

УДК 532.529.5

Определение скорости седиментации пыльцы сорных трав, как индивидуальных зерен, так и их агломератов

В.В. Головки¹, В.Л. Истомин², К.П. Куценогий^{1*}

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

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

Поступила в редакцию 2.03.2015 г.

Исследована седиментация пыльцевых частиц нескольких видов сорных трав, произрастающих в Западной Сибири. Подсчитана процентная доля индивидуальных зерен пыльцы и их агломератов, образующихся при распылении. 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 – массовая компонента грубодисперсной фракции атмосферного аэрозоля (АА), обеспечивающая семенное размножение и способная переноситься на тысячи километров (пыльца рода *Nothofagus* – на 4500 [1], сосен *Pinus silvestris* – на 1700, *P. sibirica* – на 1600, *P. pumila* – на 1050 км за границы ареала [2]). Пыльцевая продуктивность анемофильных растений огромна. По данным Greenfield (1999) [3], некоторые леса *Pinus radiata* в Новой Зеландии продуцируют 1–3 т пыльцы на 1 га. По нашим данным, в отдельных пробах АА массовая концентрация пыльцевых зерен (ПЗ) березы достигала 80, а сосны – 66 мкг/м³, что сопоставимо с массовой концентрацией АА в целом. Резко отличаясь по своему химическому составу от минеральной компоненты АА, пыльца вносит существенный вклад в перенос по воздуху серы, азота, фосфора, калия и других элементов в ряде биоценозов [3–6]. Содержащиеся в ПЗ аллергены вызывают вспышки поллинозов. В Российской Федерации на протяжении вегетационного периода наблюдаются три волны аллергических заболеваний, обусловленные численным преобладанием в воздухе соответственно пыльцы древесных растений, злаков и сорных трав (разнотравья) [7].

Перенос пыльцы ветром – процесс физический. Сроки нахождения пыльцевых частиц в воздухе, дальность их переноса, эффективность оседания на опыляемые растения и поверхности отбирающих устройств обусловлены их скоростью седиментации.

Сложная форма ПЗ, их деформация при высыхании, наличие агломератов из нескольких ПЗ затрудняют теоретические расчеты скорости седиментации переносимой по воздуху пыльцы [8–11]. Она определяется экспериментально с помощью седиментометров [10, 12]. До недавнего времени скорости седиментации ПЗ были описаны лишь примерно у 120 видов растений [13], произрастающих преимущественно в Европе и Северной Америке. Практически не изучены скорости седиментации агломератов двух и более ПЗ. Ранее [14] нами была исследована седиментация пыльцы нескольких видов западносибирских древесных растений и злаков. В настоящей статье приводятся результаты определения скорости седиментации пыльцы шести видов сорных трав.

Материалы и методы

Получение исходного материала. Свежая пыльца собиралась с цветущих растений, произрастающих в Центральном сибирском ботаническом саду СО РАН г. Новосибирска. Срезанные мужские соцветия помещались в сосуды с водой, установленные в ящики, выстланные калькой. Высыпавшаяся из пыльников пыльца собиралась и хранилась в пакетах из кальки. Температура и относительная влажность воздуха при проведении опытов по определению скорости седиментации определялись психрометром и соответствовали наблюдавшимся в природных условиях.

Экспериментальная установка для получения аэрозолей методом импульсного распыления порошкообразных материалов (рис. 1, а), на которой измерялась скорость седиментации пыльцевых частиц, состоит из двух основных блоков: I – дозирующей системы и II – собственно седиментатора [15, 16].

