

В. В. Головки^{1*}, Г. А. Зуева², Т. И. Киселева²

Поступление пыльцевых кластеров в атмосферу в период цветения растений

¹ Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского, СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация,

² Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

*e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

Аннотация. Изучен кластерный состав поступающих в атмосферу пыльцевых частиц девятнадцати видов растений (*Betula microphylla* Bunge., *Salix alba* L., *Salix wilhelmsiana* M. Bieb., *Salix bicolor* Ehrh. ex Willd., *Salix kochiana* Trautv., *Salix laggeri* Wimm., *Alopecurus pratensis* L., *Molina caerulea* (L.) Moench, *Poa annua* L., *Neoschischkinia nebulosa* (Boiss. & Reut.) Tzvelev, *Festuca gigantea* (L.) Vil, *Melica transsilvanica* Schur., *Panicum capillare* L., *Sorbus sibirica* Hedl., *Padus maackii* (Rupr.) Kom., *Malus mandshurica* (Maxim.) Kom., *Malus niedzwetzkiiana* Dieck., *Malus × zumi* (Matsum., Rehde, *Malus baccata* (L.) Borkh.) представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН. Оценена доля кластеров из двух или большего числа пыльцевых зерен от суммарного числа пыльцевых частиц, поступающих в атмосферу в периоды цветения данных видов растений. Показано, что, не смотря на наличие у анемофильных растений морфологических особенностей, препятствующих образованию кластеров, подобные кластеры в значительных количествах образовывались во всех сериях опытов. При этом доля пыльцевых зерен в их составе могла превышать 50% от общего числа зерен пыльцы, поступивших в атмосферу.

Ключевые слова: пыльца, атмосферный аэрозоль, кластеры

V. V. Golovko^{1*}, G. A. Zueva², T. I. Kiseleva²

Pollen clusters entering atmosphere during flowering of plants

¹ Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS, Novosibirsk, Russia,

² Central Siberian Botanical Gardens, SB RAS, Novosibirsk, Russia

*e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

Abstract. The cluster composition of pollen particles of nineteen plant species entering the atmosphere (*Betula microphylla* Bunge., *Salix alba* L., *Salix wilhelmsiana* M. Bieb., *Salix bicolor* Ehrh. ex Willd., *Salix kochiana* Trautv., *Salix laggeri* Wimm., *Alopecurus pratensis* L., *Molina caerulea* (L.) Moench, *Poa annua* L., *Neoschischkinia nebulosa* (Boiss. & Reut.) Tzvelev, *Festuca gigantea* (L.) Vil, *Melica transsilvanica* Schur., *Panicum capillare* L., *Sorbus sibirica* Hedl., *Padus maackii* (Rupr.) Kom., *Malus mandshurica* (Maxim.) Kom., *Malus niedzwetzkiiana* Dieck., *Malus × zumi* (Matsum., Rehde, *Malus baccata* (L.) Borkh.) exposed by the Central Siberian Botanical Garden, SB RAS. Estimated is the share of clusters of two and more pollen grains in the total number of pollen particles, entering the atmosphere upon blooming of plants of a given species. It is shown that although the anemophilous plants display morphological properties, that prevent the formation of clusters, substantial number of such clusters is recorded in all experimental series. In this case, the share of pollen grains could exceed 50% of the total number of pollen grains, entering the atmosphere.

Keywords: pollen, atmospheric aerosol, clusters

Введение

Данная работа продолжает цикл исследований, посвященных исследованию закономерностей пыльцевого переноса в атмосфере и созданию предпосылок его моделирования.

Ветроопыляемые растения - основные продуценты биомассы и доминанты растительного покрова внетропических биоценозов [1]. Их пыльца – одна из наиболее массовых и распространённых компонент грубодисперсной фракции атмосферного аэрозоля (АА) [2-8]. Продуцируемые при семенном размножении мужские гаметофиты – пыльцевые зерна (ПЗ) переносятся на тысячи километров, обеспечивая генетический обмен между удаленными популяциями, вызывая сезонные вспышки аллергических заболеваний, влияя на химический состав АА.

Для прогнозирования содержания пыльцы в атмосфере созданы сети мониторинга пыльцевой компоненты АА. На 2016 год в мире имелось 879 действующих станций отбора проб пыльцевого аэрозоля. Из них 9 – в Африке, 151 – в Америке, 182 – в Азии (143 – в Японии), 525 – в Европе и 12 – в Океании [4] (<https://www.zaum-online.de/pollen-map.html>), в России – девять станций (в Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Краснодаре, Перми, Ростове-на-Дону, Рязани, Ставрополе, Тюмени) (<https://allergotop.com>) [9-14].

