

УДК 551.52

Определение аэродинамических диаметров пыльцевых зерен и их агломератов растений Западной Сибири*

В.Л. Истомин¹, К.П. Куценогий², В.В. Головко²

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²Институт химической кинетики и горения СО РАН, Новосибирск

E-mail: igil@hydro.nsc.ru

Излагаются результаты определения аэродинамических характеристик 17 видов растений Западной Сибири, доминирующих в ее экосистеме. Исследовалась пыльца злаков и древесных растений. Определялась скорость седиментации как одиночных пыльцевых зерен, так и их агломератов. На основании полученных данных для всех исследованных видов растений вычислены их аэродинамические диаметры.

Ключевые слова: седиментация, пыльцевые зерна, агломерат, скорость, аэродинамический диаметр, несферические частицы.

Введение

Одной из важнейших составляющих аэрозолей атмосферы земли является пыльца анемофильных растений. В природе пыльца анемофильных растений представлена как индивидуальными пыльцевыми зёрнами (ПЗ), так и их агломератами, которые также участвуют в процессе переноса пыльцы [1]. Важным фактором, определяющим перенос ПЗ в воздухе, является их скорость седиментации. От этой аэродинамической характеристики зависит, насколько быстро пыльца покидает растительный полог, сколько времени остается взвешенной в воздухе.

Скорость седиментации взвешенных в воздухе ПЗ определяется их размером, формой, плотностью, характером поверхности, вязкостью и плотностью воздуха, а также силой тяжести. Для однородных сферических частиц размером от 1 до 100 микрометров и малых чисел Re ($Re < 1$) она описывается, как правило, следующим выражением:

$$V_s = \frac{D_\tau^2 g (\rho_\tau - \rho)}{18\nu}, \quad (1)$$

где V_s — скорость седиментации, ρ — плотность воздуха, ν — кинематическая вязкость воздуха, D_τ — диаметр частицы, ρ_τ — плотность частицы и g — ускорение свободного падения [2].

* Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 3695).

Однако ПЗ многих растений имеют более сложную форму, например, снабжены воздушными мешками, снижающими их общую плотность (пыльца хвойных), либо покрыты многочисленными шипами (пыльца цикория), влияющими на лобовое сопротивление. При контакте с атмосферным воздухом ПЗ подсыхают, уменьшаются в объеме и деформируются [3]. Время высыхания сопоставимо с длительностью высыхания пыльцы из пыльников. Поэтому даже исходно почти сферические ПЗ злаков, тополей, лиственницы часто присутствуют в атмосфере в виде деформированных частиц неправильной формы (рис. 1).

Важной особенностью пылевого аэрозоля является присутствие в нем агломератов из двух и более ПЗ. По литературным данным и нашим экспериментам в воздухе регулярно и в значительных количествах встречались агломераты ПЗ практически всех растений, представленных в атмосфере. При образовании агломератов изменяются все аэродинамические характеристики частицы [4]. Воздушные полости между ПЗ снижают эффективную плотность частицы, агломераты могут заметно отклоняться от сферической формы и иметь неровную поверхность, повышающую лобовое сопротивление. Теоретические расчеты скорости седиментации пыльцы по формуле (1) весьма затруднительны, так как требуют многочисленных добавок к этой формуле, поэтому ее измеряют экспериментально [4].

В настоящее время определены скорости седиментации ПЗ около 120 видов растений [5] преимущественно индивидуальных ПЗ, в основном древесных растений, произрастающих на территории Европы и Северной Америки. Значительно хуже изучена пыльца растений, доминирующих в растительном покрове Западной Сибири.

