

## Определение скорости седиментации пыльцевых частиц (как одиночных зерен, так и их агломератов) растений, произрастающих в Западной Сибири

В.В. Головко<sup>1</sup>, В.Л. Истомин<sup>2</sup>, К.П. Куценогий<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

<sup>2</sup>Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15

Поступила в редакцию 28.01.2013 г.

Исследована седиментация пыльцевых частиц кукурузы, пихты сибирской, клена ясенелистного, ореха маньчжурского, облепихи крушиновидной, дуба черешчатого. Показано, что при распылении пыльцы данных шести видов растений образуется значительное количество агломератов из 2 или большего числа зерен, на долю которых приходится от 33,3 до 44,8% образующихся частиц, при этом в состав данных агломератов входит от 60,4 до 72,3% распыленной пыльцы. Определена скорость седиментации агломератов, в состав которых входит от 1 до 6 зерен пыльцы. Установлена зависимость скорости седиментации агломерата от числа входящих в него пыльцевых зерен.

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

### Введение

Пыльца растений, будучи одной из наиболее массовых и широко распространенных компонентов биоаэрозоля, переносится на тысячи километров, обеспечивая генетический обмен между популяциями, вызывая сезонные вспышки аллергических заболеваний у людей, живущих на больших расстояниях от ареала обитания растений [1–5]. Расстояние, на которое уносятся частицы пыльцы, тесно связано с временем, в течение которого они могут парить в воздухе: чем оно больше, тем дальше может занести пыльцу. Таким образом, дальность переноса пыльцевых частиц анемофильных растений и эффективность их оседания на опыляемые растения зависят от аэродинамического диаметра, определяемого по скорости седиментации. Зная ее, можно теоретически рассчитать дальность переноса пыльцы при любой заданной высоте источника в ламинарном ветровом потоке, моделировать распространение пыльцы в турбулентном потоке воздуха. Такие модели имеют решающее значение для сокращения пыльцевого «загрязнения» семенных питомников, при оценке риска возникно-

вения аллергических заболеваний, исследовании распространения пыльцы и спор растений [6, 7].

Сложная форма пыльцевых зерен (ПЗ), деформация их при высыхании, наличие агломератов из двух или большего количества ПЗ крайне затрудняют теоретические расчеты скорости седиментации переносимой по воздуху пыльцы [8–11]. В связи с этим скорость седиментации ПЗ определяется экспериментально, как правило с помощью разного вида седиментометров [10, 12, 13]. До настоящего времени не описаны скорости седиментации ПЗ большинства видов растений. За редкими исключениями приводятся лишь скорости оседания индивидуальных ПЗ, а скорости седиментации агломератов двух и более частиц практически не изучены [7, 14, 15]. Не определены зависимости скоростей седиментации агломератов от количества составляющих их частиц [13].

Основными целями работы были: 1) исследование агрегатного состава пыльцевого аэрозоля, образующегося при распылении пыльцы; 2) экспериментальное исследование скоростей седиментации ПЗ и их агломератов шести видов растений (кукурузы, пихты сибирской, клена ясенелистного, ореха маньчжурского, облепихи крушиновидной, дуба черешчатого), произрастающих на территории Западной Сибири; 3) установление зависимости скорости седиментации агломератов от числа входящих в их состав ПЗ.

\* Владимир Викторович Головко (golovko@ns.kinetics.nsc.ru); Истомин Вячеслав Лазаревич (impuls@hydro.nsc.ru); Константин Петрович Куценогий (koutsen@ns.kinetics.nsc.ru).

## Техника эксперимента

Экспериментальная установка (рис. 1, *а*) состоит из двух основных блоков: I — дозирующей системы и II — собственно седиментометр.

Дозирующая система является системой импульсного распыления и состоит из дозатора 1, в который помещается исследуемая пыльца, воздуховода 2, ресивера 3, электроконтактного манометра 4, электроклапана 5. Собственно седиментатор (II) представляет собой цилиндр 6, который разделен заслонкой 7 на две части. Его верхняя часть — приемник распыленного вещества, поступающего из дозирующей системы I через сопло 8. Она сверху оканчивается фильтродержателем 9 с установленными на металлической сетке фильтрами типа АФА-ХА-18 для выхода воздуха. Нижняя часть цилиндра седиментатора оканчивается храповым устройством 10, содержащим стеклянный диск для сбора распыленной пылицы.