В Российской Федерации из-за большой территории и малой плотности населения более перспективным представляется построение моделей пыльцевого переноса на основе учета пыльцевой продуктивности растений и физических процессов рассеивания пыльцевых частиц (ПЧ). Дальность переноса ПЧ в атмосфере помимо высоты источника, скорости ветра, турбулентности, вертикального коэффициента диффузии определяется скоростью их оседания. Последняя зависит от кластерного состава пыльцевых частиц, поступающих в атмосферу. В данной работе исследовалась эмиссия пыльцы в атмосферу 19 видов растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН.

Материалы и методы

Пыльца сдувалась ветром с соцветий на предметные стекла, покрытые глицерин-желатином с добавлением красителя кумаши голубого. Расстояние до подложек составляло 20-25 см, что позволяло избежать их контактов с соцветиями. Отборы проб пыльцы каждого вида проводились в пятикратной повторности с краткими интервалами. Время экспозиция – несколько секунд. Одновременно Center 311 temperature meter измерялась температура и относительная влажность воздуха. Подсчет ПЧ (одинокых ПЗ и их кластеров) проводился на 10 трансектах при 10-40 кратном увеличении объектива микроскопа.

При оценке количества кластеров из ≥ 2 ПЗ, которое могло образоваться на подложке, сделаны следующие допущения: 1) оседание ПЗ на подложку не зависит от оседания других ПЗ; 2) в кластере ПЗ располагаются в один слой. С ростом числа ПЗ в кластерах, их число уменьшается. Если математическое ожидание числа кластеров из N ПЗ меньше единицы, то частицы из $\geq N$ ПЗ на препарате при заданном числе ПЗ на единицу площади не образуются.

Кластер образуется, если расстояние между геометрическими центрами ПЗ не превышает 2 радиусов. Матожидание числа кластеров из ≥ 2 ПЗ $N_{j \geq 2}$ можно представить соотношением:

$$N_{\geq 2} = 4 \times p \times N_{\geq 1} \quad (1)$$

где $N_{\geq 1}$ – число ПЗ в кластерах, из ≥ 1 ПЗ (фактически - общее количество ПЗ, осевших на подложки); p - доля поверхности препаратов, которую занимают ПЗ.

$$p = S_{pg} \times N_{\geq 1} / S_T \quad (2)$$

где S_{pg} – среднее значение площади проекции ПЗ, S_T – площадь просмотренных препаратов

В центре коллективного пользования микроскопического анализа биологических объектов СО РАН при ИЦиГ СО РАН были сделаны снимки ≈ 200 ПЗ всех исследуемых видов растений. Площади проекций ПЗ нашли обработкой их снимков программой MapInfo Professional.

Математическое ожидание числа кластеров из двух ПЗ можно оценить соотношением:

$$N_2 = N_{\geq 2} - N_{\geq 3} \quad (3)$$

где $N_{j \geq 3}$ – матожидание числа кластеров из ≥ 3 ПЗ, которое оценить соотношением:

$$N_{\geq 3} = 7 p \times N_{\geq 2} \quad (4)$$

Матожидания числа кластеров $N_{\geq j}$ и N_j из $\geq j$ ПЗ можно представить соотношениями:

$$N_{\geq j} = (3 \times (j-1) + 4) \times p \times N_{\geq (j-1)} \quad (5)$$

$$N_j = N_{\geq j} - N_{\geq j+1} \quad (6)$$

Матожидание количества одиночных ПЗ N_1 можно представить соотношением:

$$N_1 = N_{\geq 1} - 2N_2 - 3N_3 - \dots - jN_j \quad (7)$$

При оседании пыльцы на подложке оказывается либо одиночное ПЗ, либо ПЗ в составе кластера. Т.о., задача сводится к сравнению долей одиночных ПЗ от

общего числа осевших на подложки ПЗ – т.е. к оценке достоверности различия долей признака, характеризующегося альтернативным распределением. С этой целью использовался критерий Фишера с φ -преобразованием (угловое преобразование Фишера), предназначенный для сопоставления двух выборок по частоте встречаемости интересующего исследователя показателя.

$$F = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 \cdot N_{a \geq 1} \cdot N_{b \geq 1}}{N_{a \geq 1} \cdot N_{b \geq 1}} \sim F_{(a, df_1, df_2)} \quad (8)$$

где φ_1 и φ_2 – преобразованные доли, $N_{a \geq 1}$, $N_{b \geq 1}$ – объемы выборок (в данном случае - суммарные количества ПЗ на подложках). Полученное значение сравнивалось с табличным при заданном уровне значимости и числом степеней свободы – $df_1 = 1$; $df_2 = N_{a \geq 1} + N_{b \geq 1} - 2$.

