

УДК 532.529.5

Определение скорости седиментации пыльцевых частиц анемophilных растений, произрастающих в Западной Сибири

В.В. Головки¹, В.Л. Истомин^{2*}

¹ *Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3*

² *Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15*

Поступила в редакцию 30.11.2016 г.

Измерены скорости седиментации пыльцевых частиц ветроопыляемых растений нескольких видов (в том числе интродуцированных человеком), произрастающих в Западной Сибири (сосен: обыкновенной, сибирской, горной, Палласа (крымской); конопли посевной и подорожника ланцетного). При этом выявлено, что во время распыления анемophilной пыльцы ее частицы представлены как одиночными пыльцевыми зернами, так и агломератами из двух или большего количества зерен; установлена их доля от общего числа частиц, осевших на подложку. Определены скорости оседания пыльцевых частиц, а также скорости седиментации пыльцевых агломератов. Подтверждена зависимость скорости седиментации от числа зерен в агломерате.

Ключевые слова: скорость седиментации, пыльцевые зерна, агломераты, анемophilные растения, импульс воздуха; sedimentation rate, pollen grains, agglomerates, anemophilic plants, air impact.

Введение

Пыльца растений представляет собой совокупность мужских гаметофитов. Ее перенос с пыльника на рыльце пестика (у покрытосеменных) или на семяпочку (у голосеменных) является ключевым этапом полового размножения семенных растений. В краткие периоды интенсивного цветения ветроопыляемых растений их пыльца — одна из наиболее массовых и широко распространенных компонент биоаэрозоля. Ее перенос на тысячи километров обеспечивает генетический обмен между популяциями и вызывает сезонные вспышки аллергических заболеваний [1–5].

Перенос пыльцевой компоненты атмосферного аэрозоля — процесс физический. Его дальность, эффективность оседания пыльцы на опыляемые растения и поверхности отбирающих устройств обусловлены скоростью седиментации. Определив ее, можно теоретически рассчитать дальность переноса пыльцы при любой заданной высоте источника в ламинарном ветровом потоке, моделировать распространение пыльцы в турбулентном потоке воздуха. Подобные модели используются для сокращения пыльцевого «загрязнения» семенных питомников,

при оценке риска возникновения аллергических заболеваний, исследовании распространения пыльцы и спор растений [6–8].

Сложная форма пыльцевых зерен (ПЗ), обусловленная наличием воздушных мешков либо их деформацией при высыхании, существование агломератов из двух или большего количества ПЗ затрудняют теоретические расчеты скорости седиментации пыльцевых частиц [8–11]. Ее определяют экспериментально с помощью разного вида седиментометров [10, 12, 13]. К настоящему времени установлены скорости седиментации ПЗ около 200 видов растений. В литературных источниках, как правило, приводятся скорости оседания индивидуальных ПЗ. Скорости седиментации агломератов двух и более зерен практически не изучены [7, 13–17].

Наша статья является продолжением цикла исследований, посвященных определению скоростей оседания пыльцевых частиц. Основные цели работы: 1) изучение агрегатного состава пыльцевого аэрозоля, образующегося при распылении пыльцы; 2) экспериментальное исследование скоростей седиментации ПЗ и их агломератов шести видов растений (сосен: обыкновенной, сибирской, крымской, горной; «сорных трав»: конопли посевной, подорожника ланцетного), произрастающих на территории Западной Сибири; 3) установление зависимости скорости седиментации агломератов от числа входящих в их состав ПЗ.

* Владимир Викторович Головки (golovko@kinetics.nsc.ru); Вячеслав Лазаревич Истомин (istomin@hydro.nsc.ru).

Методика и техника эксперимента

Техника проведения экспериментов аналогична той, что использовалась ранее [18, 19]. Порция пылицы загружалась в дозирующую систему экспериментальной установки по распылению порошкообразных материалов и импульсом сжатого воздуха распылялась в канал собственно седиментометра. Пыльцевые частицы проходили через окно в виде сектора в неподвижной диафрагме и оседали на стеклянный диск, покрытый глицерин-желатином и поворачивающийся на заданный угол через подобранные в серии предварительных опытов интервалы времени t_0 . Количество частиц, осевших в пределах каждого из секторов на диске, и число ПЗ в отдельных частицах определялись с помощью светового микроскопа согласно методике, описанной в работах [18, 19].

Результаты и обсуждение

Были измерены скорости седиментации пыльцевых частиц четырех видов сосен: обыкновенной, сибирской, горной, Палласа (крымской), а также двух видов «сорных трав»: конопли посевной и подорожника ланцетного. ПЗ данных ветроопыляемых растений имеют ряд принципиальных морфологических отличий.