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

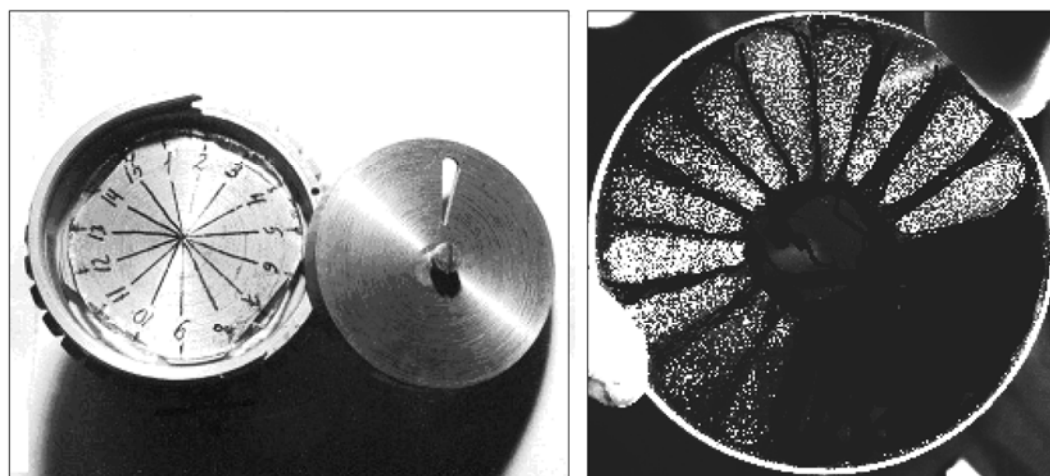
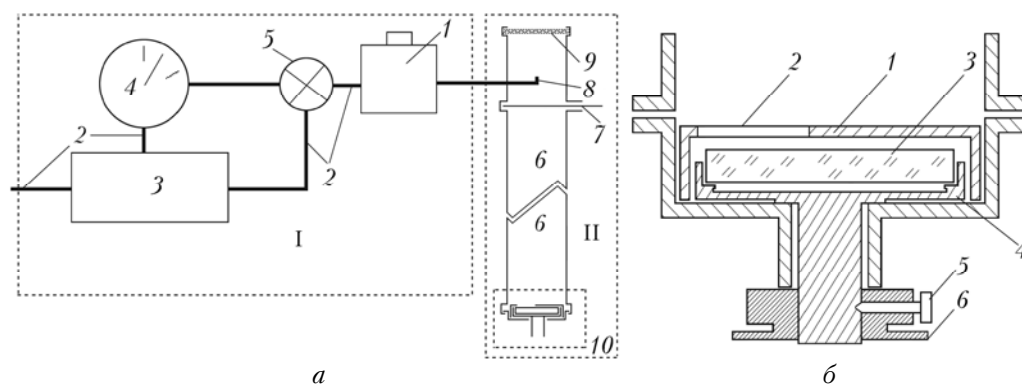


Рис. 1. Схема установки для распыления зерен пылицы (а); схема поворотного храпового механизма (б); вид стеклянного диска в храповом механизме с щелевой диафрагмой (в); стеклянный диск с напыленными секторами (г)

В дозирующую систему входят дозатор 1, в который помещается пыльца, воздуховод 2, ресивер 3, электроконтактный манометр 4, электроклапан 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, оканчивается сверху фильтродержателем 9 с установленными на металлической сетке фильтрами типа АФА-ХА-18 для выхода воздуха. Нижняя часть цилиндра оканчивается храповым устройством 10, содержащим стеклянный диск для сбора распыленной пылицы.

Это устройство (рис. 1, б, в) 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. Пыльца на нем закреплялась глицерин-желатином с добавлением красителя «Кумасси голубой». Ложе со стеклянным диском может вращаться с переменной скоростью и имеет несколько фиксированных положений. Его вращение на заданный угол осуществляется храповиком 6.

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 см³, начальное давление в нем 5 атм.

В установке использовано импульсное распыление на основные элементы, предложенное в [17]. В сочетании со вторым блоком (седиментометром) это позволило одновременно измерять скорость как отдельных ПЗ, так и их агломератов.

Методика проведения эксперимента. При закрытой заслонке 7 в верхнюю часть установки распылялось 200 мг пылицы. В приемной части седиментатора устанавливалась щелевая диафрагма. После открытия заслонки смена секторов осуществлялась вручную через фиксированные промежутки времени $t_{\text{ф}}$ (с). Для каждого вида растений подбирался свой $t_{\text{ф}}$. Последняя диафрагма в опытах экспонировалась 1,5–2 мин. Фоном для контроля загрязнения подложки служил первый сектор. Во всех сериях опытов на нем не было отмечено ПЗ.

В каждом опыте после завершения отбора образцов стеклянный диск с осевшими пыльцевыми частицами (ПЧ) (рис. 1, г) помещали под микроскоп МБИ-11. 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 более ПЗ, подсчитывались отдельно.

Результаты и обсуждение

При аэропаллинологических исследованиях терминами «разнотравье» и «сорные травы» обозначают все ветроопыляемые травянистые растения, за исключением злаков, цветущие преимущественно в конце лета – начале осени. ПЧ этих ветроопыляемых трав, относящихся к различным неродственным родам и семействам, имеют различную морфологию, разные массу, геометрические размеры и скорость седиментации. Зрелая пыльца большинства видов представлена одиночными зёрнами – моноадами. У некоторых таксонов она остается в тетрадах – объединениях четырех ПЗ, возникающих из одной материнской клетки при мейозе. В зависимости от взаимного расположения ПЗ различают тетраэдрические, четырехугольные, крестообразные, ромбические, линейные и замкнутые (псевдомонады) тетрады. В псевдомонадах развито только одно ПЗ, а остальные три дегенерированы.

