

## **СКОРОСТИ ОСЕДАНИЯ ПЫЛЬЦЕВЫХ ЧАСТИЦ АНЕМОФИЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИИ ЦСБС СО РАН**

### ***Владимир Викторович Головко***

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского, СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, кандидат биологических наук, ведущий инженер, тел. (383)-330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### ***Константин Александрович Хлебус***

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15, ведущий инженер, тел. (383)-333-19-38, e-mail: 1798745@mail.ru

### ***Галина Александровна Зуева***

Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Золотогоринская, 101, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)339-97-94, e-mail: zuevagalina70@yandex.ru

Исследовано оседание пыльцевых частиц четырех видов анемофильных растений (*Populus alba* L., *Salix hybrida*, *Miscanthus sinensis* Andersson, *Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. K. Skvortsov) произрастающих в экспозиции ЦСБС СО РАН. Данные виды широко используются при озеленении городов Новосибирской области и являются продуцентами внушительных количеств аллергенной пыльцы, которая может переноситься ветром на значительные расстояния. Показано наличие значительной доли кластеров, в состав которых входят два или большее количество пыльцевых зерен. Определены скорости оседания, как индивидуальных пыльцевых зерен данных видов растений и их кластеров, в состав которых входило от двух до шести зерен пыльцы. Установлена зависимость скорости седиментации кластера от числа входящих в него пыльцевых зерен.

**Ключевые слова:** анемофильные растения, пыльца, пыльцевые зерна, скорость седиментации, кластеры

## **SEDIMENTATION VELOCITY OF POLLEN PARTICLES OF ANEMOPHILIC PLANTS GROWING ON TERRITORY OF THE CSBG SB RAS**

### ***Vladimir V. Golovko***

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion, SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Leading Engineer, phone: (383)330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### ***Konstantin A. Khlebus***

Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, Leading Engineer, phone: (383)333-19-38, e-mail: 1798745@mail.ru

### ***Galina A. Zueva***

Central Siberian Botanical Gardens, SB RAS, 101, Zolotodalinskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)339-97-94, e-mail: zuevagalina70@yandex.ru

The settling of pollen particles of four species of anemophilic plants (*Populus alba* L., *Salix hybrida*, *Miscanthus sinensis* Andersson, *Chosenia arbutifolia* (Pall.) A. K. Skvortsov) growing in

the exposition of the CSBS SB RAS was investigated. These species are widely used in landscaping cities of the Novosibirsk region and are producers of impressive amounts of allergenic pollen, which can be carried by the wind over significant distances. The presence of a significant proportion of clusters, which include two or more pollen grains, is shown. Settling rates were determined as individual pollen grains of these plant species and their clusters, which included from two to six pollen grains. Dependence of cluster sedimentation rate on number of pollen grains included in it is established.

**Keywords:** sedimentation rate, pollen grains, agglomerates, anemophilic plants, air impact

Поступающие в атмосферу пыльцевые зерна (ПЗ) анемофильных растений обеспечивают их семенное размножение и генетический обмен между удаленными популяциями, оказывают влияние на химический состав атмосферного аэрозоля (АА), его оптические свойства, вызывает аллергические заболевания [1-7].

Скорость седиментации пыльцевых частиц (ПЧ) – единственная характеристика, влияющая на дальность их переноса и улавливания. Она необходима для построения моделей переноса пыльцевых зерен (ПЗ) в атмосфере, оценки изоляции удаленных популяций и рисков генетического загрязнения семенных питомников, возникновения сезонных вспышек поллинозов [8-12].

Сложная форма ПЗ, деформация их при высыхании, наличие кластеров из  $\geq 2$  ПЗ затрудняют теоретические расчеты скорости седиментации. Ее определяют экспериментально с помощью разного вида седиментометров [13-17]. Определяются преимущественно скорости оседания индивидуальных ПЗ, а скорости седиментации их кластеров практически не исследуются, как и доля кластеров от общего количества продуцируемых ПЧ, не определяются зависимости скоростей седиментации кластеров от количества составляющих их ПЗ [18-20].

Данная работа – часть цикла исследований для определения скоростей седиментации пыльцы максимально возможного числа видов ветроопыляемых растений России. Исследовалось оседание пыльцевых кластеров четырех видов ветроопыляемых растений (*Populus alba*, *Salix hybrida*, *Miscanthus sinensis*, *Chosenia arbutifolia*).

Исследован кластерный состав пыльцевого аэрозоля при распылении; экспериментально определены скорости седиментации ПЗ и их кластеров; установлены зависимости скорости седиментации кластеров от числа входящих в их состав ПЗ.