Коноплю и подорожник можно отнести к группе типичных анемофильных растений. Их гидратированные (насыщенные водой) ПЗ имеют форму близкую к сферической, средние размеры (диаметр) в диапазоне 20–40 мкм. Внешний слой оболочки (экзины) гладкий, без выраженных скульптурных элементов, сухой, т.е. липкие вещества, склеивающие зерна в агломераты, отсутствуют, как следствие, при высыхании ПЗ деформируются и приобретают неправильную форму (рис. 1).

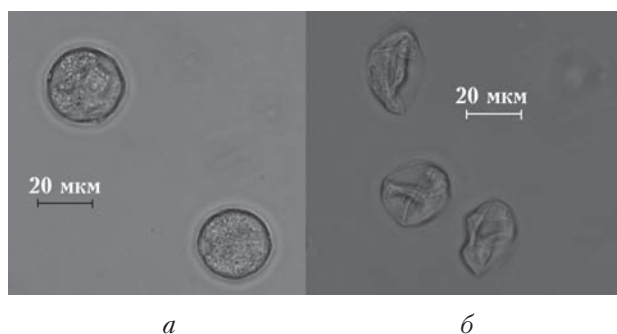


Рис. 1. Гидратированное (а) и высохшее (б) пыльцевое зерно конопли посевной

Пыльцевые зерна сосен имеют воздушные мешки, т.е. заполненные воздухом полости, образовавшиеся благодаря расхождению слоев экзины. Гидратированные ПЗ сосен билатерально-симметричные, круп-

ные (максимальный размер ПЗ ~ 70–90 мкм; тела ПЗ – порядка 40–60 мкм). При высыхании пыльцы сложная форма их зерен сохраняется (рис. 2). Наличие воздушных мешков способствует дальнейму разносу пылицы ветром. Можно предположить, что такая особенность морфологии скажется и на поведении ПЗ при распылении.

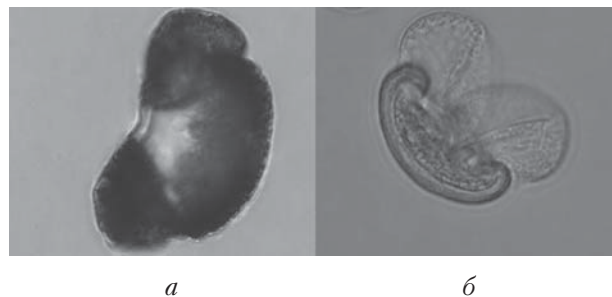


Рис. 2. Гидратированное (а) и высохшее (б) пыльцевое зерно сосны крымской

Подсчет под микроскопом позволяет определить количество различных агломератов, осевших на подложку, и число ПЗ, входящих в их состав. Как у пылицы исследованных ранее таксонов, у сосен (обыкновенной, сибирской, горной, крымской), конопли посевной и подорожника ланцетного легко распознавались агломераты, содержащие до 6 ПЗ. В более крупных агломератах их число не всегда удавалось определить, так как в некоторых из них ПЗ располагались в два и более слоев. При этом толщина агломерата в несколько раз превышала глубину резкого изображения, что затрудняло подсчет числа ПЗ, в отдельных случаях позволяя произвести его лишь приблизительно. Доля агломератов из 7 или большего количества зерен не превышала 3% от общего числа уловленных частиц. Скорости седиментации подобных агломератов не вычислялись.

Поскольку участок неравномерного движения пыльцевой частицы значительно меньше, чем длина седиментационного цилиндра, то при расчете скорости седиментации было сделано допущение, что ПЗ равномерно оседают на подложку в течение всего периода экспозиции любой диафрагмы. На каждый из секторов оседали частицы, скорость которых находилась в пределах от V_i до V_{i+1} (i – номер сектора):

$$V_i = \frac{H}{t_i} \text{ см/с}, \quad i = 2-11, \quad (1)$$

где $t_i = t_0(i-2)$, t_0 – время экспозиции; H – высота седиментационного цилиндра.

Значение скорости седиментации (\bar{V}_i), которое характеризует частицы, оседающие в пределах выбранного сектора, рассчитывалось по формуле

$$\bar{V}_i = \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \quad (2)$$

(V_i и V_{i+1} — максимальная и минимальная скорости седиментации частиц в i -м секторе).

Средняя скорость седиментации \bar{V}_j агломерата, состоящего из j зерен, находится следующим образом:

$$\bar{V}_j = \exp \left(\frac{\sum_i n_{ij} \ln(\bar{V}_{ij})}{\sum_i n_{ij}} \right). \quad (3)$$

Здесь \bar{V}_{ij} — среднее геометрическое значение скорости седиментации агломератов из j частиц, оседающих на i -й сектор; n_{ij} — число агломератов из j частиц, оседающих на i -й сектор.

