

РАДИАЦИЯ И БИОСФЕРА

УДК 532.529.5

Исследование оседания пыльцевых частиц (одиноким зерен пыльцы и их кластеров) анемофильных растений, представленных во флоре Западной Сибири

В.В. Головки¹, К.А. Хлебус², А.П. Беланова^{3*}

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

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

³Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101

Поступила в редакцию 9.04.2019 г.

Исследована седиментация пыльцевых частиц нескольких видов сорных трав, произрастающих в Западной Сибири. Подсчитана процентная доля индивидуальных зерен пыльцы и их кластеров, образующихся при распылении. Определена скорость седиментации кластеров, в состав которых входит от одного до шести зерен пыльцы. Установлена зависимость скорости седиментации кластера от числа входящих в него пыльцевых зерен.

Ключевые слова: скорость седиментации, пыльцевые зерна, кластеры, анемофильные растения, импульс воздуха; sedimentation rate, pollen grains, clusters, anemophilic plants, air impact.

Введение

Пыльца растений переносится на тысячи километров, обеспечивая генетический обмен между популяциями [1–5]. Перенос пыльцевых частиц анемофильных растений и эффективность их оседания на опыляемые растения зависят от скорости седиментации. Зная ее, можно рассчитать дальность переноса пыльцы при любой заданной высоте источника в ламинарном ветровом потоке и моделировать распространение пыльцы в турбулентном потоке воздуха. Такие модели имеют решающее значение для сокращения пыльцевого «загрязнения» семенных питомников, при оценке риска возникновения аллергических заболеваний, исследования распространения пыльцы и спор растений [6–8].

Сложная форма пыльцевых зерен (ПЗ), их деформация при высыхании, наличие кластеров из двух или большего количества ПЗ крайне затрудняют теоретические расчеты скорости седиментации переносимой по воздуху пыльцы [9–12]. Скорость седиментации ПЗ определяется экспериментально с помощью разного вида седиментометров [11, 13]. До недавнего времени преимущественно изучались скорости седиментации пыльцевых частиц растений, произрастающих на территории Северной Америки и Западной Европы. При этом в большинстве работ приводились сведения лишь о скорости оседания ин-

дивидуальных ПЗ, а скорости седиментации кластеров двух и более частиц практически не исследовались [7, 15, 16]. Не определены зависимости скоростей седиментации кластеров от количества составляющих их частиц [14]. Сама возможность распространения ветром кластеров из двух или более зерен пыльцы, как правило, не рассматривается при построении моделей ее атмосферного переноса [16, 17].

Наша работа – продолжение цикла исследований [18, 19], посвященных изучению распространения в атмосфере пыльцевых частиц. Цель цикла – определить скорости оседания пыльцевых частиц анемофильных растений, широко представленных в фитоценозах Российской Федерации.

Материалы и методы

Изучалось оседание пыльцевых частиц шести видов ветроопыляемых растений (березы мелколистной, ели колючей, лещины рогатой, лещины манчжурской, лещины разнолистной, ивы Гмелина), произрастающих на территории Центрального сибирского ботанического сада (ЦСБС) СО РАН.

Как и в более ранних исследованиях седиментации пыльцевых частиц анемофильных растений, в настоящей работе использовалась экспериментальная установка для распыления порошкообразных материалов. Устройство установки и методика проведения экспериментов на ней описаны в [18, 19].

В каждом опыте после завершения отбора образцов пыльцевые частицы, с осадком осевшие на подложку, помещали под микроскоп МБИ-11 (рис. 1).

* Владимир Викторович Головки (golovko@ns.kinetics.nsc.ru); Константин Александрович Хлебус (khlebus@hydro.nsc.ru); Анастасия Петровна Беланова (boronina.a@inbox.ru).

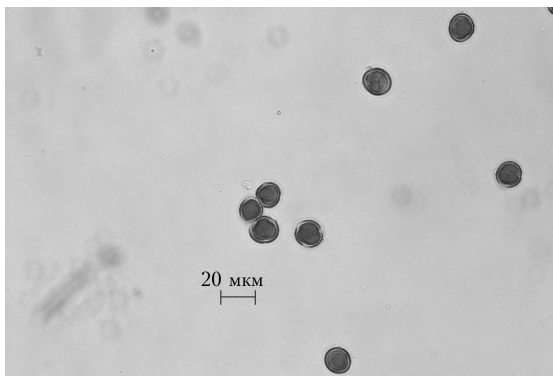


Рис. 1. Осадок на подложку пыльцевых зерен ивы

Подсчитывалось число единичных ПЗ, а также число кластеров, содержащих более одного ПЗ. Кластеры, содержащие два, три и т.д. ПЗ, подсчитывались отдельно.

