

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ОСЕДАНИЯ ПЫЛЬЦЕВЫХ КЛАСТЕРОВ АНЕМОФИЛЬНЫХ РАСТЕНИЙ, ПРОИЗРАСТАЮЩИХ В ЦСБС СО РАН**

### ***Владимир Викторович Головко***

Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3, кандидат биологических наук, ведущий инженер, тел. (383)330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### ***Константин Александрович Хлебус***

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15, ведущий инженер, тел. (383)333-19-38, e-mail: 1798745@mail.ru

### ***Анастасия Петровна Беланова***

Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Золотолинская, 101, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, тел. (383)339-97-45, e-mail: boronina.a@inbox.ru

Исследовано оседание пыльцевых частиц шести видов анемофильных растений (*Salix caprea* L., *Salix pentandra* L., *Betula davurica* Pall., *Plantago media* L., *Chenopodium album* L., *Artemisia sieversiana* Willd.) произрастающих в экспозиции ЦСБС СО РАН. Данные виды широко представлены в биоценозах Российской Федерации и являются продуцентами внушительных количеств аллергенной пыльцы, которая может переноситься ветром на значительные расстояния. Показано наличие значительной доли кластеров, в состав которых входят два или большее количество пыльцевых зерен. Определены скорости оседания, как индивидуальных пыльцевых зерен данных видов растений и их кластеров, в состав которых входило от двух до шести зерен пыльцы. Установлена зависимость скорости седиментации кластера от числа входящих в него пыльцевых зерен.

**Ключевые слова:** анемофильные растения, пыльца, пыльцевые зерна, скорость седиментации, кластеры.

## **DETERMINATION OF SEDIMENTATION RATES OF THE POLLEN CLUSTERS OF ANEPHILOUS PLANTS GROWING IN THE CSBG SB RAS**

### ***Vladimir V. Golovko***

Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, 3, Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Lead Engineer, phone: (383)330-77-43, e-mail: golovko@ns.kinetics.nsc.ru

### ***Konstantin A. Khlebus***

Institute of Hydrodynamics SB RAS, 15, Prospect Akademik Lavrentiev St., Novosibirsk, 630090, Russia, lead engineer, phone: (383)333-19-38, e-mail: 1798745@mail.ru

### ***Anastasia P. Belanova***

Central Siberian Botanical Gardens SB RAS, 101, Zolotodalinskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (383)339-97-45, e-mail: boronina.a@inbox.ru

A study is made on the sedimentation of pollen particles of the anemophilous plants of six species (*Salix caprea* L., *Salix pentandra* L., *Betula davurica* Pall., *Plantago media* L.,

*Chenopodium album* L., *Artemisia sieversiana* Willd.), growing in the CSBG SB RAS. These species are widely represented in the biocenosis of the Russian Federation and are the producers of substantial amounts of allergenic pollen which can be carried by winds over great territories. It is shown that there is a considerable number of clusters that contain two and more pollen grains. Sedimentation rates are determined of both the individual pollen grains of these plants and their clusters with 2-6 pollen grains. It has been established that the sedimentation rate of clusters depends on the number of the pollen grains contained.

**Key words:** anemophilic plants, pollen, pollen grains, sedimentation rate, clusters.

### *Введение*

Поступающие в атмосферу мужские гаметофиты анемофильных растений, т.е. пыльцевые зерна (ПЗ) и их кластеры – пыльцевые частицы (ПЧ), обеспечивают их семенное размножение, вызывают аллергические заболевания [1-5].

В настоящее время в Северной Америке и Европе существуют сотни станций наблюдения, объединенные в единые сети, позволяющие отслеживать концентрации пыльцы в атмосфере и оценивать возможные маршруты ее распространения [1]. К сожалению, суровые погодные-климатические условия и существенно более низкая (иногда на 1-2 порядка) плотность населения делают трудноосуществимым создание подобных сетей пунктов наблюдения на большей части Российской Федерации.