Методы исследований и результаты экспериментов

Исследованные нами виды злаков цветут в разное время суток как при низкой 34–57 % (житняк, костец), так и при высокой 85–97 % (ежа, тимopheевка) относительной влажности воздуха [6]. Поэтому нами не предпринимались усилия по поддержанию максимально низкой относительной влажности воздуха. Температура и относительная влажность воздуха во время экспериментов определялись

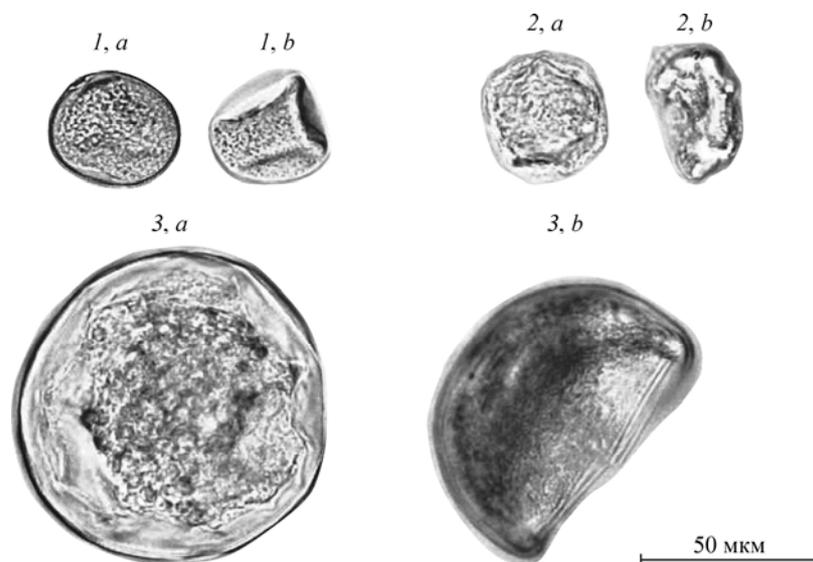


Рис. 1. Изменение размеров пылевых зерен при высыхании.

Фотографии влажных (а) и сухих (б) пылевых зерен ежи сборной (1), тополя черного (2) и лиственницы сибирской (3).

с помощью психрометра (табл. 1). Собранная пыльца хранилась в бумажных пакетах при той же температуре и относительной влажности воздуха, при которых производились эксперименты.

Для определения объема насыщенных водой ПЗ применялся метод фотограмметрической обработки их оцифрованных изображений. В ходе вычислений использовались те же образцы пыльцы, что и для определения скорости седиментации. Определение объема производилось по изображениям ПЗ, заключенных в глицерин-желатиновую среду с добавлением красителя кумаши голубого, снятых в экваториальной проекции. Фотографическое изображение пыльцевого зерна фактически является его сечением, последнее можно аппроксимировать эллипсом, а само зерно — эллипсоидом вращения. После калибровки исходных растровых изображений на полученных снимках производилась зарисовка границ изображений пыльцевых зерен, определение их площадей и периметров. Длина малой и большой полуосей эллипсоида вращения, а также его объем вычислялись по найденным значениям площадей и периметров изображений зерен пыльцы. Метод фотограмметрической обработки был использован для вычисления различных геометрических параметров ПЗ [7].

Среднегеометрические значения периметров и площадей экваториальных проекций пыльцевых зерен приводятся в табл. 2.

В проведенных сериях опытов общее количество ПЗ и их агломератов, оседавших на подложки в каждой серии опытов, колебалось от 2,5 до 65 тысяч (см. табл. 1). У всех исследованных злаковых и древесных растений всегда встречались агломераты ПЗ, состоящие из двух или более частиц. Количество агломератов уменьшалось с увеличением числа частиц в агломерате. Несмотря на то, что опыты проводились при малом разбросе температур ($T_c = 24,0 \pm 0,5$) и при значительном разбросе относительной влажности воздуха, процентные доли единичных зерен у пыльцы исследованных злаковых и древесных растений (лиственница, осина и тополь) были близкими. Это связано с тем, что они имеют форму, близкую к эллипсоиду, в отличие от березы, ели и сосны.

Минимальное количество агломератов ПЗ при $n \geq 2$ отмечено у житняка — 17,7 %, а максимальное у двукосточника — 35,7 % для злаковых растений. У древесных растений разница между минимумом и максимумом больше (соответственно у лиственницы — 13,7 %, у сосны — 44,6 %).

Скорость седиментации ПЗ в неподвижном воздухе традиционно определяют по времени, необходимому для их оседания от вершины до дна вертикального цилиндра с различными модификациями [8, 9]. Для измерения скорости седиментации пыльцы использовалась установка, разработанная в СО РАН и апробированная при определении скоростей седиментации спор [10].

