом.

Частицы ПБА характеризуются сезонной и суточной цикличностью, а специфика их эмиссии, переноса и трансформации во многом зависит от метеорологических параметров. Климатические изменения могут привести к смещению или изменению длительности сезонной активности ПБА, что может повлиять на активность и вклад биогенных частиц в различные атмосферные процессы. Кроме того, такие ПБА, как пыльца и грибные споры, могут оказывать негативное воздействие на здоровье и жизнедеятельность человека. В частности, аллергенный потенциал этих биоаэрозолей может быть усилен при их активном участии в гетерогенных реакциях с газовыми примесями атмосферы. Частицы ПБА охватывают чрезвычайно широкий спектр размеров, очень сложны и разнообразны по морфологической структуре, сведений о которой в литературных источниках все еще недостаточно. Результаты, полученные в данной работе, призваны отчасти восполнить данный пробел и будут полезны при исследовании физико-химических свойств ПБА и изучении их роли в развитии, эволюции и динамике экосистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят академика РАН Г.С. Голицына за интерес к работе и полезные советы. Авторы выражают глубокую признательность В.И. Корепанову (Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН) и Р.А. Ракитову (Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН) за ценные консультации в поисковых исследованиях и при интерпретации данных морфологического анализа биоаэрозолей, способствовавших завершению процесса идентификации брохосом.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственных заданий ИФА им. А.М. Обухова РАН и ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН (морфологический анализ аэрозольных проб методом СЭМ, интерпретация данных и идентификация частиц ПБА), а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 19-05-50088 Микромир (подготовка и отбор проб для исследования морфологической структуры аэрозольных частиц).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hu W., Wang Z., Huang S., et al. Biological Aerosol Particles in Polluted Regions // Curr. Pollution Rep. 2020. V. 6. P. 65–89. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00138-4>
2. Fröhlich-Nowoisky J., Kampf C.J., Weber B., et al. Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions // Atm. Res. 2016. V. 182. P. 346–376. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.018>
3. Després V.R., Huffman J.A., Burrows S.M., et al. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2012. V. 64:1. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.15598>
4. Estillore A.D., Trueblood J.V., Grassian V.H. Atmospheric chemistry of bioaerosols: heterogeneous and multiphase reactions with atmospheric oxidants and other trace gases // Chem. Sci. 2016. V. 7. № 11. P. 6604–6616. <https://doi.org/10.1039/c6sc02353c>
5. Deguillaume L., Leriche M., Amato P., et al. Microbiology and atmospheric processes: chemical interactions of primary biological aerosols // Biogeosciences. 2008. V. 5. P. 1073–1084. <https://doi.org/10.5194/bg-5-1073-2008>
6. Pumkaro P., Takahashi J., Iwahashi H. Detection and monitoring of insect traces in bioaerosols // Peer J. 2021. V. 9:e10862. <https://doi.org/10.7717/peerj.10862>
7. Xie W., Li Y., Bai W., et al. The source and transport of bioaerosols in the air: A review // Front. Environ. Sci. Eng. 2021. V. 15. P. 44. <https://doi.org/10.1007/s11783-020-1336-8>
8. Coz E., Artíñano B., Clark L.M., et al. Characterization of fine primary biogenic organic aerosol in an urban area in the northeastern United States // Atmos. Environ. 2010. V. 44. № 32. P. 3952–3962. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.07.007>
9. Kang E., Park I., Lee Y.J., et al. Characterization of Atmospheric Particles in Seoul, Korea Using SEM-EDX // J. Nanosci. Nanotechnol. 2012. № 7. P. 6016–21. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6394>
10. Бородулин А.И., Сафатов А.С., Белан Б.Д., Панченко М.В. О статистике концентрации тропосферного аэрозоля // ДАН. 2002. Т. 385. № 1. С. 113–115;
11. Андреева И.С., Сафатов А.С., Пучкова Л.И. и др. Разнообразие и биотехнологический потенциал спорообразующих бактерий атмосферных аэрозолей юга Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 6 (389). С. 408–413. <https://doi.org/10.15372/AOO20210603>
12. Pósfai M., Buseck P.R. Nature and Climate Effects of Individual Tropospheric Aerosol Particles // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2010. V. 38. P. 17–43. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100032>
13. Sielicki P., Janik H., Guzman A., et al. The Progress in Electron Microscopy Studies of Particulate Matters to Be Used as a Standard Monitoring Method for Air // Crit. Rev. Anal. Chem. 2011. V. 41. P. 314–334. <https://doi.org/10.1080/10408347.2011.607076>

14. Gubanova D.P., Vinogradova A.A., Iordanskii M.A., Skorokhod A.I. Variability of Near-Surface Aerosol Composition in Moscow in 2020–2021: Episodes of Extreme Air Pollution of Different Genesis // *Atmosphere*. 2022. V. 13. 574.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040574>
15. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года // *Изв. РАН. ФАО*. 2021. Т. 57. № 3. С. 334–348.
<https://doi.org/10.31857/S0002351521030056>
16. Wittmaack K., Wehnes H., Heinzmann U., Agerer R. An overview on bioaerosols viewed by scanning electron microscopy // *Sci. Total Environ*. 2005. V. 346. No 1–3. P. 244–255.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.009>
17. Koch K., Ensikat H.-J. The hydrophobic coatings of plant surfaces: Epicuticular wax crystals and their morphologies, crystallinity and molecular self-assembly // *Micron*. 2008. V. 39. № 7. P. 759–772.
<https://doi.org/10.1016/j.micron.2007.11.010>
18. Rakitov R., Gorb S.N. Brochosomal coats turn leafhopper (Insecta, Hemiptera, Cicadellidae) integument to superhydrophobic state // *Proc. R. Soc. B* V. 280. P. 20122391.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2391>
19. Трошин П.А., Любовская Р.Н. Органическая химия фуллеренов: основные реакции, типы соединений фуллеренов и перспективы их практического использования // *Успехи химии*. 2008. Т. 77. № 4. С. 323–369.
20. Войтеховский Ю.Л., Степенищikov Д.Г. Брехосомы – биологические фуллерены // *Математические исследования в естественных науках. Труды XV Всероссийской научной школы*. 2018. Т. 15. С. 150–152.
<https://doi.org/10.31241/MIEN.2018.15.20>

MORPHOLOGY OF BIOAEROSOL PARTICLES IN THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE OF MOSCOW METROPOLIS

D. P. Gubanova^{a, #}, N. V. Sadovskaya^b, A. A. Vinogradova^a, and M. A. Iordanskii^a

^a A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Federal Scientific Research Centre “Crystallography and Photonics” Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

[#] E-mail: gubanova@ifaran.ru

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn November 17, 2022

Morphological properties of biogenic particles in the near-surface aerosol composition were studied by scanning electron microscopy in Moscow. We analyze the results of complex experiment conducted in 2019–2022 at the IAP RAS to study the variability of aerosol physico-chemical properties in a large city under various weather conditions. The main types of bioaerosol particles were determined, as well as their shape and size. For the first time, brochosomes were detected in the surface aerosol in Moscow during field aerosol observations.

Keywords: morphological structure, primary biological atmospheric aerosol, individual particle analysis, scanning electron microscopy, atmosphere, Moscow