Подсчет под микроскопом позволяет определить число ПЗ в кластере, а также количество кластеров, состоящих из различного числа ПЗ, осевших на разные сектора подложки. У березы мелколистной, ели колючей, лещины рогатой, лещины маньчжурской, лещины разнолистной, ивы Гмелина распознавались кластеры, содержащие до шести ПЗ. Число ПЗ в более крупных кластерах чаще всего удавалось определить лишь приблизительно, так как в некоторых из них ПЗ располагались в два и более слоя, что затрудняло подсчет. Доля кластеров из семи или более ПЗ составляла 2–3% от общего числа осевших частиц. Скорости седиментации подобных кластеров не вычислялись.

Так как участок неравномерного движения кластеров значительно меньше длины седиментационного цилиндра, при расчете скорости седиментации было сделано допущение, что кластеры равномерно оседают на подложку в течение всего периода экспозиции каждой диафрагмы. На любой из 11 секторов оседали кластеры, скорость которых находилась в пределах от V_i до V_{i+1} , где i – номер сектора [18, 19]. Последние рассчитывались по соотношению

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

где $t_i = t_\phi (i - 2)$; H – высота седиментационного цилиндра, t_ϕ – длительность экспозиции диафрагмы для каждого из исследованных видов растений, подбиравшаяся индивидуально.

Значение скорости седиментации частиц, оседающих в пределах выбранного сектора \bar{V}_i , рассчитывалось по формуле

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

где V_i и V_{i+1} – максимальная и минимальная скорости седиментации частиц i -го сектора.

Средняя скорость седиментации \bar{V}_j кластера из j зерен рассчитывалась по формуле

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

где \bar{V}_{ij} – среднее геометрическое значение скорости седиментации кластеров из j частиц, оседающих на i -й сектор; n_{ij} – число кластеров из j частиц, осевших на i -й сектор.

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

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

Результаты и обсуждение

При распылении образуется огромное количество кластеров, состоящих из двух или более ПЗ. В табл. 1 приводятся данные о доле кластеров от общего числа частиц, осевших на подложку; доле ПЗ в составе кластеров из двух или более зерен от общего количества ПЗ, осевших на подложку. При распылении навесок пыльцы в седиментометре пыльцевые кластеры составляют от 31,9 (ель колючая) до 44,7% (ива Гмелина) от общего количества образующихся частиц, при этом в их состав входит от 55,6 до 74,3% распыленных ПЗ.

Таблица 1

Вклад кластеров ПЗ в количество пыльцевых 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, %
Береза мелколистная	37,0	64,5
Ель колючая	31,9	55,6
Лещина рогатая	39,1	67,3
Лещина маньчжурская	36,3	61,6
Лещина разнолистная	42,2	70,3
Ива Гмелина	44,7	74,3

Для индивидуальных частиц и для кластеров наблюдается заметный разброс скоростей седиментации. Количество подсчитанных кластеров (j от 1 до 6), среднегеометрические значения и среднегеометрические отклонения их скоростей седиментации шести видов растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН, приведены в табл. 2.

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

Результаты определения скоростей седиментации ПЗ и их кластеров шести видов растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН

j	Параметр	Береза мелколистная	Ель колючая	Лещина рогатая	Лещина маньчжурская	Лещина разнолистная	Ива Гмелина
1	n	2739	3464	2631	1974	2849	1342
	\bar{V}	2,1	10,1	2,0	2,2	1,8	1,2
	σ_g	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4
2	n	734	998	812	611	903	406
	\bar{V}	2,7	13,0	2,5	2,8	2,3	1,6
	σ_g	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4
3	n	388	345	344	280	474	245
	\bar{V}	3,1	14,6	2,9	3,2	2,7	1,8
	σ_g	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2	1,4
4	n	247	159	216	135	331	158
	\bar{V}	3,5	15,7	3,2	3,5	3,0	2,1
	σ_g	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3
5	n	127	74	152	51	178	107
	\bar{V}	3,8	17,9	3,5	3,5	3,1	2,4
	σ_g	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3
6	n	79	30	81	32	107	69
	\bar{V}	4,1	19,2	3,7	3,7	3,5	2,6
	σ_g	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,3

* \bar{V} измеряется в см/с; n – число кластеров.