В ходе экспериментов пыльцевые частицы оседали через окно в виде сектора в диафрагме на круглую стеклянную пластину, покрытую глицерин-желатином. Пыльца загружалась в дозатор и импульсом сжатого воздуха распылялась в верхнюю часть седиментометра. Через определенный интервал времени после распыления пыльцы открывалась заслонка, и производился поворот щелевой диафрагмы. Смены щелевой диафрагмы в опытах осуществлялись через строго определенные интервалы времени. Так как участок неравномерного движения значительно меньше длины седиментационного цилиндра, при расчете скорости седиментации сделано допущение, что частицы движутся равномерно и оседают на подложку в течение всего периода экспозиции каждого сектора. Подсчет ПЗ и их агломератов, осевших на стеклянные подложки, производился под микроскопом, причем агломераты подсчитывались отдельно. Данная методика позволяла идентифицировать агломераты, в состав которых входило до 6 индивидуальных зерен пыльцы.

Таблица 1

Условия среды и численность агломератов пылевых зерен

№	Видовое название	Условия среды		Общее число агломератов	Процент от общего количества подсчитанных агломератов, %						Общее число пылевых зерен	Процент ПЗ агломератов для (≥ 2) частиц, %	
		T, °C	RH, %		1	2	3	4	5	6			> 6
Злаковые растения													
1	Двукисточник тростниковый	27,5	41	5859	86,25	9,30	2,58	0,90	0,43	0,32	0,22	7146	29,29
2	Ежа сборная	22,0	65	9592	79,81	12,27	3,92	1,80	1,15	0,46	0,59	13081	41,48
3	Житняк гребенчатый	24,0	71	2411	82,33	13,15	3,36	0,91	0,17	0,08	0,00	2982	33,43
4	Кострец безостый	25,0	74	2572	79,28	15,16	4,08	1,21	0,23	0,04	0,00	3294	38,10
5	Овсяница луговая	23,0	81	12469	70,42	17,59	7,02	2,65	1,32	0,58	0,42	18770	53,22
6	Овсяница тростниковая	24,0	82	10090	75,73	14,18	5,86	2,24	1,08	0,59	0,32	14319	46,64
7	Полевика гигантская	23,5	86	14639	73,79	15,09	5,76	2,76	1,35	0,65	0,60	21594	49,96
8	Пырей ползучий	24,5	73	4100	78,61	14,71	3,90	1,34	0,85	0,32	0,27	5469	41,07
9	Пырей средний	22,5	72	4590	77,73	14,36	4,62	1,53	0,85	0,44	0,47	6290	43,28
10	Райграс высокий	21,0	64	7167	76,57	15,88	5,26	1,62	0,53	0,11	0,03	9612	42,90
11	Тимофеевка луговая	22,0	61	15695	74,40	13,48	5,52	2,68	1,64	0,99	1,29	23976	51,30
Древесные растения													
1	Береза бородавчатая	–	50	55946	68,77	18,32	6,93	3,17	1,41	0,69	0,70	86984	55,77
2	Ель сибирская	–	63	3079	59,76	19,71	7,05	5,16	3,77	1,95	2,60	5890	68,76
3	Лиственница сибирская	–	60	160	86,25	8,75	1,88	1,25	0,63	0,63	0,63	201	31,34
4	Осина	–	49	64811	77,37	14,00	4,73	2,17	0,95	0,42	0,37	89620	44,05
5	Сосна обыкновенная	–	51	13553	55,36	20,63	9,21	5,51	3,81	2,34	3,14	27616	72,83
6	Тополь черный	–	38	15968	85,72	9,93	2,75	1,13	0,33	0,10	0,04	19306	29,10

