

- бекистана. Т. 1. Мучнисторосяные грибы. – Ташкент: “Фан”, 1983. – 364 с.
4. Дудка И.А., Вассер С.П., Элланская И.А., и др. Методы экспериментальной микологии. Справочник Киев «Наукова Думка», 1982.
  5. Камилов Ш.Г. Грибы сосудистых растений Ботанического сада АН Узбекистана им. Ф.Н.Русанова.: Автореф. дис.канд.биол.наук.– Ташкент, 1991. – 22 с.
  6. Ячевский А.А. Карманный определитель грибов. Вып. 2. Мучнисторосянные грибы. – Л., 1927. – 630 с.
  7. <http://www.indexfungorum.org/>
  8. <http://www.plantsoftheworldonline.org/>

## К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕГРИРУЕМОСТИ МЕТОДОВ АЭРОЗОЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ И КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИИ СПОР РАЗЛИЧНЫХ ТАКСОНОМИЧЕСКИХ ГРУПП ГРИБОВ: ОТ IN SITU МОРФОМЕТРИИ ДО АЭРОЗОЛЬНОЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО МИКРОАНАЛИЗА

**Орехов Ф.К.<sup>1</sup>, Градов О.В.<sup>1</sup>, Жуланов Ю.В.<sup>2,3</sup>, Макаев П.Ю.<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup> ФИЦ ХФ РАН им. Н.Н. Семенова РАН, Москва

<sup>2</sup> ИФА РАН им. А. М. Обухова РАН, Москва

<sup>3</sup> НИФХИ им. Л. Я. Карпова, Москва

Существенную проблему современного экологического мониторинга составляет, как правило, непрерывный анализ эмиссии спор грибов, распространяющихся в аэрозольной и форме [1,2]. Обычно проблема решается методами измерений с флуоресцентной меткой, а также методами автоматизированной микроскопии (зачастую также флуоресцентной), при условии дальнейшей обработки видеопотока и выявления числа спор данной таксономии с использованием контурного анализа (например – оператором Собеля-Фельдмана, etc.) или текстурного анализа (например – битовые карты энтропии, контраста, энергии под разным углом вращения) [3,4]. Реже осуществляются аэродинамические измерения, но результаты этих измерений зависят от влажности [5], что коррелирует с жизнеспособностью спор, так как для многих типов спор с ней коррелирует «обводненность» или гидратация оболочки / наличие связанной воды в периферических слоях клеточной стенки. Поэтому анализаторы аэрозольных форм спор нередко можно интегрировать с жидкостными счётчиками, доведя их тем самым до универсализма по возможным средам обитания / нахождения образца [6]. Это хорошо совпадает с конструктивной идеологией аэрогидродинамической жидкостной и аэрозольной цитометрии на базе специализированных универсальных счётчиков [7]. Это направление работ, однако, не может считаться полноценным без определения «химизма», то есть состава и корреляционной зависимости параметров детектируемых спор и условий их существования. Так, в предпоследней цитируемой работе рассматривается вклад спор в атмосферный аэрозольный баланс, причём учитывается как вклад собственных углеводов, так и вклад неорганических ионов, а в работе [8] указывается на вклад спор грибов в содержание органического углерода в атмосфере (теоретически, в определенной мере, экстраполируемо и на субстратосферное пространство, в целом). Итак, являясь компонентом биоаэрозолей, споры способны влиять на химию атмосферы, углеродный баланс и (микро-)климат. Они могут являться центрами конденсации атмосферной влаги, участвуя в процессах дифференциальной седиментации, перемещаться вместе с морскими и пресноводными аэрозолями, а значит – к ним разумно, экстраполируя подходы физики аэродисперсных систем, применить методы анализа таких систем в процессах конденсации [9], седиментации [10], электростатической подвижности капельно-дисперсных аэрозолей в естественных

гидрологических условиях [11,12]. Они, в соответствии с [13], обеспечивают возможность «осуществления анализа аэродисперсных систем по физико-химическому составу», так как «одновременное измерение амплитуды и размера ... частиц ... создает возможность для классификации» (спор) «... по коэффициенту преломления, [то есть] по физико-химическому составу». Однако прямой биохимической / микроаналитической идентификации состава спор получить таким образом невозможно. В силу этого, необходимо инструментально интегрировать методы аэродисперсного анализа на рефрактометрических принципах с иными методами контроля химического состава при прокачке атмосферного воздуха через единый аппарат.