Это устройство (рис. 1, *б*) представляет собой неподвижную щелевую диафрагму 1 с окном 2, имеющим вид сектора. Ниже лежит сменный стеклянный диск 3 на вращающемся ложе 4, которое зафиксировано стопором 5 относительно храповика 6. Ложе со стеклянным диском может вращаться с переменной скоростью и имеет несколько фиксированных положений. Вращение стекла на заданный угол осуществляется храповым устройством 6. Фотография поворотного храпового устройства представлена на рис. 2, *а*.

В экспериментах использовался вертикальный цилиндрический канал с внутренним диаметром 70 мм. Длина нижней части от заслонки 7 (см. рис. 1, *а*) до стеклянного диска 3 (см. рис. 1, *б*) составляла 3080 мм. Объем ресивера 300 см<sup>3</sup>, начальное давление в нем 5 атм. В установке использовано импульсное распыление на основные элементы, предложенное в работе [16]. В сочетании со вторым блоком (седиментометром) это позволило одновременно измерять скорость как отдельных ПЗ, так и их агломератов.

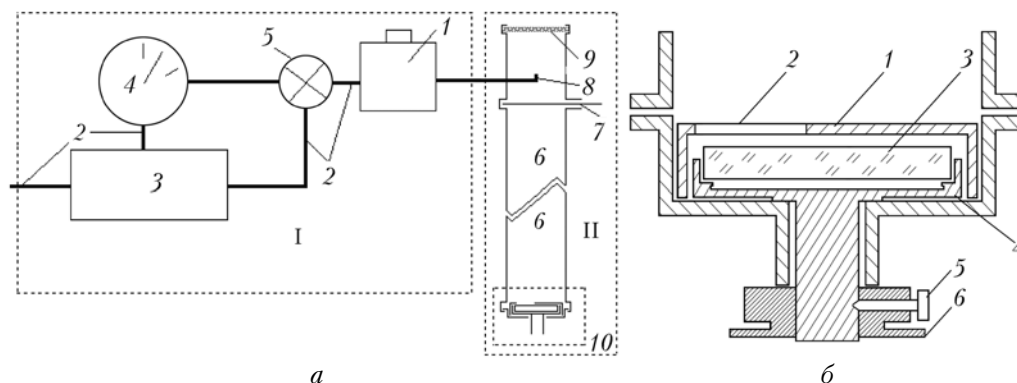


Рис. 1. Схема установки для распыления зерен пылицы (*а*); схема поворотного храпового механизма (*б*)

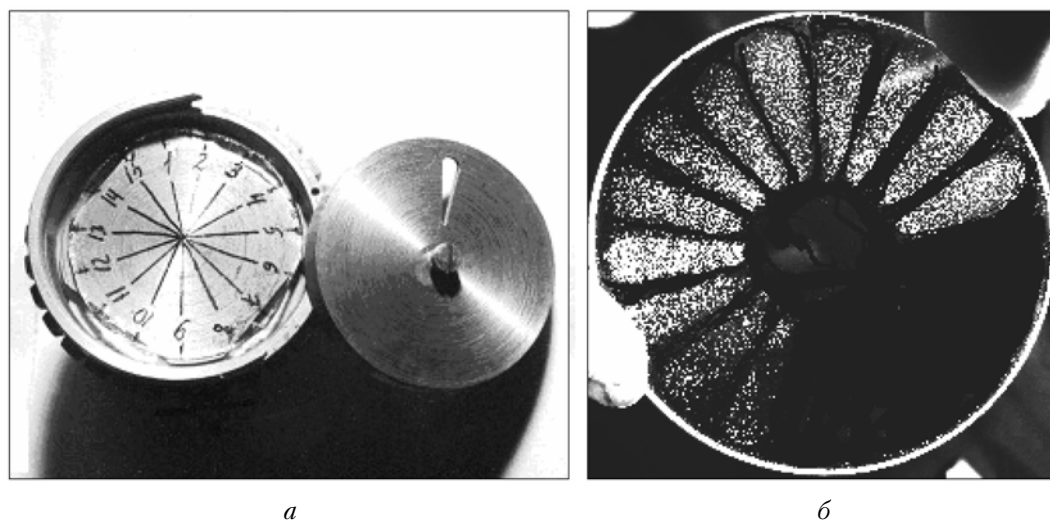


Рис. 2. Вид стеклянного диска в храповом механизме со щелевой диафрагмой (*а*); стеклянный диск с напыленными секторами (*б*)