Таблица 2

Некоторые геометрические характеристики пылевых зерен

№	Видовое название	Периметр, $L \cdot 10$, мкм	Площадь, $S \cdot 10^2$, мкм ²	Объем эллипсоида, $V \cdot 10^3$, мкм ³
Злаковые растения				
1	Двукосточник тростниковый	12,1	11,5	52,3
2	Ежа сборная	10,9	9,3	40,8
3	Житняк гребенчатый	12,6	12,3	61,8
4	Кострец безостый	13,9	15,2	86,5
5	Овсяница луговая	11,2	9,9	44,5
6	Овсяница тростниковая	11,7	10,6	47,9
7	Полевица гигантская	9,7	6,4	23,6
8	Пырей ползучий	13,4	14,0	75,4
9	Пырей средний	15,3	18,2	109,7
10	Райграс высокий	12,8	12,8	86,5
11	Тимофеевка луговая	11,4	10,2	46,6
Древесные растения				
1	Береза бородавчатая	8,1	5,0	7,4
2	Ель сибирская	28,9	63,4	307,2
3	Лиственница сибирская	24,9	48,2	225,2
4	Осина	9,7	72,8	13,0
5	Сосна обыкновенная	19,6	25,8	69,5
6	Тополь черный	9,7	7,3	12,9

Скорость седиментации рассчитывалась как для одиночных ПЗ, так и для агломератов, в состав которых входило от двух до шести пылевых зерен, если число таких агломератов, осевших на подложки во всей серии опытов, превышало десять единиц. Средняя геометрическая скорость седиментации \overline{V}_j агломерата, состоящего из j зерен, определялась по следующему соотношению:

$$V_j = \exp \left(\frac{\sum_i n_{ij} \ln(\overline{V}_{ij})}{\sum_i n_{ij}} \right), \quad (2)$$

где i — порядковый номер отпечатавшегося на подложке сектора, \overline{V}_{ij} — среднее значение скорости седиментации агломератов из j пылевых зерен, оседающих в пределах i -го сектора, n_{ij} — число агломератов из j частиц, осевших на i -ый сектор.

Величина стандартного геометрического отклонения агломерата σ_{gj} , состоящего из j зерен пыльцы определялась соотношением

$$\sigma_{gj} = \exp \sqrt{\frac{\sum_i n_{ij} (\ln(\overline{V}_{ij}) - \ln(\overline{V}_j))^2}{\sum_i n_{ij}}}. \quad (3)$$

Результаты определения значений среднегеометрической скорости седиментации исследованных ПЗ, а также среднеквадратичное отклонение представлены в табл. 3. При этом как для индивидуальных ПЗ, так и для их агломератов отличается некоторый разброс скоростей седиментации. Это различие скоростей седиментации агломератов, состоящих из одинакового количества ПЗ, показано на примере ПЗ ели сибирской, осевших на подложку седиментометра рис. 2.

Таблица 3

Статистические характеристики скорости седиментации агломератов пылевых зерен

№	Видовое название	Средняя геометрическая скорость, см/с						Стандартное геометрическое отклонение σ_g					
		Число пылевых зерен в агломерате						Число пылевых зерен в агломерате					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Злаковые растения													
1	Двукосточник тростниковый	3,1	4,3	5,2	5,9	6,5	6,7	1,41	1,43	1,27	1,35	1,30	1,25
2	Ежа сборная	2,8	4,1	5,4	6,7	8,0	9,9	1,39	1,40	1,38	1,38	1,39	1,32
3	Житняк гребенчатый	3,9	4,8	5,4	5,7	—	—	1,33	1,26	1,26	1,24	—	—
4	Кострец безостый	4,2	5,3	6,0	6,6	—	—	1,40	1,37	1,34	1,27	—	—
5	Овсяница луговая	3,0	4,1	4,6	5,0	5,3	5,4	1,45	1,37	1,29	1,25	1,22	1,21
6	Овсяница тростниковая	3,4	4,5	5,2	5,8	6,3	6,5	1,48	1,44	1,40	1,40	1,38	1,38
7	Полевика гигантская	1,9	2,6	3,1	3,3	3,5	3,8	1,45	1,40	1,30	1,25	1,24	1,20
8	Пырей ползучий	4,4	5,5	6,4	8,1	8,6	10,0	1,40	1,36	1,36	1,31	1,29	1,27
9	Пырей средний	5,4	7,3	9,1	12,4	13,4	14,5	1,48	1,51	1,44	1,38	1,33	1,20
10	Райграс высокий	3,6	4,4	4,7	4,9	5,0	5,2	1,21	1,16	1,12	1,10	1,07	1,06
11	Тимофеевка луговая	3,2	4,5	5,7	7,0	8,2	8,7	1,44	1,43	1,46	1,41	1,40	1,38
Деревесные растения													
1	Береза бородавчатая	1,4	1,8	2,2	2,5	2,7	3,0	1,32	1,32	1,30	1,28	1,29	1,29
2	Ель сибирская	6,4	8,4	9,7	10,6	11,0	11,2	1,25	1,20	1,18	1,13	1,09	1,06
3	Лиственница сибирская	12,6	15,8	18,0	25,7	—	—	1,33	1,17	1,00	1,00	—	—
4	Осина	2,1	2,7	3,0	3,3	3,6	3,8	1,47	1,35	1,33	1,32	1,30	1,30
5	Сосна обыкновенная	3,0	4,0	5,0	5,9	6,5	7,0	1,37	1,39	1,30	1,33	1,31	1,31
6	Тополь черный	2,0	2,7	3,2	3,5	3,6	3,8	1,53	1,44	1,29	1,24	1,23	1,22