Нами предлагается интеграция аэрозольно-спектрометрических техник спорометрии, применимых в реальной среде, *in situ*, с рядом известных аналитических техник. В рамках идеологии интеграции методов, базирующихся на светорассеянии, и масс-спектрометрии, сопряженной с забором образца из аэрозольной фазы [14], предлагается контролировать в реальном времени (одновременно с измерением размеров аэрозольных частиц) органику в составе спор (и «частиц-кандидатов» на роль спор в выборке аэрозольных частиц) [15,16]. В частности, представляется возможным применение лазерных техник ионизации [17,18]. Для анализа элементного и изотопного (изотопы элементов вызывают расширение и даже полное расщепление некоторых спектральных линий) состава предлагается использовать, кроме ICP-MS, методы атомно-эмиссионной или атомно-абсорбционной спектрометрии с прямым вводом пробы (как и в аэрозольной MS [19]) с развёрткой по длинам волн или на фиксированных длинах волн для выявления отдельных элементов [20,21]. Применение *in situ* методов MS-имэджинга для анализа одиночных частиц также может быть полезным. При этом следует отметить, что оптимальность оптических методов MS-ионизации [18], а также применимость ряда методов оптической спектрометрии в случае анализаторов спор, основанных на оптических источниках, может обуславливаться мультиплексируемостью всех (или существенной части) подобных методов с использованием методов оптического подсчета и анализа свойств спорных частиц, в том числе с машинным обучением анализу спор по эталонным выборкам.