Атмосферный перенос пыльцы – процесс чисто физический. Единственная характеристика ПЧ, влияющая на дальность переноса и эффективность улавливания отбирающими устройствами – их скорость седиментации. Данная характеристика является ключевой для построения моделей переноса ПЗ и ПЧ в атмосфере для оценивания эффективности изоляции удаленных популяций, рисков генетического загрязнения семенных питомников, возникновения сезонных вспышек поллинозов [6-8].

Сложная форма пыльцевых зерен (ПЗ), деформация их при высыхании, наличие кластеров из двух или большего количества ПЗ крайне затрудняют теоретические расчеты скорости седиментации переносимой по воздуху пыльцы [9-12]. Скорость седиментации ПЧ определяется экспериментально с помощью разного вида седиментометров [11, 13, 14]. До недавнего времени исследовалось преимущественно оседание ПЧ Североамериканских и Европейских ветроопыляемых растений [8]. Седиментация ПЧ большинства видов анемофильных видов растений изучена не была. Даже для большинства Европейских и Европейских растений приводятся лишь скорости оседания индивидуальных ПЗ, а скорости седиментации их кластеров практически не исследованы [7, 15, 16]. Не устанавливалась доля пыльцевых кластеров от общего количества продуцируемых ПЧ, не определены зависимости скоростей седиментации кластеров от количества составляющих их зерен [14].

Данная работа является частью цикла исследований, посвященных определению ключевой для исследования распространения ПЧ в атмосфере характеристики – их скорости седиментации. Целью данного цикла является определе-

ние скоростей седиментации ПЧ и индивидуальных ПЗ максимально возможного числа видов ветроопыляемых растений, доминирующих в растительном покрове Российской Федерации и сопредельных стран. В ходе данной работы исследовалось оседание пыльцевых кластеров трех видов древесных растений (*Salix caprea* L., *Salix pentandra* L., *Betula davurica* Pall.) и трех видов сорных трав (*Plantago media* L., *Chenopodium album* L., *Artemisia sieversiana* Willd.), представленных в экспозиции Центрального Сибирского ботанического сада СО РАН. Были исследованы: 1) кластерный состав пыльцевого аэрозоля, образующийся при распылении пыльцы; 2) экспериментально определены скорости седиментации ПЗ и их кластеров двух видов ив (*Salix caprea* L., *Salix pentandra* L.), одного из видов берез (*Betula davurica* Pall.), и одного вида родов подорожник (*Plantago media* L.), марь (*Chenopodium album* L.), и полынь (*Artemisia sieversiana* Willd.); 3) установлены зависимости скорости седиментации кластеров от числа входящих в их состав зерен пыльцы.

### **Методы и материалы**

Как и ранее [15], определение скорости оседания ПЧ проводилось с помощью экспериментальной установки по распылению порошкообразных материалов, (рис. 1 А) состоящей из: I - дозирующей системы и II - собственно седиментатора. Дозирующая система импульсного распыления состоит из дозатора с исследуемой пылью 1, воздуховода 2, ресивера 3, электроконтактного манометра 4, электроклапана 5.

Седиментатор (II) представляет собой цилиндр 6, разделенный 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 пыли.

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

Порции пыли весом 100 миллиграмм 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  $t_{\phi}$  секунд, начиная с первого. Для каждого вида растений подбирался свой  $t_{\phi}$ . Последняя диафрагма в опытах экспонировалась в течение 2 минут. Сектор номер 1 служил фоном, контролирующим загрязнение стеклянной пластинки. На нем не было зафиксировано ни одной пылевой частицы.