Данный разброс в скоростях седиментации для всех агломератов ПЗ обусловлен, как уже говорилось выше, их высыханием и изменением формы агломератов.

Вычисленные средние геометрические значения скоростей седиментации \bar{V}_j агломератов и стандартные геометрические отклонения σ_{gi} указывают на то, что скорости седиментации как индивидуальных ПЗ, так и их агломератов варьируют в достаточно широких пределах (см. табл. 2). Несмотря на значительное число подсчитанных индивидуальных ПЗ и их дублетов, стандартные геометрические отклонения скоростей седиментации таких частиц практически не отличаются от стандартных геометрических отклонений агломератов из трех, четырех, пяти и шести зерен.

Скорости оседания агломерата возрастают с увеличением количества составляющих их частиц. Было показано, что зависимость скорости седиментации агломератов от числа составляющих их частиц хорошо аппроксимируются степенной зависимостью.

Аппроксимационные зависимости даются из предположения, что:

$$\bar{V}_j = \bar{V}_1 j^k, \text{ для } 1 \leq j \leq 6, \quad (4)$$

где \bar{V}_j — средняя скорость агломерата, состоящего из j частиц, \bar{V}_1 — средняя скорость единичного зерна.

Для исследованных нами растений полученные данные (см. табл. 3) можно аппроксимировать эмпирическими зависимостями, представленными в табл. 4. Из этой таблицы видно, что в зависимости от вида растения коэффициент корреляции r находится в диапазоне $0,977 \leq r \leq 0,999$, а k принимает значения от 0,20 до 0,69.

По данным зарубежных исследований [4, 11, 12] значение коэффициента k изменяется незначительно в пределах от 0,50 до 0,53. По нашим экспериментальным данным коэффициент меняется для исследованных ПЗ 17 видов растений почти в 3,5 раза, как это следует из табл. 4.

Перенос пыльцевых зерен различных анемофильных растений в атмосфере определяется действующим на частицу сопротивлением потока воздуха, силой тяжести, а также размером и формой частицы [13, 14]. Для расчета этого движения

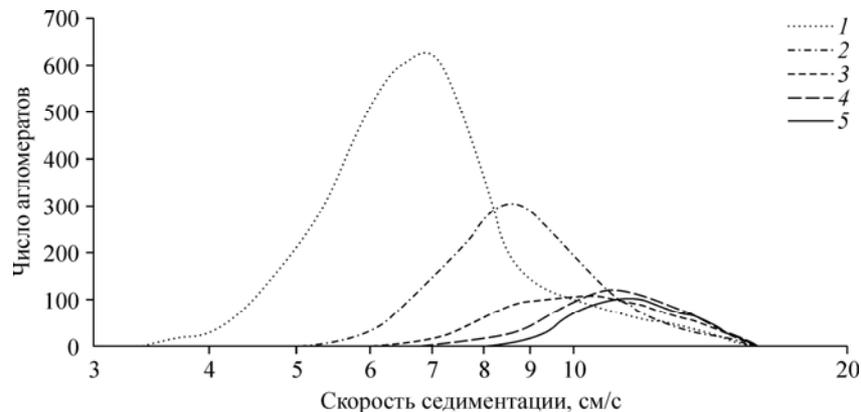


Рис. 2. Распределение скорости седиментации пыльцевых агломератов ели сибирской: одного (1), двух (2), трех (3), четырех (4), пяти (5) зерен.