## Методика проведения эксперимента

Порция пылицы весом 200 мг распылялась в верхнюю часть установки при закрытой заслонке 7. В приемной части седиментатора устанавливалась щелевая диафрагма. В опытах смена секторов осуществлялась вручную через фиксированные промежутки времени  $t_{\phi}$  с, начиная с первого. Для каждого вида растений подбирался свой  $t_{\phi}$ . Последняя диафрагма в опытах экспонировалась в течение 1 мин. Сектор номер 1 служил фоном, контролирующим загрязнение стеклянной пластинки. Во всех сериях опытов на нем не было зафиксировано ни одного ПЗ.

В каждом опыте после завершения отбора образцов с осадком стеклянный диск с осевшими пыльцевыми частицами помещали под микроскоп МБИ-11. Типичный вид стеклянного диска с напыленными пыльцевыми секторами показан на рис. 2, б. Для закрепления пыльцевых частиц на стекле использовался глицерин-желатин с добавлением красителя кумаши голубого. Затем для каждого сектора просматривалось 30 полей зрения. На каждой из просматриваемых площадок подсчитывалось число единичных ПЗ, а также число агломератов, содержащих более одного ПЗ. Агломераты, содержащие 2, 3 и т.д. ПЗ, подсчитывались отдельно.

## Результаты и обсуждение

Подсчет под микроскопом позволяет определить число ПЗ в агломерате, а также количество агломератов, состоящих из различного числа ПЗ, осевших на подложку. При этом у кукурузы, пихты сибирской, клена ясенелистного, ореха маньчжурского, облепихи крушиновидной, дуба черешчатого достаточно легко распознавались агломераты, содержащие до 6 ПЗ. Число ПЗ в более крупных агломератах определить удавалось не всегда, так как в некоторых из них ПЗ располагались в два и более слоя. При этом толщина агломерата в несколько раз превышала глубину резкого изображения, что затрудняло подсчет числа ПЗ, позволяя в отдельных случаях произвести его лишь приблизительно. Доля агломератов из 7 или большего количества ПЗ составляла 2–3% от общего числа уловленных частиц. В связи с вышесказанным скорости седиментации подобных агломератов не вычислялись.

Поскольку участок неравномерного движения пыльцевой частицы значительно меньше, чем длина седиментационного цилиндра, при расчете скорости седиментации было сделано допущение, что ПЗ равномерно оседают на подложку в течение всего периода экспозиции каждой диафрагмы. На каждый из 11 секторов оседали частицы, скорость которых находилась в пределах от  $V_i$  до  $V_{i+1}$ , где  $i$  – номер сектора. Последние рассчитывались по следующему 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.

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

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

( $V_i$  и  $V_{i+1}$  – максимальная и минимальная скорость седиментации частиц в  $i$ -м секторе).

Средняя скорость седиментации  $\bar{V}_j$  агломерата, состоящего из  $j$  зерен, находилась по формуле

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

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

Среднегеометрические отклонения  $\sigma_{gj}$  от среднего значения  $\bar{V}_j$  агломерата, состоящего из  $j$  зерен, определены как

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

При распылении образуется огромное количество агломератов, состоящих из двух или большего количества ПЗ. В табл. 1 приводятся данные о доле агломератов от общего числа частиц, осевших на подложку; доле ПЗ в составе агломератов из двух или большего количества зерен, от общего количества ПЗ, осевших на подложку. При распылении навесок пылицы в седиментометре пыльцевые агломераты составляют от 33,3 (кукуруза) до 44,8% (орех маньчжурский) от общего количества образующихся частиц, при этом в их состав входит от 60,4 до 72,3% распыленных ПЗ.

Таблица 1

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

Видовое название	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, %
Кукуруза	33,3	60,4
Пихта сибирская	41,5	70,6
Клен ясенелистный	42,0	70,6
Орех маньчжурский	44,8	72,3
Облепиха крушиновидная	37,5	66,7
Дуб черешчатый	40,5	69,9

Как для индивидуальных частиц, так и для агломератов наблюдается заметный разброс скоростей седиментации (рис. 3).