Были исследованы скорости седиментации ПЧ шести видов анемофильных трав. Зрелая пыльца хмеля обыкновенного, василисника простого и щавеля конского представлена ПЗ. У осоки большехвостой – псевдомонадами, у датиски коноплевой и рогоза широколистного – соответственно тетраэдрическими и четырехугольными тетрадами (рис. 2).

При распылении в экспериментальной установке поведение тетрад различно. Псевдомонады осоки и тетрады рогоза не разрушаются, образуют агломераты из двух и более тетрад и фактически являются единицами распространения пыльцы своего вида. Значительная (не поддающаяся точному учету) доля тетрад датиски распадается с образованием единичных ПЗ и агломератов из двух и более ПЗ. Из-за этого у данного вида определялись скорости седиментации не агломератов тетрад, а индивидуальных ПЗ и их агломератов. Скорости седиментации исходной тетрады датиски соответствует скорость седиментации агломерата из четырех ПЗ.

Подсчет под микроскопом позволял определить число ПЗ либо тетрад в агломерате, содержащем максимум 6 частиц. В более крупных агломератах они могут располагаться в два и более слоев. Толщина

такого агломерата в несколько раз выше глубины резкого изображения микроскопа, что позволяет оценить число входящих в него частиц лишь приблизительно. Доля агломератов из 7 и более ПЗ или тетрад составляла примерно 2% (исключение – датиска коноплевая). Скорости седиментации подобных агломератов не вычислялись.

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

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

где $t_i = t_{\phi}(i - 2)$; H – высота седиментационного цилиндра.

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

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

где V_i и V_{i+1} – минимальная и максимальная скорости седиментации агломератов в i -м секторе.

Средняя скорость седиментации \bar{V}_j агломерата, состоящего из j зерен (или тетрад), определялась как

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

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

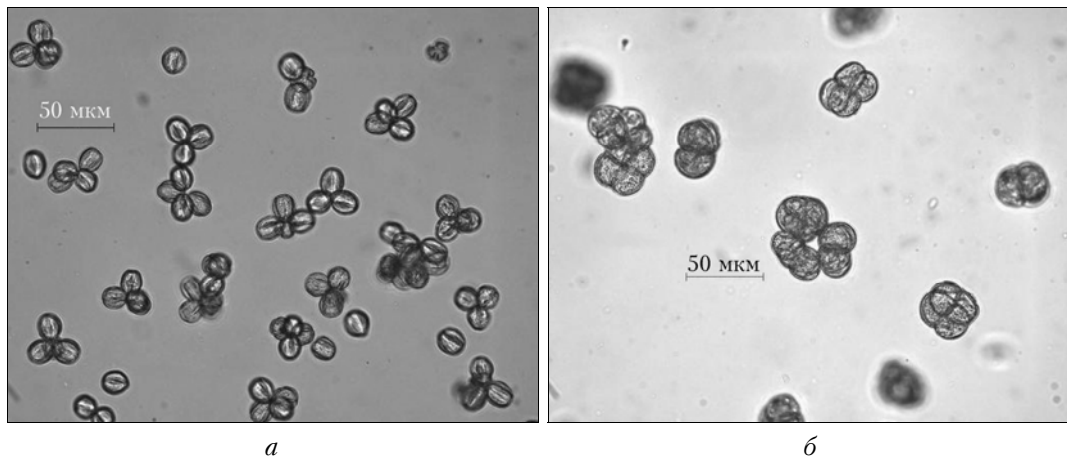


Рис. 2. Тетрады датиски коноплевой (а) и рогоза широколистного (б)

Среднегеометрические отклонения σ_{gj} от среднего значения \bar{V}_j агломерата, состоящего из j зерен (или тетрад), рассчитывались по формуле

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

При распылении образуется огромное количество агломератов. В табл. 1 приводятся данные о доле агломератов от общего числа частиц, осевших на подложки; доле ПЗ (либо их тетрад) в составе агломератов из двух или более частиц от общего их количества, осевшего на подложки.