Таблица 4

Эмпирические зависимости скорости седиментации от числа пылевых зерен в агломерате

№/пп	Пыльца растений	Эмпирическая зависимость \bar{V}_j , см/с	Коэффициент корреляции, r
Злаковые растения			
1	Двукосточник тростниковый	$3,1j^{0,41}$	0,991
2	Ежа сборная	$2,8j^{0,69}$	0,993
3	Житняк гребенчатый	$3,9j^{0,29}$	0,999
4	Кострец безостый	$4,2j^{0,33}$	0,999
5	Овсяница луговая	$3,0j^{0,33}$	0,992
6	Овсяница тростниковая	$3,4j^{0,39}$	0,991
7	Полевица гигантская	$1,9j^{0,40}$	0,996
8	Пырей ползучий	$4,4j^{0,46}$	0,986
9	Пырей средний	$5,4j^{0,58}$	0,991
10	Райграсс высокий	$3,6j^{0,20}$	0,983
11	Тимофеевка луговая	$3,2j^{0,59}$	0,995
Древесные растения			
1	Береза бородавчатая	$1,4j^{0,42}$	0,996
2	Ель сибирская	$6,4j^{0,32}$	0,977
3	Лиственница сибирская	$12,6j^{0,47}$	0,990
4	Осина	$2,1j^{0,32}$	0,998
5	Сосна обыкновенная	$3,0j^{0,49}$	0,996
6	Тополь черный	$2,0j^{0,36}$	0,980

введено понятие аэродинамического диаметра d_s . Эквивалентный аэродинамический диаметр несферических частиц равен диаметру сферической частицы с плотностью в $1,0 \text{ г/см}^3$, а ее скорость седиментации равна скорости реальной частицы. Вычисляется этот аэродинамический параметр с помощью соотношения Осеена для движения в интервале $0,1 < Re < 6,0$ [15] с использованием экспериментально определенной скорости седиментации.

Результаты этих вычислений, основанные на измеренных скоростях седиментации различных растений Сибирского региона (см. табл. 3), представлены в табл. 5.

Заключение

В ходе проведенных исследований впервые определены скорости седиментации пылевых зерен 17 видов злаковых и древесных растений Сибирского региона как для единичных пылевых зерен, так и их агломератов.

Найденные аэродинамические диаметры ПЗ и их агломераты всех исследованных растений Сибирского региона позволяют вести расчеты переноса пылевых зерен этих растений, в том числе имеющих пылевые зерна сложной геометрической формы (например, ель сибирская).

Выполнены расчеты эмпирических зависимостей скоростей седиментации агломератов пылевых зерен перечисленных выше видов злаковых и древесных растений.

Показано, что степенной коэффициент k в этих зависимостях не являются постоянной величиной, а меняется для исследованных видов злаков и древесных растений региона Западной Сибири в пределах $0,02 \leq k \leq 0,69$ при коэффициенте корреляции в диапазоне $0,977 \leq r \leq 0,999$.