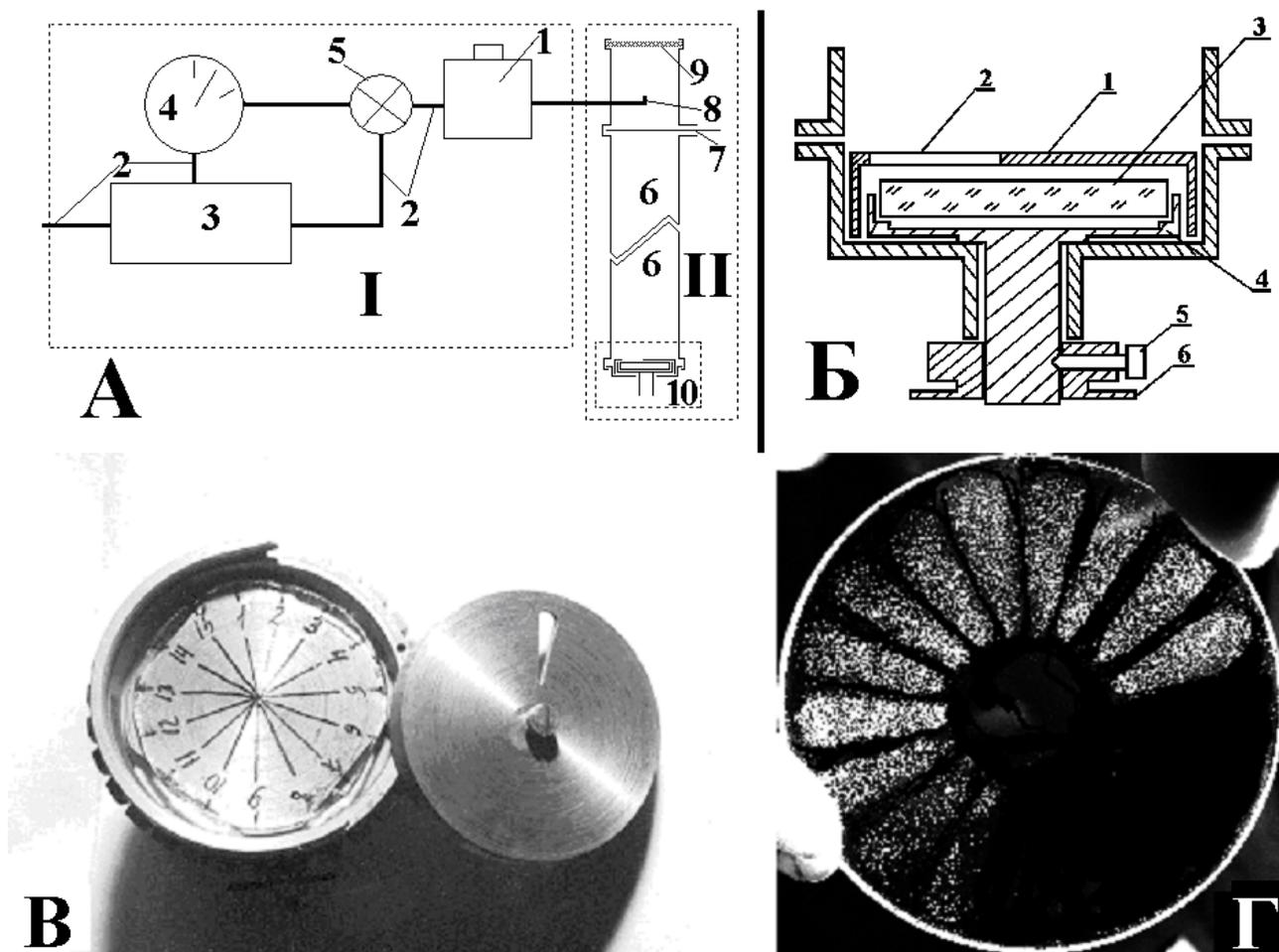


Рис. 1. Схема:

А. установки для распыления зерен пыли; Б. поворотного храпового механизма; В. Стеклянный диск в храповом механизме со щелевой диафрагмой; Г. Фотография стеклянного диска с напыленными секторами

В каждом опыте после завершения отбора образцов с осадком стеклянный диск с осевшими пылевыми частицами помещали под микроскоп МБИ-11. Типичный вид стеклянного диска с напыленными пылевыми секторами показан на рис. 1 Б. Для закрепления пылевых частиц на стекле использовался глицерин-желатин с добавлением красителя кумаша голубого. Затем для каждого сектора просматривалось 30 полей зрения. На каждой из просматриваемых

площадок отдельно подсчитывалось единичные ПЗ и кластеры, содержащие 2, 3 и более ПЗ.