Среднегеометрические отклонения σ_{gj} от среднего значения \bar{V}_j агломерата, состоящего из j зерен, вычисляются по формуле

$$\sigma_{gj} = \exp \sqrt{\frac{\sum_i n_{ij} (\ln(\bar{V}_{ij}) - \ln(\bar{V}_j))^2}{\sum_i n_{ij}}}. \quad (4)$$

При распылении образуется огромное количество агломератов, состоящих из двух или большего количества ПЗ. Из табл. 1 видно, что при распылении навесок пылицы в седиментометре пыльцевые агломераты составляют от 29,1 (сосна крымская) до 44,6% (сосна обыкновенная) от общего количества образующихся частиц, при этом в их состав входит от 54,9 до 72,8% распыленных ПЗ.

Как для индивидуальных частиц, так и для агломератов наблюдается заметный разброс скоростей седиментации (рис. 3). Множество подсчитанных агломератов (j от 1 до 6), среднегеометрические

значения и среднегеометрические отклонения их скоростей седиментации шести видов западносибирских растений приведены в табл. 2.

Таблица 1

Вклад агломератов ПЗ в количество пыльцевых частиц, осевших на подложку, и их доля в составе агломератов от общего числа осевших на подложку ПЗ

Вид	Доля агломератов из двух или более ПЗ от общего количества осевших частиц, %	Доля ПЗ в составе агломератов из двух или более ПЗ от общего количества осевших ПЗ, %
Сосна крымская	29,1	54,9
Сосна сибирская	37,4	66,3
Сосна обыкновенная	44,6	72,8
Сосна горная	37,8	67,2
Конопля посевная	42,5	71,1
Подорожник lanцетный	36,0	63,1

С увеличением размера агломератов 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. Возможно, это связано с варьированием размеров индивидуальных ПЗ и наличием некоторого числа abortивных, у которых сохраняется оболочка, а внутреннее содержимое в той или иной степени разрушается, что приводит к разбросу скоростей оседания. С ростом числа ПЗ в агломерате эти факторы, скорее всего,

Таблица 2

Результаты определения скоростей седиментации ПЗ и их агломератов шести видов растений, произрастающих на территории Западной Сибири

j	Параметр	Сосна крымская	Сосна сибирская	Сосна обыкновенная	Сосна горная	Конопля посевная	Подорожник lanцетный
1	Число агломератов	4890	9132	7503	4411	6249	6059
	\bar{V}_j , см/с	2,7	2,9	3,0	2,7	1,0	1,5
	σ_g	1,4	1,6	1,4	1,5	1,4	1,4
2	—«—	991	2491	2796	1166	2006	1696
		3,4	3,5	4,0	3,6	1,4	2,1
		1,4	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4
3	—«—	460	1211	1248	577	1083	814
		4,0	4,1	5,0	4,2	1,7	2,5
		1,3	1,4	1,3	1,5	1,3	1,3
4	—«—	330	730	747	374	568	426
		4,9	4,5	5,9	5,0	1,9	2,9
		1,3	1,4	1,3	1,4	1,4	1,3
5	—«—	142	374	516	223	407	214
		5,6	5,6	6,5	5,7	2,1	3,2
		1,2	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3
6	—«—	61	248	317	162	275	129
		6,0	6,6	7,0	6,1	2,3	3,7
		1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