Когда объемы выборок исчисляются сотнями и тысячами, значения критерия F Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05 - 3,8$; при уровне значимости $\alpha = 0,01 - 6,6$; при уровне значимости $\alpha = 0,001 - 10,8$. Если вычисленные значения критерия F Фишера превышают указанные величины, то нулевую гипотезу при заданном уровне значимости следует отбросить.

Результаты

Исследован кластерный состав поступающей в атмосферу пыльцы 19 видов растений (*Betula microphylla*, *Salix alba*, *Salix wilhelmsiana*, *Salix bicolor*, *Salix kochiana*, *Salix laggeri*, *Alopecurus pratensis*, *Molina caerulea*, *Poa annua*, *Neoschischkinia nebulosa*, *Festuca gigantea*, *Melica transsilvanica*, *Panicum capillare*, *Sorbus sibirica*, *Padus maackii*, *Malus mandshurica*, *Malus niedzwetzkiiana*, *Malus × zumi*, *Malus baccata*) представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН.

В таблице 1 приводятся: 1) даты проведения наблюдений; 2) значения температуры воздуха и его относительной влажности во время отборов пыльцевых проб; 3) результаты подсчета числа ПЧ, осевших на подложки; 4) числа ПЗ осевших на подложки; 5) % доли кластеров, от общего числа осевших ПЧ; 6) доля ПЗ в составе кластеров.

Как видно из таблицы 1, наличие пыльцевых кластеров отмечалось в пыльцевых пробах всех растений. Их доля варьировала от 7,1% (*Betula microphylla*) до 100% (*Malus mandshurica*) от общего числа всех уловленных ПЧ. Доля ПЗ в составе кластеров варьировала, соответственно, от 17 до 100%.

Проверка нулевой гипотезы о поступлении в атмосферу одиночных ПЗ и образовании кластеров из них непосредственно на предметном стекле микроскопа с помощью углового критерия Фишера показала ее полную несостоятельность. Для всех видов значения углового критерия Фишера были больше 10,8 – значения при уровне значимости $\alpha = 0,001$.

Таблица 1

Кластеры в пыльце анемофильных растений, поступающей в атмосферу

	Видовое название	Дата	температура, °С	влажность, %	Число		Относительная доля	
					частиц	зерен	кластеров из ≥ 2 ПЗ, %	зерен пыльцы в кластерах, %
	<i>Betula microphylla</i>	16.05.2021	24,1	20,4	2675	2994	7,1	17,0
	<i>Salix alba</i>	17.05.2021	23,6	20,2	1176	2061	31,7	61,0
	<i>Salix wilhelmsiana</i>	17.05.2021	24,2	20,2	3392	6548	31,4	64,5
	<i>Salix bicolor</i>	15.05.2021	20,5	14,5	2761	4620	23,5	54,3
	<i>Salix kochiana</i>	17.05.2021	20,7	13,5	7069	7973	7,6	18,0
	<i>Salix laggeri</i>	15.05.2021	21,2	14,8	2202	5416	28,3	70,9
	<i>Alopecurus pratensis</i>	20.06.2022	23,6	65,5	2231	3297	19,5	45,5
	<i>Molina caerulea</i>	26.06.2020	27,3	56,7	619	910	25,0	49,0
	<i>Poa annua</i>	26.05.2022	36,6	29,3	660	944	19,4	43,6
0	<i>Neoschischkinia nebulosa</i>	20.05.2022	25,3	67,0	1460	2434	27,6	56,6
1	<i>Festuca gigantea</i>	26.06.2020	27,9	59,0	1467	1838	12,7	30,4
2	<i>Melica transsilvanica</i>	01.07.2022	26,5	34,8	3248	5820	31,9	62,0
3	<i>Panicum capillare</i>	09.09.2019	27,0	65,1	1086	2167	35,4	67,6
4	<i>Sorbus sibirica</i>	20.06.2019	21,0	51,9	288	478	29,5	57,5
5	<i>Padus maackii</i>	24.05.2022	28,9	20,5	1245	2103	33,3	60,5
6	<i>Malus mandshurica</i>	24.05.2022	33,1	32,0	34	342	100	100
7	<i>Malus niedzwetzkiiana</i>	24.05.2022	20,6	23,8	294	1565	88,4	97,8
8	<i>Malus × zumi</i>	24.05.2022	30,3	29,6	410	1422	45,1	84,2
9	<i>Malus baccata</i>	24.05.2022	27,0	30,0	269	708	48,7	80,5

Заключение

Исследованные поступления в атмосферу пыльцы 19 видов растений и 7 видов злаков позволяют утверждать, что попадающие в атмосферу в период цветения ПЧ не монодисперсные. Регулярно в атмосферу поступают помимо одиночных ПЗ кластеры, содержащие от ≥ 2 зерен пыльцы. Процентная доля таких кластеров от общего количества образовавшихся частиц варьирует в широких пределах и может сильно различаться у разных видов растений.