Количества подсчитанных агломератов ( $j$  от 1 до 6), среднегеометрическое значение и среднегеометрические отклонения их скоростей седиментации шести видов западносибирских растений приведены в табл. 2.

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 откло-

нения скорости седиментации. Видимо, это связано с варьированием размеров индивидуальных ПЗ и наличием некоторого числа abortивных 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 агломерате эти факторы, вероятно, 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 нами было показано [17], что скорости седимен-

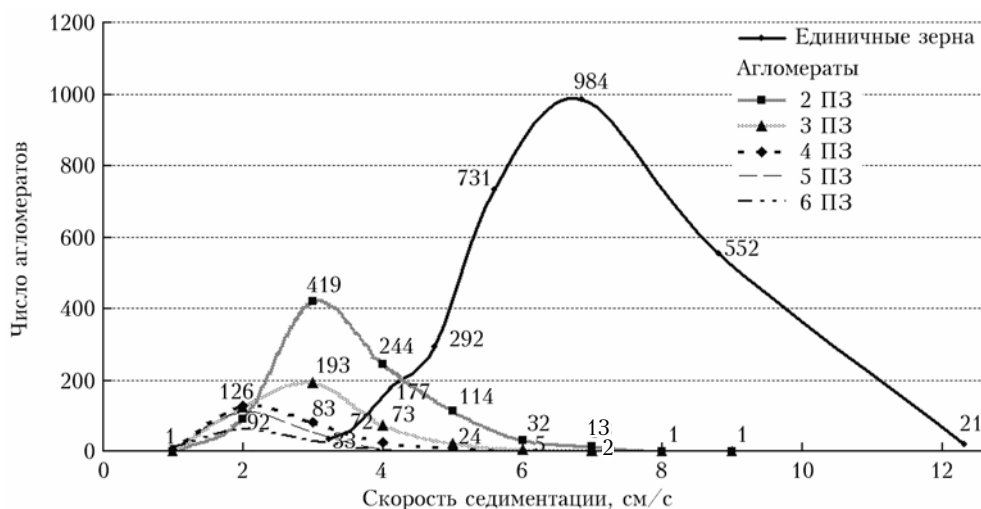


Рис. 3. Скорости седиментации индивидуальных ПЗ и агломератов ПЗ пихты сибирской (суммарные данные для серии из 12 опытов, относительная влажность воздуха 38%)

Таблица 2

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

$j$	Характеристика	Кукуруза	Пихта сибирская	Клен ясенелистный	Орех маньчжурский	Облепиха крушиновидная	Дуб черешчатый
1	Единичные зерна	5409	2862	17426	17625	39662	21560
	$\bar{V}_j$ , см/с	22,6	6,2	2,3	4,1	2,3	2,7
	$\sigma_g$	1,5	1,4	1,3	1,6	1,4	1,4
2	Единичные зерна	1420	916	5571	6616	10682	5921
	$\bar{V}_j$ , см/с	27,2	7,8	3,0	5,7	3	3,6
	$\sigma_g$	1,4	1,3	1,3	1,5	1,3	1,4
3	Единичные зерна	573	424	2894	3132	5081	3168
	$\bar{V}_j$ , см/с	29,6	9	3,5	6,8	3,4	4,1
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,2	1,4	1,3	1,2
4	Единичные зерна	306	248	1595	1987	3084	1939
	$\bar{V}_j$ , см/с	32,8	10,1	3,8	7,6	3,7	4,6
	$\sigma_g$	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,3
5	Единичные зерна	159	184	992	1114	1944	1325
	$\bar{V}_j$ , см/с	34,7	11	4	8	3,9	4,8
	$\sigma_g$	1,4	1,2	1,2	1,4	1,3	1,3
6	Единичные зерна	100	106	714	694	1304	950
	$\bar{V}_j$ , см/с	37,2	11,5	4,2	8,6	4,1	5,2
	$\sigma_g$	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2	1,2

тагии агломератов в зависимости от числа частиц в агломерате 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  $\bar{V}_1$  — средняя скорость единичного зерна.