При распылении пыльцы в седиментометре пыльцевые агломераты составляют от 34,7 (щавель кон-

ский) до 43,8% (хмель обыкновенный) от общего числа образующихся ПЧ. В их состав входит от 64,6 до 72,4% распыленных ПЗ либо тетрад. Оценить интенсивность образования агломератов у датиски коноплевой не удалось из-за наличия значительного числа нераспавшихся тетрад и их участия в формировании агломератов.

Как для индивидуальных частиц, так и для агломератов наблюдается заметный разброс скоростей седиментации. Количество подсчитанных агломератов j (от 1 до 6), среднегеометрические значения и среднегеометрические отклонения их скоростей седиментации шести видов анемофильных трав приведены в табл. 2. С увеличением размера агломератов наблюдается уменьшение числа частиц.

При этом, несмотря на большое статистически значимое количество обнаруженных одиночных зерен

Таблица 1

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

Видовое название	Доля агломератов из двух или более ПЗ/тетрад от общего количества осевших частиц, %	Доля ПЗ/тетрад в составе агломератов от общего количества осевших ПЗ/тетрад, %
Хмель обыкновенный	43,8	72,4
Василисник простой	38,1	67,0
Щавель конский	34,7	64,6
Осока большехвостая	34,8	65,6
Рогоз широколистный	41,6	65,7

Таблица 2

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

Число частиц j	Показатель	Хмель обыкновенный	Василисник простой	Щавель конский	Осока большехвостая	Датиска коноплевая	Рогоз широколистный
1	Число агломератов	10268	7043	3027	5932	8973	1767
	\bar{V}_j , см/с	1,2	1,2	1,8	1,6	0,9	2,4
	σ_{gj}	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3
2	Число агломератов	3268	1938	653	1263	2655	785
	\bar{V}_j , см/с	1,6	1,6	2,9	2,1	1,0	2,8
	σ_{gj}	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2
3	Число агломератов	1860	949	355	638	1660	249
	\bar{V}_j , см/с	1,9	1,9	3,5	2,6	1,2	3,6
	σ_{gj}	1,3	1,2	1,3	1,4	1,3	1,2
4	Число агломератов	1247	572	250	436	1407	128
	\bar{V}_j , см/с	2,0	2,2	3,8	3,2	1,4	4,0
	σ_{gj}	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3	1,2
5	Число агломератов	719	399	160	338	741	56
	\bar{V}_j , см/с	2,3	2,5	4,2	3,6	1,4	4,2
	σ_{gj}	1,3	1,3	1,2	1,3	1,3	1,1
6	Число агломератов	413	242	92	230	490	25
	\bar{V}_j , см/с	2,4	2,7	4,4	3,7	1,5	4,6
	σ_{gj}	1,2	1,3	1,2	1,3	1,3	1,2

Эмпирические зависимости скорости седиментации агломератов от числа входящих в них ПЗ и их коэффициенты корреляции с экспериментальными данными

Число частиц j	Видовое название	Эмпирическая зависимость \bar{V}_j , см/с	Коэффициент корреляции r
1	Хмель обыкновенный	$1,2 \cdot j^{0,386}$	0,993
2	Василисник простой	$1,2 \cdot j^{0,456}$	0,997
3	Щавель конский	$1,8 \cdot j^{0,493}$	0,972
4	Осока большехвостая	$1,6 \cdot j^{0,497}$	0,987
5	Датиска коноплевая	$0,9 \cdot j^{0,304}$	0,955
6	Рогоз широколистный	$2,4 \cdot j^{0,376}$	0,975

и тетрад, именно у них отмечены максимальные стандартные геометрические отклонения 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 частиц в агломерате эти факторы, вероятно, взаимно компенсируются, а сам агломерат становится более симметричной фигурой. В результате разброс значений скоростей седиментации уменьшается.

Скорость оседания агломерата возрастает с увеличением количества составляющих его частиц. Ранее нами было показано [17], что скорости седиментации 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 α и \bar{V}_1 из экспериментальных данных использовался метод линейного регрессионного анализа в следующем виде:

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

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, предложенными в табл. 3.

Таким образом, данные табл. 3 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 $0,955 \leq r \leq 0,997$, k – значения в диапазоне $0,304 \leq k \leq 0,497$.