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 разброс значений скоростей седиментации при оседании уменьшается.

Скорость оседания кластера возрастает с увеличением количества составляющих его частиц. Ранее нами было показано [18], 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

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

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

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

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

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, предложенными в табл. 3.

Таблица 3

Эмпирические зависимости и коэффициенты корреляции

Видовое название	Эмпирическая зависимость \bar{V}_j , см/с	Коэффициент корреляции r
Береза мелколистная	$2,1 \cdot j^{0,372}$	0,999
Ель колючая	$10,1 \cdot j^{0,349}$	0,991
Лещина рогатая	$2,0 \cdot j^{0,347}$	0,999
Лещина маньчжурская	$2,2 \cdot j^{0,290}$	0,976
Лещина разнолистная	$1,8 \cdot j^{0,360}$	0,993
Ива Гмелина	$1,2 \cdot j^{0,428}$	0,990

Данные табл. 3 можно подытожить следующим выводом: полученные средние значения скоростей седиментации кластеров ПЗ, в зависимости от числа частиц в кластере, аппроксимируются степенной зависимостью вида

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

где размерные коэффициенты a (т.е. \bar{V}_1) и показатель степени k находятся из экспериментальных данных для каждого вида растений; $0,990 \leq r \leq 0,999$, $0,290 \leq k \leq 0,428$. Зафиксированный диапазон \bar{V}_j от 1,2 см/с для единичного ПЗ ивы Гмелина до 19,2 см/с для кластера из шести ПЗ ели колючей обусловлен различием размеров исследуемых частиц. Наличие в пробах распыленной пыли значительного количества кластеров, оседающих с большой скоростью, указывает на то, что подобное явление

ние возможно и в природных условиях. Последнее предположение хорошо согласуется с тем фактом, что основное количество пыльцы оседает под кронами растений, ее продуцирующих. Установленные экспериментальным путем зависимости позволяют оценить скорости седиментации кластеров, состоящих из произвольного числа зерен пыльцы, что дает возможность оценить эквивалентные диаметры таких частиц и использовать полученные значения при моделировании распространения пыльцы в атмосфере.

Заключение

Установлено, что при экспериментальном распылении пыльцы шести исследованных видов ветроопыляемых растений образуется значительное количество кластеров из двух или более ПЗ, на долю которых приходится 31,9–44,7% образующихся частиц, при этом в их состав входит 55,6–74,3% распыленных ПЗ.

Для пыльцы березы мелколистной, ели колючей, лещины рогатой, лещины маньчжурской, лещины разнолистной, ивы Гмелина экспериментально определены скорости седиментации кластеров, в состав которых входит от одного до шести ПЗ.

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

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 П.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., Lypord 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. Munksgaard, Copenhagen, Denmark. 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 Sci.* 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. тр.* 1982. С. 166–191.
 14. Истомин В.Л., Куценогий К.П. Определение скорости седиментации спор плауна кластеров // *Теплофизика и аэромеханика*. 2001. Т. 8, № 2. С. 295–300.
 15. Грегори Ф. Микробиология атмосферы. М.: Мир, 1964. 372 с.
 16. Федорова П.В., Вронский В.А. О закономерностях рассеивания пыльцы и спор в воздухе // *Бюл. комиссии по изучению четвертичного периода*. 1980. N 50. С. 153–165.
 17. 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.
 18. Головки 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. Головки В.В., Истомин В.Л. Определение скорости седиментации пыльцевых частиц анемофильных растений, произрастающих в Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 9. С. 806–810.

V.V. Golovko, K.A. Hlebus, A.P. Belanova. Study of sedimentation of pollen particles (individual grains and their clusters) of anemophilous plants growing in Western Siberia.

The sedimentation of pollen particles of the weeds of several species growing in Western Siberia is studied. The percentage of individual grains and their clusters resulting from spraying is calculated. The sedimentation rate of clusters, consisting of one to six pollen grains, is determined. The sedimentation rate of clusters is found to depend on the number of pollen grains involved.