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

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

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 (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Эмпирические зависимости  
и коэффициенты корреляции

Видовое название	Эмпирическая зависимость $\bar{V}_j$ , см/с	Коэффициент корреляции $r$
Кукуруза	$22,4 \cdot j^{0,273}$	0,995
Пихта сибирская	$6,2 \cdot j^{0,352}$	0,998
Клен ясенелистный	$2,3 \cdot j^{0,338}$	0,991
Орех маньчжурский	$4,2 \cdot j^{0,412}$	0,992
Облепиха крушиновидная	$2,3 \cdot j^{0,321}$	0,992
Дуб черешчатый	$2,7 \cdot j^{0,421}$	0,994

Таким образом, данные табл. 2 можно подытожить следующим выводом: полученные средние значения скоростей седиментации агломератов ПЗ в зависимости от числа частиц в агломерате аппроксимируются степенной зависимостью вида

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

где размерные коэффициенты  $a$  и показатель степени  $k$  находятся из экспериментальных данных для каждого вида растений. Коэффициент корреляции  $r$  принимает значения в диапазоне  $0,991 \leq r \leq 0,998$ ,  $k$  — в диапазоне  $0,273 \leq k \leq 0,421$ . Зафиксированный диапазон  $\bar{V}_j$  от 2,3 см/с для единичного ПЗ облепихи крушиновидной до 37,2 см/с для агломерата, состоящего из шести ПЗ кукурузы, обусловлен различием размеров исследуемых частиц. Наличие в пробах распыленной пылицы 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 пылицы оседает под кронами растений, ее продуцирующих. Установленные экспериментальным путем зависимости позволяют оценить скорости седиментации агломератов, состоящих из произвольного числа зерен пылицы, что дает возможность оценить эквивалентные диаметры таких частиц и использовать полученные значения при моделировании распространения пылицы в атмосфере.

В результате проведенных исследований установлено, что при экспериментальном распылении пылицы шести видов ветроопыляемых растений образуется значительное количество агломератов из 2 или большего числа ПЗ, на долю которых приходится от 33,3 до 44,8% образующихся частиц, при этом в их состав входит от 60,4 до 72,3% распыленных ПЗ.

Для пылицы кукурузы, пихты сибирской, клена ясенелистного, ореха маньчжурского, облепихи крушиновидной, дуба черешчатого экспериментально определены скорости седиментации агломератов, в состав которых входит от 1 до 6 ПЗ.

Предложены эмпирические формулы зависимости скорости седиментации агломератов пылевых зерен шести анемофильных видов растений, произрастающих на территории Западной Сибири, 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 / Eds. C.S. Cox, C.M. Wathes. Lewis Publishers Inc.: Boca Raton, Florida, 1995. P. 387–406.
5. Федорова Р.В. Количественные закономерности распространения пылицы древесных пород воздушным путем // Труды АН СССР (Труды 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 // The Botanical Review. 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 in Plant Science. 1998. V. 3, N 12. P. 1360–1385.
10. Erdtman G. Handbook of palynology. Denmark, Copenhagen: Munksgaard, 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 // Amer. J. Bot. 1963. V. 50, N 6. P. 532–539.

13. *Дунский В.Ф.* Аэромикробиология и прогнозирование болезней растений // Аэрозоли в защите растений. Научные труды ВАСХНИЛ. М.: Колос, 1982. С. 166–191.
14. *Истомин В.Л., Куценогий К.П.* Определение скорости седиментации спор плауна агломератов // Теплофизика 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 пыли и спор в воздухе // Бюл. комиссии по изучению четвертичного периода. 1980. № 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.

*V.V. Golovko, V.L. Istomin, K.P. Koutzenogii.* **Determination of the sedimentation rate of pollen particulates (both single grains and their agglomerates) of the plants growing in West Siberia.**

A study was made of the sedimentation of the pollen particulates of Siberian silver fir, ash maple, corn, manchzhursky nutwood, sea-buckthorn. It is shown that the dispersion of the pollen of these six species provides a considerable number of agglomerates of two or more grains, composing from 33.3 to 44.8% of the resulting particles. In this case, these agglomerates contain from 60.4 to 72.3% of the pollen dispersed. The sedimentation rate of the agglomerates, including from 1 to 6 pollen grains, was determined. The dependence of the agglomerate sedimentation rate on the number of the pollen grains included was established.