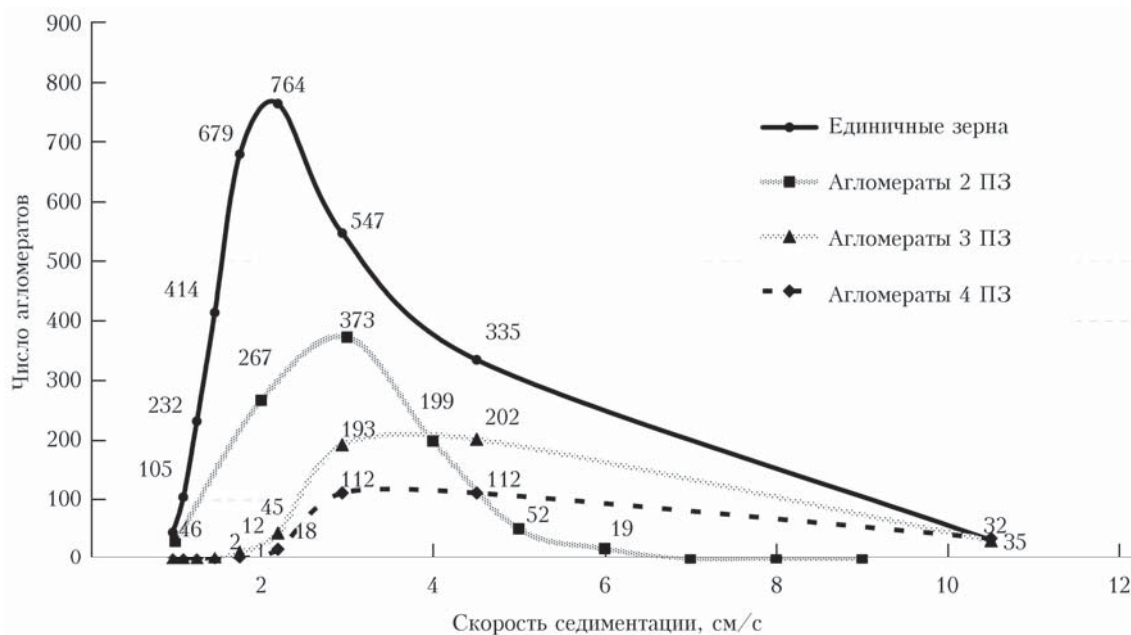


Рис. 3. Скорости седиментации индивидуальных ПЗ и агломератов ПЗ сосны сибирской

взаимно компенсируются, а сам агломерат становится более симметричной фигурой. В результате разброс значений скоростей седиментации при оседании уменьшается.

Скорость оседания агломерата возрастает с увеличением количества составляющих его частиц. Ранее установлено [19], что зависимость скорости седиментации агломерата от числа частиц в нем хорошо аппроксимируется степенной функцией, построенной методом наименьших квадратов. Аппроксимационные зависимости строились из предположения, что

$$\bar{V}_j = \bar{V}_1 j^\alpha, \text{ для } 1 \leq j \leq 6, \quad (5)$$

где \bar{V}_1 – средняя скорость единичного зерна.

Для определения параметров α и \bar{V}_1 из экспериментальных данных использовался метод линейного регрессионного анализа

$$Y_j = \beta + \alpha X_j. \quad (6)$$

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

Для исследуемых нами растений полученные данные можно аппроксимировать эмпирическими зависимостями, приведенными в табл. 3.

Из полученных данных следует вывод: средние значения скоростей седиментации агломератов ПЗ от числа частиц в агломерате аппроксимируются степенной зависимостью

$$\bar{V}_j = a j^k, \text{ для } 1 \leq j \leq 6, \quad (7)$$

где размерные коэффициенты a и показатель степени k находятся из экспериментальных данных для

каждого вида растений. Коэффициент корреляции принимает значения в диапазоне $0,957 \leq r \leq 0,997$; показатель степени $0,304 \leq k \leq 0,497$. Зафиксированный охват \bar{V}_j от 1,0 см/с для единичного ПЗ конопли посевной до 7,0 см/с для агломерата, состоящего из шести ПЗ сосны обыкновенной, обусловлен различием размеров исследуемых частиц.

Таблица 3

Эмпирические зависимости скорости седиментации агломератов ПЗ растений от числа зерен в них и коэффициенты корреляции

Вид	Эмпирическая зависимость \bar{V}_j , см/с	Коэффициент корреляции r
Сосна крымская	$2,7j^{0,386}$	0,997
Сосна сибирская	$2,9j^{0,456}$	0,996
Сосна обыкновенная	$3,0j^{0,493}$	0,972
Сосна горная	$2,7j^{0,462}$	0,993
Конопля посевная	$1,0j^{0,497}$	0,985
Подорожник лацетный	$1,5j^{0,304}$	0,957

Наличие в пробах распыленной пыли значительного количества агломератов, оседающих с большой скоростью, указывает на то, что подобное явление возможно и в природных условиях. Последнее предположение хорошо согласуется с тем фактом, что основное количество пыли оседает под кронами растений, ее продуцирующих. Установленные экспериментальным путем зависимости позволяют оценить скорости седиментации агломератов, которые состоят из произвольного числа зерен пыли. Это дает возможность найти эквивалентные диаметры таких частиц и использовать полученные значения при моделировании распространения пыли в атмосфере.

Заключение

При распылении пыльцы шести видов ветроопыляемых растений доля агломератов из двух или большего числа ПЗ составляет от 29 до 45% образующихся частиц. В их состав входит от 55 до 73% распыленных ПЗ. Доля агломератов от общего количества оседающих частиц и доля ПЗ в их составе примерно одинаковы как для исходно сферических, так и для ПЗ, имеющих воздушные мешки.