### ***Результаты и обсуждение***

Определение скорости оседания ПЧ проводилось на экспериментальной установке по распылению порошкообразных материалов по методике, описанной ранее. Также ранее были описаны методики: 1) подсчета под микроскопом зерен пыльцы и их кластеров, 2) определения доли кластеров из  $\geq 2$  пыльцевых зерен и процентной доли зерен пыльцы, входящих в их состав; 3) расчетов скоростей седиментации индивидуальных зерен пыльцы и их кластеров; 4) оценки

зависимости скорости седиментации кластера от числа входящих в его состав зерен пыльцы [12, 13]. При расположении зерен пыльцы в составе кластера в  $\geq 3$  слоя, точное число пыльцевых зерен в нем можно определить лишь приблизительно. Число кластеров из  $\geq 7$  ПЗ не превышало 1%. Лишь  $\approx 1/4$  подобных частиц ПЗ располагались в  $\geq 3$  слоя. Т.о. погрешность, обусловленная ошибками при подсчете числа ПЗ в кластере не превышала 0,2-03%. Скорости седиментации рассчитывались лишь для ПЧ, состоящих из одного-шести ПЗ.

Таблица 1

Вклад кластеров ПЗ в количество пыльцевых ц+ частиц, осевших на подложку и доля ПЗ в составе кластеров от общего числа осевших на подложку ПЗ

Видовое название	Доля кластеров из двух или более ПЗ от общего количества осевших частиц, %	Доля ПЗ в составе кластеров из двух или более ПЗ от общего количества осевших ПЗ, %
<i>Chosenia arbutifolia</i>	34,7	62,9
<i>Miscanthus sinensis</i>	37,7	65,9
<i>Salix hybrida</i>	51,7	79,8
<i>Populus alba</i>	31,6	58,8

При распылении образуется огромное количество кластеров из  $\geq 2$  ПЗ. В табл. 1 приводятся данные о доле кластеров от общего числа частиц, осевших на подложки; доле пыльцевых зерен в составе кластеров из двух или большего количества зерен, от общего количества ПЗ, осевших на подложки. При распылении навесок пыльцы в седиментометре пыльцевые кластеры составляют до 31,6-51,7 % от общего количества образующихся частиц, при этом в их состав входит до 58,8 (*Populus alba*) до 79,8 % (*Salix hybrida*) распыленных зерен пыльцы.

Можно предположить, что что в ходе опытов кластеры образуются на подложках седиментометра из оседающих одиночных ПЗ. С целью проверки данной гипотезы по методике, предложенной ранее [21] исходя из суммарной площади просмотренных препаратов, общего числа осевших ПЗ, рассчитаны матожидания чисел кластеров из  $\geq 2$  ПЗ, количества ПЗ в их составе. Для каждого вида растений вычислено матожидание числа одиночных ПЗ, которые должны были оказаться на подложке и с помощью углового преобразования Фишера сопоставлено с числом реально подсчитанных ПЗ. В табл. 2 приводятся суммарные числа ПЗ, расчетные и фактические числа одиночных ПЗ, а также значения углового критерия Фишера. Для всех четырех видов растений эти значения были выше его значения (10,8) при 0,001 уровне значимости. Это позволяет отвергнуть гипотезу о возникновении пыльцевых кластеров на подложках седиментометра.

Числа подсчитанных кластеров ( $j$  – от 1 до 6), среднегеометрическое значения и среднегеометрические отклонения их скоростей седиментации растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН приведены в табл. 3.

Таблица 2

Числа реально подсчитанных на подложках ПЗ, математические ожидания чисел одиночных ПЗ и значения углового критерия Фишера

№	Видовое название	Число пыльцевых зерен			Угловой критерий Фишера
		Суммарное	Одиночных фактическое	Одиночных расчетное	
1	<i>Chosenia arbutifolia</i>	30011	11122	16118	41,2
2	<i>Miscanthus sinensis</i>	7319	2493	4089	26,7
3	<i>Salix hybrida</i>	10533	2126	7440	77,2
4	<i>Populus alba</i>	11856	4881	6369	19,4

Таблица 3

Числа, скорости седиментации и стандартные геометрические отклонения кластеров, в состав которых входит  $j$  пыльцевых зерен