Таблица 5

Аэродинамический диаметр агломератов пылевых зерен

№	Видовое название	Средний аэродинамический диаметр, мкм						Стандартное геометрическое отклонение σ_g , мкм					
		Число пылевых зерен в агломерате						Число пылевых зерен в агломерате					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Злаки													
1	Двукосточник тростниковый	32,3	38,1	41,9	44,6	46,8	47,5	1,19	1,20	1,13	1,16	1,14	1,12
2	Ежа сборная	30,7	37,2	42,7	47,5	52,0	57,8	1,18	1,18	1,17	1,17	1,18	1,15
3	Житняк гребенчатый	36,3	40,2	42,7	43,9			1,15	1,12	1,12	1,11		
4	Кострец безостый	37,6	42,3	45,0	47,2			1,18	1,17	1,16	1,13		
5	Овсяница луговая	31,8	37,2	39,4	41,1	42,3	42,7	1,20	1,17	1,14	1,12	1,10	1,10
6	Овсяница тростниковая	33,9	39,4	41,9	44,6	44,6	46,5	1,22	1,20	1,18	1,18	1,17	1,17
7	Полевика гигантская	25,3	29,6	32,3	33,4	34,4	35,8	1,20	1,18	1,14	1,12	1,11	1,10
8	Пырей ползучий	38,5	43,1	46,5	52,3	53,9	58,1	1,18	1,17	1,17	1,14	1,14	1,13
9	Пырей средний	42,7	49,6	55,4	64,7	67,2	70,0	1,22	1,23	1,20	1,17	1,15	1,10
10	Райграс высокий	34,9	38,5	39,8	40,7	41,1	41,9	1,10	1,08	1,06	1,05	1,03	1,03
11	Тимофеевка луговая	32,9	39,0	43,9	48,6	52,6	54,2	1,20	1,20	1,21	1,19	1,18	1,17
Древесные													
1	Береза бородавчатая	21,7	24,6	27,2	29,0	30,2	31,8	1,32	1,32	1,30	1,28	1,29	1,29
2	Ель сибирская	46,5	53,2	57,2	59,8	60,9	61,5	1,25	1,20	1,18	1,13	1,09	1,06
3	Лиственница сибирская	65,2	73,0	77,9	93,1			1,33	1,17	1,00	1,00		
4	Осина	26,6	30,2	31,8	33,4	34,9	35,8	1,47	1,35	1,33	1,32	1,30	1,30
5	Сосна обыкновенная	31,8	36,7	41,1	44,6	46,8	48,6	1,37	1,39	1,30	1,33	1,31	1,31
6	Тополь черный	26,0	30,2	32,9	34,4	34,9	35,8	1,53	1,44	1,29	1,24	1,23	1,22

Список литературы

1. **Ogden E.C., Haes J.V., Raynor G.S.** Diurnal partens of pollen emission in ambrosia, phleum, zea and riginus // Amer. J. Bot., 1969. Vol. 56, No 1. P. 16–21.
2. **Ханпель Дж., Бренер Г.** Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. М: Мир, 1976. 630 с.
3. **Erdtman G.** An introduction to pollen analysis // Chronica Botanica. New York: The Ronald Press Company, 1953. Vol. XII. 239 p.
4. **Lancey J.** Aggregation of spores and its effect on aerodynamic // Grana. 1995. Vol. 34. P. 39–44.
5. **Jackson S.T., Lyford M.E.** Pollen dispersal models in quaternary plant ecology: assumptions, parameters and prescriptions // The Botanical Review. 1999. Vol. 65, No 1. P. 39–74.
6. **Пономарев А.Н.** Экология цветения злаков и люцерны // Ботанический журнал. 1954. Т. 39, № 5. С. 706–719.
7. **Головки В.В., Куценогий К.П., Киров Е.И., Трубина Л.К., Гук А.П.** Использование фотограмметрии для определения характеристик пыльцы // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 9. С. 882–885.
8. **Di-Giovanni F., Keyan P.G., Nasr M.E.** The variability in settling velocities of same pollen and spores // Grana. Vol. 34. P. 39–44.
9. **Zeleny J., McKeehan L.W.** Die endgeschwindigkeit des falles kleiner kugeln in luft // Phis. Z. 1910. Vol. 11. P. 78–93.
10. **Истомин В.Л., Куценогий К.П.** Определение скорости седиментации спор плауна и их агломератов // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 2. С. 295–300.
11. **Ferrandino F.J., Aylor D.E.** Settling speed of cluster of spores // Phytopathology. 1984. Vol. 74. P. 969–972.
12. **McCartney N.A., Bainbridge A.** Deposition of erysiphe graminis conidia conidia on a barley crop. 1 Sedimentation and impaction // J. Phytopathol. 1987. Vol. 118. P. 243–257.
13. **Stöber W., Flachbart H.** Sire-separating precipitation of aerosols in a spinning spiral dust // Environ. Sci. Technol. 1969. Vol. 3. P. 1280–1296.
14. **Грин Х., Лейн В.** Аэрозоли: пыли, дымы, туманы. Л.: Химия. 1969. С. 427.
15. **Истомин В.Л., Куценогий К.П.** Методика определения аэродинамического диаметра аэрозольных частиц сложной геометрической формы в диапазоне чисел Рейнольдса от 0,1 до 6,0 // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 1. С. 77–83.

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2011 г.