Скорости седиментации агломератов экспериментально определены для пыльцы сосен обыкновенной, крымской, горной, сибирской; конопли обыкновенной и подорожника ланцетного.

Для шести анемофильных видов растений установлены эмпирические зависимости скорости седиментации пылевых агломератов от числа зерен, входящих в их состав.

1. *Rogers C.A., Levetin E.* Evidence of long-distance transport of mountain cedar pollen into Tulsa, Oklahoma // *Int. J. Biometeorol.* 1998. V. 42, N 2. P. 65–72.
2. *Сладков А.Н.* Введение в спорово-пыльцевой анализ. М.: Наука, 1967. 268 с.
3. *Doskey P.V., Ugoagwu B.J.* Atmospheric deposition of macronutrients by pollen at a semi-remote site in northern Wisconsin // *Atmos. Environ.* 1989. V. 23, N 12. P. 2761–2766.
4. *Rantio-Lehtimäki A.* Aerobiology of Pollen and Pollen Antigens // *Bioaerosols Handbook* / C.S. Cox, C.M. Wathes (eds.). Boca Raton, Florida: Lewis Publishers Inc., 1995. P. 387–406.
5. *Федорова Р.В.* Количественные закономерности распространения пыльцы древесных пород воздушным путем // *Тр. АН СССР. (Тр. Ин-та географии).* 1952. Вып. 52. С. 91–103.
6. *Di-Giovanni F., Keyan P.G., Nasr M.E.* The variability in settling velocities of same pollen and spores // *Grana.* 1995. V. 34, N 1. P. 39–44.

7. *Jackson S.T., Lyford M.E.* Pollen dispersal models in quaternary plant ecology: Assumptions, parameters, and prescriptions // *Bot. Rev.* 1999. V. 65, N 1. P. 39–74.
8. *Burrows F.M.* Calculation of the primary trajectories of dust seeds, spores and pollen in unsteady winds // *New Phytol.* 1975. V. 75, N 2. P. 389–403.
9. *Owens J.N., Takaso T., Runions C.J.* Pollination in conifers // *Trends Plant sci.* 1998. V. 3, N 12. P. 1360–1385.
10. *Erdtman G.* Handbook of Palynology. Copenhagen, Denmark: Munksgaard International Publishers, 1969. 486 p.
11. *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.
12. *Harrington J.B., Metzger K.* Ragweed pollen density // *Am. J. Bot.* 1963. V. 50, N 6. P. 532–539.
13. *Дунский В.Ф.* Аэромикробиология и прогнозирование болезней растений. Аэрозоли в защите растений // *Науч. труды. М.: Наука, 1982. С. 166–191.*
14. *Истомин В.Л., Куценогий К.П.* Определение скорости седиментации спор плауна агломератов // *Теплофиз. и аэромеханика.* 2001. Т. 8, № 2. С. 295–300.
15. *Грегори Ф.* Микробиология атмосферы. М.: Мир, 1964. 372 с.
16. *Федорова Р.В., Вронский В.А.* О закономерностях рассеивания пыльцы и спор в воздухе // *Бюл. комиссии по изучению четвертичного периода.* 1980. № 50. С. 153–165.
17. *Головко В.В., Истомин В.Л., Куценогий К.П.* Определение скорости седиментации пылевых частиц (как одиночных зерен, так и их агломератов) растений, произрастающих в Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2013. Т. 26, № 6. С. 513–518.
18. *Головко В.В., Истомин В.Л., Куценогий К.П.* Определение скорости седиментации пыльцы сорных трав как индивидуальных зерен, так и их агломератов // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 7. С. 655–660.
19. *Истомин В.Л., Куценогий К.П.* Получение аэрозолей из порошкообразных материалов методом импульсного воздействия газом // *Теплофиз. и аэромеханика.* 1998. Т. 5, № 1. С. 75–79.

V.V. Golovko, V.L. Istomin. Determination of the sedimentation rate of the pollen particles of anemophilous plants growing in Western Siberia.

We have measured the sedimentation rates of the pollen particles of several species of anemogamous plants (including those introduced by a man) growing in Western Siberia (pine trees: ordinary, Siberian, mountain, Crimean; inoculum hemp, rib grass). It is shown that upon spraying, the anemophilous pollen particles are represented by both single pollen grains and agglomerates of two or more grains. The portion of agglomerates in the total number of particles deposited is estimated. The sedimentation rates of the pollen particles are determined. The sedimentation rates of the pollen agglomerates of one or more grains are measured. The dependence of the sedimentation rate on the number of grains in an agglomerate is established.