$j$		<i>Chosenia arbutifolia</i>	<i>Miscanthus sinensis</i>	<i>Salix hybrida</i>	<i>Populus alba</i>
j=1	Число кластеров	11122	2493	2126	4881
	$\bar{V}_j$ , см/с	1,7	3,3	1,1	1,6
	$\sigma_g$	1,5	1,4	1,3	1,5
j=2	Число кластеров	2799	661	780	1116
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,3	4,3	1,4	2,1
	$\sigma_g$	1,4	1,3	1,3	1,5
j=3	Число кластеров	1325	369	503	503
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,7	4,9	1,6	2,5
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,3	1,3
j=4	Число кластеров	736	233	378	293
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,9	5,9	1,9	2,7
	$\sigma_g$	1,3	1,4	1,3	1,4
j=5	Число кластеров	463	111	242	168
	$\bar{V}_j$ , см/с	3,0	6,7	2,0	2,9
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,3	1,3
j=6	Число кластеров	267	69	170	88
	$\bar{V}_j$ , см/с	3,3	7,4	2,2	3,2
	$\sigma_g$	1,2	1,	1,3	1,3

С увеличением размера кластеров наблюдается уменьшение числа частиц. При этом, несмотря на большое статистически значимое количество обнаруженных одиночных зерен, именно у них отмечены максимальные стандартные геометрические отклонения скорости седиментации. Видимо, это связано с варьированием размеров индивидуальных ПЗ и наличием некоторого числа абортивных ПЗ, у которых сохраняется оболочка, а внутреннее содержимое в той или иной степени разрушается, что приводит к разбросу скоростей оседания. С ростом числа ПЗ в кластере эти факторы, вероятно, взаимно компенсируются, а сам кластер становится более симметричной фигурой. В результате уменьшается разброс значений скоростей седиментации.

Скорость оседания кластера возрастает с увеличением количества составляющих его частиц. Ранее было показано [13-14], что скорости седиментации кластеров в зависимости от числа частиц в кластере хорошо аппроксимируются степенной зависимостью, построенной методом наименьших квадратов. Аппроксимационные зависимости строились из предположения, что:

$$\bar{V}_j = \bar{V}_1 j^\alpha, \quad \text{для } 1 \leq j \leq 6 \quad (1)$$

где  $\bar{V}_j$  – средняя скорость кластера состоящего из  $j$  частиц,  $\bar{V}_1$  – средняя скорость единичного зерна.

Для определения параметров  $\alpha$  и  $\bar{V}_1$  из экспериментальных данных использовался метод линейного регрессионного анализа в следующем виде:

$$Y_j = \beta + \alpha X_j \quad (2)$$

где  $Y_j = \ln(\bar{V}_j)$ ,  $\beta = \ln(\bar{V}_1)$ ,  $X_j = \ln(j)$ . Достоверность используемой аппроксимации оценивалась по коэффициенту корреляции  $r$ .

Для исследуемых нами растений полученные данные можно аппроксимировать эмпирическими зависимостями, предложенные в табл. 4.

Таблица 4

Эмпирические зависимости и коэффициенты корреляции

n/n	Видовое название	Эмпирическая зависимость $\bar{V}_j$ , см/с	Коэффициент корреляции $r$
1	<i>Chosenia arbutifolia</i>	$\bar{V}_j = 1,7 \times j^{0,343}$	0,994
2	<i>Miscanthus sinensis</i>	$\bar{V}_j = 3,3 \times j^{0,449}$	0,984
3	<i>Salix hybrida</i>	$\bar{V}_j = 1,1 \times j^{0,428}$	0,990
4	<i>Populus alba</i>	$\bar{V}_j = 1,6 \times j^{0,383}$	0,995

Коэффициент корреляции  $r$  - принимает значения в диапазоне  $0,984 \leq r \leq 0,995$ ,  $k$  принимает значения в диапазоне  $0,343 \leq k \leq 0,449$ . Зафиксированный диапазон  $\bar{V}_j$  от 1,1 см/с для единичного ПЗ *Salix hybrida* до 7,4 см/с для кластера состоящего из шести ПЗ *Miscanthus sinensis*, обусловлен различием размеров пыльцевых частиц. Наличие в пробах распыленной пыльцы значительного количества кластеров, оседающих с большой скоростью, указывает на их возможное существование в природных условиях. Что хорошо согласуется с оседанием основного количества пыльцы под кронами продуцирующих растений. Установленные экспериментальным путем зависимости позволяют оценить скорости седиментации кластеров, состоящих из произвольного числа ПЗ. Можно оценить эквивалентные диаметры ПЧ и использовать полученные значения при моделировании распространения пыльцы в атмосфере.

### Заключение

1. Установлено, что при экспериментальном распылении пыльцы исследованных видов ветроопыляемых растений образуются значительные количества кластеров из  $\geq 2$  зерен пыльцы на долю которых приходится от 31,6 до 51,7 % образующихся частиц при этом в их состав входит от 58,8 до 79,8% распыленных пыльцевых зерен.

2. Для пыльцы четырех видов ветроопыляемых растений (*Populus alba*, *Salix hybrida*, *Miscanthus sinensis*, *Chosenia arbutifolia*) экспериментально определены скорости седиментации кластеров, в состав которых входит от 1 до 6 пыльцевых зерен.