## Список литературы

1. Pyrri I., Kapsanaki-Gotsi E. Evaluation of the fungal aerosol in Athens, Greece, based on spore analysis // *Aerobiologia*. – 2015. – V. 31. – Iss. 2. – P. 179-190.
2. Löbs N., Barbosa C.G.G., Brill S., Walter D., Ditas F., de Oliveira Sá M., de Araújo A.C., de Oliveira L.R., Godoi R.H.M., Wolff S., Piepenbring M., Kesselmeier J., Artaxo P., Andreae M.O., Pöschl U., Pöhlker C., Weber B. Aerosol measurement methods to quantify spore emissions from fungi and cryptogamic covers in the Amazon // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2020. – V. 13. – Iss. 1. – P. 153-164.
3. Hummel M., Hoose C., Gallagher M., Healy D.A., Huffman J.A., O'Connor D., Pöschl U., Pöhlker C., Robinson N.H., Schnaiter M., Sodeau J.R., Stengel M., Toprak E., Vogel H. Regional-scale simulations of fungal spore aerosols using an emission parameterization adapted to local measurements of fluorescent biological aerosol particles // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2015. – V. 15. – Iss. 11. – P. 6127-6146.
4. Wagner J., Macher J. Automated spore measurements using microscopy, image analysis, and peak recognition of near-monodisperse aerosols // *Aerosol Science and Technology*. – 2012. – V. 46. – Iss. 8. – P. 862-873.
5. Madelin T. M., Johnson H. E. Fungal and actinomycete spore aerosols measured at different humidities with an aerodynamic particle sizer // *Journal of applied bacteriology*. – 1992. – V. 72. – Iss. 5. – P. 400-409.
6. Elbert W., Taylor P.E., Andreae M.O., Pöschl U. Contribution of fungi to primary biogenic aerosols in the atmosphere: wet and dry discharged spores, carbohydrates, and inorganic ions // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2007. – V. 7. – Iss. 17. – P. 4569-4588.
7. Zhulanov Y. V., Makaveev P. Y., Gradov O. V. Towards the aerosol cytometry and hydrosol cytometry based on laser aerosol spectrometers // *IEEE DataPort*. — 2018. — ID: NJAK-QR29.
8. Bauer H., Kasper-Giebl A., Löflund M., Giebl H., Hitzemberger R., Zibuschka F., Puxbaum H. The contribution of bacteria and fungal spores to the organic carbon content of cloud water, precipitation and aerosols // *Atmospheric Research*. – 2002. – V. 64. – Iss. 1-4. – P. 109-119.
9. Жуланов Ю. В., Петрянов И. В., Садовский Б. Ф. Лазерный фотоэлектрический спектрометр больших ядер конденсации // *Физика атмосферы и океана*. — 1978. — Т. 14, № 6. — С. 520-526.
10. Zhulanov Y. V. Sedimentation method for calibrating photoelectric aerosol counters // *Measurement Techniques*. — 1979. — Vol. 22, no. 9. — P. 1138-1139.
11. Жуланов Ю. В., Петрянов И. В. Исследование механизма генерации морских аэрозолей // *Доклады Академии наук*. — 1980. — Т. 253, № 4. — С. 845-848.
12. Жуланов Ю.В., Садовский Б.Ф., Никитин О.Н., Петрянов И.В. Исследование морских субмикронных аэрозолей // *Доклады Академии наук*. — 1978. — Т. 242, № 4. — С. 800-803.
13. Жуланов Ю. В., Садовский Б. Ф., Петрянов И. В. О возможностях оптического метода анализа аэродисперсных систем // *Доклады Академии наук*. — 1978. — Т. 240, № 1. — С. 51-53.
14. Cross E.S., Slowik J.G., Davidovits P., Allan J.D., Worsnop D.R., Jayne J.T., Lewis D.K., Canagaratna M., Onasch T. B. Laboratory and ambient particle density determinations using light scattering in conjunction with aerosol mass spectrometry // *Aerosol Science and Technology*. – 2007. – V. 41. – Iss. 4. – P. 343-359.
15. Xu J., He J., Xu H., Ji D., Snape C., Yu H., Jia C., Wang C., Gao J. Simultaneous measurement of multiple organic tracers in fine aerosols from biomass burning and fungal spores by HPLC-MS/MS // *RSC advances*. – 2018. – V. 8. – Iss. 59. – P. 34136-34150.
16. Zhang Q., Jimenez J.L., Canagaratna M.R., Ulbrich I.M., Ng N.L., Worsnop D.R., Sun Y. Understanding atmospheric organic aerosols via factor analysis of aerosol mass spectrometry: a review // *Analytical and bioanalytical chemistry*. – 2011. – V. 401. – Iss. 10. – P. 3045-3067.
17. Stowers M.A., van Wuijckhuijse A.L., Marijnissen J.C.M., Kientz C. E. Bioaerosol Preselection for Aerosol MALDI Mass Spectrometry // *Journal of Aerosol Science*. – 2003. – V. 2. – P. S947-S948.
18. Zang X., Zhang Z., Jiang S., Zhao Y., Wang T., Wang C., Li G., Xie H., Yang J., Wu G., Zhang W., Shu J., Fan H., Yang X., Jiang L. Aerosol mass spectrometry of neutral species based on a tunable vacuum ultraviolet free electron laser // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2022. – V. 24. – Iss. 27. – P. 16484-16492.
19. Johnston M. V. Sampling and analysis of individual particles by aerosol mass spectrometry // *Journal of Mass Spectrometry*. – 2000. – V. 35. – Iss. 5. – P. 585-595.
20. Nash D. G., Baer T., Johnston M. V. Aerosol mass spectrometry: An introductory review // *International Journal of Mass Spectrometry*. – 2006. – V. 258. – Iss. 1-3. – P. 2-12.
21. Kawaguchi H., Nomizu T., Tanaka T., Kaneco S. Direct analysis of aerosol particles by atomic emission and mass spectrometry // *Analytical Science and Technology*. – 1995. – V. 8. – Iss. 4. – P. 411-418.