Выводы

Полученные результаты полностью совпадают с наблюдавшимися ранее.

1. Морфологические особенности строения пыльцевых зерен растений не предотвращают образование кластеров при эмиссии пыльцы в атмосферу.

2. Поступающая в атмосферу пыльца растений не монодисперсная, а представлена как одиночными ПЗ, так и их кластерами из 2 или большего числа зерен пыльцы.

3. Доля кластеров от общего количества образовавшихся частиц, и процентная доля ПЗ в их составе варьирует в широких пределах.

При подготовке статьи использовались материалы Биоресурсной научной коллекции ЦСБС СО РАН, УНУ "Коллекции живых растений в открытом и закрытом грунте", USU 440534.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V. R., Huffman, A. J., Burrows, S. M., Hoose, C., Safatov, A. S., Buryak, G., Fröhlich-Nowoisky, J., Elbert, W., Andreae, M. O., Pöschl, U. and Jaenicke, R.: // *Primary biological aerosol particles in the atmosphere: a review* // *Tellus B*, 64, doi:10.3402/tellusb.v64i0.15598, 2012.

2. J. D. Ackerman // *Abiotic pollen and pollination: ecological, functional, and evolutionary perspectives* // *Plant Syst. Evol.* 222:167-185 (2000)

2. Niklas K. J. (1985) // *The aerodynamics of wind pollination.* // *Bot. Rev.* 51:328-386.

4. J. D. Ackerman // *Abiotic pollen and pollination: ecological, functional, and evolutionary perspectives* // *Plant Syst. Evol.* 222:167-185 (2000)

5. Пеньковская Е. Ф. // *Конспект флоры окрестностей Академгородка (Новосибирская область).* // *Новости географии и систематики растений Сибири.* - Новосибирск, 1973. - С. 30-88.

6. Головкин В.В., Куценогий К.П., Истомин В.Л. Счетные и массовые концентрации пыльцевой компоненты атмосферного аэрозоля в окрестностях г. Новосибирска в период цветения древесных растений. // *Оптика атмосферы и океана.* 2015. Т. 28. № 06. С. 529–533.

7. Raynor G. S., Ogden E. C., Haes J. V. Dispersion and deposition of Ragweed Pollen from Experimental Sources. *Journal of Applied Meteorology.* 1970. V. 9. N 6. P. 885-895

8. D. E. Bianchi, D. J. Schwemmin and W. H. Wagner, Jr. // *Pollen Release in the Common Ragweed (Ambrosia artemisiifolia)* // *Botanical Gazette*, Vol. 120, No. 4 (Jun., 1959), pp. 235-243

9. Blackmore S., Barnes Y. S. 1986 Harmomegathic mechanisms in pollen grains. Pages 137-149 in S. Blackmore & I. K. Ferguson (eds), *Pollen end spores: form and function.* Academic Press, London

10. Culley T. M., Weller S. W., Sakai A. K. The evolution of wind pollination in angiosperms. // *Trends in Ecology and Evolution.* 2002. V. 17. N 8. P. 361-369.

11. Jackson S. T., Lypord M. E. Pollen Dispersal Models in Quaternary Plant Ecology: Assumptions, Parameters, and Prescriptions // *The botanical review*. 1999. V. 65. N 1. P. 39-74.
12. Harrington J. B., Kurt M. Ragweed pollen density. // *Amer. J. Bot.* 1963. V. 50. N 6. P. 532-539.
13. Ogden E. C., Haes J. V., Raynor G. S. Diurnal patterns of pollen emission in *Ambrosia*, *Pleum*, *Zea*, and *Ricinus*. // *Amer. J. Bot.* 1969, V. 56. N 1. P. 16-21.
14. Истомин В. Л., Куценогий К.П., Головко В.В. Определение аэродинамических характеристик пыльцы. // *Аэрозоли Сибири*, Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. с.260-282

© В. В. Головко, Г. А. Зуева, Т. И Киселева, 2023