3. Предложены эмпирические формулы зависимости скорости седиментации кластеров пыльцевых зерен анемофильных видов растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН, от их размеров.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ackerman J. D. Abiotic pollen and pollination: ecological, functional, and evolutionary perspectives // Plant Syst. Evol. 2000. V. 222, N 1. P. 167-185
2. Сладков А. Н. Введение в спорово-пыльцевой анализ. М.: Наука, 1967. 268 с.
3. Owens J. N., Takaso T., Runions C. J. Pollination in conifers. // Trends in plant science. 1998. V. 3. N. 12. P. 1360 – 1385
4. Greenfield L. G. Weight loss and release of mineral nitrogen from decomposing pollen // Soil Biology and Biochemistry. 1999. V. 31, N 3. P. 353-351
5. Doskey P.V., Ugoagwu B.J. Atmospheric deposition of macronutrients by pollen at a semi-remote site in northern wisconsin. // Atmospheric Environment. 1989. V. 23. N 12. P. 2761-2766.
6. Rantio-Lehtimäki A. Aerobiology of Pollen and Pollen Antigens // Bioaerosols Handbook / Editors: Cox C. S., Wathes C. M. / Boca Raton, Florida, Lewis Publishers Inc, 1995, pp. 387-406.
7. Biedermann T., Winther L., Till S.J., Panzner P., Knulst A., Valovirta E. BIRCH POLLEN ALLERGY IN EUROPE // Allergy. 2019. V. 74. № 7. P. 1237-1248.

8. Buters J. T. M., Antunes C., Galveias A., Bergmann K. C., Thibaudon M., Galán C., Schmidt-Weber C., Oteros J. Pollen and spore monitoring in the world. // *Clinical and Translational Allergy*, 2018. V. 8, N 9. P. 1-5.
9. Efstathiou C., Isukapalli S., Georgopoulos P. A mechanistic modeling system for estimating large-scale emissions and transport of pollen and co-allergens. // *Atmospheric Environment*. 2011. V. 45, N 13. P. 2260–2276.
10. Di-Giovanni F., Keyan P. G., Nasr M. E. The variability in settling velocities of some pollen and spores. // *Grana*. 1995. V. 34, N 1. P. 39-44
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. Zink, K., Vogel, H., Vogel, B., Magyar, D., Kottmeier, C. Modeling the dispersion of *Ambrosia artemisiifolia* L. pollen with the model system COSMO-ART. // *International Journal of Biometeorology*. 2012. V. 56, N 4. P. 669–680.
13. Истомин В.Л., Куценогий К.П. Получение аэрозолей из порошкообразных материалов методом импульсного воздействия газом. // *Теплофизика и аэромеханика*, 1998, Т. 5, № 1, с. 75-79.
14. Истомин В.Л., Куценогий К.П. Определение скорости седиментации спор плауна агломератов. // *Теплофизика и аэромеханика*, 2001. Т. 8. № 2. с. 295-300.
15. Aylor D. E. Settling speed of corn (*Zea mays*) pollen. // *Journal of Aerosol Science*. 2002. V. 33. T 11. P. 1601–1607.
16. Sosnoskie L. M., Webster T. M., Dales D., Rains G. C., Grey T. L., Culpepper A. S. Pollen Grain Size, Density, and Settling Velocity for Palmer Amaranth (*Amaranthus palmeri*) // *Weed Science*. 2009. V. 57. N 4. P. 404–409.
17. Hirose Y, Osada K. Terminal settling velocity and physical properties of pollen grains in still air. // *Aerobiologia*. 2016. V. 32. N 3. P. 385–394.
18. Schwendemann, A. B., Wang, G., Mertz, M. L., McWilliams, R. T., Thatcher, S. L., & Osborn, J. M. Aerodynamics of saccate pollen and its implications for wind pollination. // *American Journal of Botany*. 2007. V. 94. N 4. P. 1371–1381.
19. Bolinder K., Rydin C., Niklas K.J Aerodynamics and pollen ultrastructure in *Ephedra* // *American Journal of Botany*. 2015. V. 102. N 3. P. 457–470.
20. Sabban L., van Hout R. Measurements of pollen grain dispersal in still air and stationary, near homogeneous, isotropic turbulence. // *Journal of Aerosol Science*. 2011. V. 42. N 12. P. 867–882.
21. Головки В. В., Беланова А. П., Зуева Г. А. Исследование кластерного состава пыльцевых частиц, поступающих в атмосферу во время цветения анемофильных растений // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 06. С. 476–481.

© В. В. Головки, К. А. Хлебус, Г. А. Зуева, 2021