Зафиксированный диапазон \bar{V}_j от 0,9 см/с для единичного ПЗ датиски коноплевой (1,4 см/с для ее пыльцевой тетрады) до 4,6 см/с для агломерата из шести пыльцевых тетрад рогоза широколистного обусловлен различием размеров исследуемых частиц. Полученные данные указывают на то, что само по себе наличие пыльцевых тетрад не может служить препятствием для опыления ветром. Скорости седиментации тетрад датиски коноплевой и рогоза широколистного сопоставимы со скоростями седиментации одиночных ПЗ клена ясенелистного и облепихи крушиновидной (2,3 см/с) и меньше скоростей седиментации одиночных ПЗ ореха маньчжурского (4,2 см/с) и дуба черешчатого (2,7 см/с), найденных нами ранее [16]. Установленные экспериментальным путем зависимости позволяют оценить скорости седиментации агломератов, состоящих из произвольного числа ПЗ и пыльцевых тетрад, что дает возможность оценить эквивалентные диаметры таких частиц и использовать полученные значения при моделировании распространения пыльцы в атмосфере.

Заключение

1. Определены скорости седиментации пыльцевых агломератов хмеля обыкновенного, василисника простого, щавеля конского, осоки большехвостой, датиски коноплевой и рогоза широколистного, в состав которых входило от 1 до 6 ПЗ или пыльцевых тетрад.

2. При распылении псевдомонады осоки большехвостой и четырехугольные тетрады рогоза широколистного не разрушаются, а образуют агломераты из двух и более тетрад, являясь единицами распространения пыльцы. Значительная доля тетрад датиски коноплевой при распылении распадается с образованием одиночных ПЗ и агломератов из двух и более ПЗ.

3. Распыляемая пыльца формирует агломераты из двух и более ПЗ либо тетрад, на долю которых приходится от 34,7 (щавель конский) до 43,8% (хмель обыкновенный) пыльцевых частиц, осевших на подложки. В состав агломератов входит от 64,6 (щавель конский) до 72,4% (хмель обыкновенный) ПЗ либо тетрад, распыленных в экспериментальной установке.

4. Предложены эмпирические формулы зависимости скорости седиментации агломератов пыльцевых зерен шести анемофильных трав, произрастающих на территории Западной Сибири, от числа входящих в них частиц.

1. *Hafstein U.* A pollen-analytic investigation of two peat deposit from Tristan da Cunha // Results Norweg. Exped. T. da Cunha, 1937–38. 1951. N 22. P. 1–42.
2. *Федорова Р.В.* Количественные закономерности распространения пыльцы древесных пород воздушным путем // Труды АН СССР (Труды Института географии). 1952. Вып. 52. С. 91–103.
3. *Greenfield L.G.* Weight loss and release of mineral nitrogen from decomposing pollen // Soil Biol. Biochem. 1999. V. 31, N 3. P. 351–353.
4. *Noll K.E., Khalili E.* Dry deposition of sulfate associated with pollen // Atmos. Environ. 1988. V. 22. P. 601–604.
5. *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.
6. *Rantio-Lehtimäki A.* Aerobiology of Pollen and Pollen Antigens // Bioaerosols Handbook / Eds. C.S. Cox, C.M. Wathes. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers Inc., 1995. P. 387–406.
7. *Адо В.А., Зяблова Н.М., Ирошников Е.С.* Экология и аллергия. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. 112 с.
8. *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.
9. *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.
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 // Amer. J. Bot. 1963. V. 50, N 6. P. 532–539.
13. *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.
14. *Головко А.В., Истомин В.Л., Куценогий К.П.* Определение скорости седиментации пыльцевых частиц (как одиночных зерен, так и их агломератов) растений, произрастающих в Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 6. С. 513–518.
15. *Istomin V.L., Kutsenogii K.P.* Evaluation of the sedimentation velocity of club-moss spores and they agglomerates // Thermophys. Aeromech. 2001. V. 8, N 2. P. 295–301.
16. *Istomin V.L., Kutsenogii K.P.* Method for determination the aerodynamic diameter of complex-shaped aerosol particles within the Reynolds-number range from 0.1 to 6.0 // Thermophys. Aeromech. 2010. V. 17, N 1. P. 69–75.
17. *Истомин В.Л., Куценогий К.П.* Получение аэрозолей из порошкообразных материалов методом импульсного воздействия газом // Теплофиз. и аэромехан. 1998. Т. 5, № 1. С. 75–79.

V.V. Golovko, V.L. Istomin, К.П. Koutsenogii. **Determination of the sedimentation rate of weed pollen of both individual grains and their agglomerates.**

A study was made of the pollen particle sedimentation of the weeds of several species growing in Western Siberia. The percentage of individual grains and their agglomerates resulting from spraying was calculated. The sedimentation rate of agglomerates, consisting of one to six pollen grains, was determined. The sedimentation rate of agglomerates was found to depend on the number of the pollen grains involved.