### *Результаты и обсуждение*

Методика: 1) подсчета под микроскопом ПЧ (ПЗ и их кластеров), 2) определения доли кластеров из  $\geq 2$  ПЗ и процентной доли ПЗ, входящих в их состав; 3) расчетов скоростей седиментации индивидуальных ПЗ и их кластеров; 4) оценки зависимости скорости седиментации кластера от числа входящих в его состав зерен пыльцы была неоднократно описана ранее [15, 18]. При расположении ПЗ в составе кластера в  $\geq 3$  слоя, точное число ПЗ в нем можно определить лишь приблизительно. Число кластеров из  $\geq 7$  ПЗ не превышало 1%. Лишь  $\approx 1/3$  подобных частиц ПЗ располагались в  $\geq 3$  слоя. Т.о. погрешность, обусловленная ошибками при подсчете числа ПЗ в кластере не превышала 0,1-0,2%. Скорости седиментации рассчитывались лишь для ПЧ, состоящих из одного-шести ПЗ.

При распылении образуется огромное количество кластеров, в состоящих из 2 или большего количества ПЗ. В табл. 1 приводятся данные о доле кластеров от общего числа частиц, осевших на подложку; доле ПЗ в составе кластеров из двух или большего количества зерен, от общего количества ПЗ, осевших на подложку. При распылении навесок пыльцы в седиментометре пыльцевые кластеры составляют от 32,4 (*Chenopodium album*) до 53,3% (*Salix pentandra*) от общего количества образующихся частиц, при этом в их состав входит от 59,4 до 79,2% 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, %
<i>Salix caprea</i> L.	47,2	75,4
<i>Salix pentandra</i> L.	53,3	79,2
<i>Betula davurica</i> Pall.	45,1	70,7
<i>Plantago media</i> L.	45,8	73,6
<i>Chenopodium album</i> L.	32,4	59,4
<i>Artemisia sieversiana</i> Willd.	43,0	71,6

Наблюдается заметный разброс скоростей седиментации индивидуальных ПЗ и кластеров. Числа подсчитанных кластеров ( $j$  – от 1 до 6), среднегеометрические значения и среднегеометрические отклонения их скоростей седиментации растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН приведены в табл. 2.

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

j		<i>Salix caprea</i>	<i>Salix pentandra</i>	<i>Betula davurica</i>	<i>Plantago media</i>	<i>Chenopodium album.</i>	<i>Artemisia sieversiana</i>
j=1	Число кластеров	4271	4988	2402	6634	2713	10346
	$\bar{V}_j$ , см/с	1,2	1,2	2,5	1,6	1,6	1,3
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,4	1,4	1,3	1,4
j=2	Число кластеров	1507	2355	1023	1604	965	3287
	$\bar{V}_j$ , см/с	1,5	1,5	3,4	2,1	2,1	1,6
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3
j=3	Число кластеров	910	1352	457	704	549	1748
	$\bar{V}_j$ , см/с	1,8	1,8	3,8	2,3	2,5	1,9
	$\sigma_g$	1,3	1,3	1,2	1,3	1,4	1,3
j=4	Число кластеров	578	886	267	419	338	1260
	$\bar{V}_j$ , см/с	1,9	1,9	4,1	2,5	2,8	2,0
	$\sigma_g$	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2
j=5	Число кластеров	336	450	111	224	206	675
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,1	2,0	4,3	2,6	2,9	2,1
	$\sigma_g$	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2
j=6	Число кластеров	230	291	59	117	206	385
	$\bar{V}_j$ , см/с	2,2	2,1	4,5	2,8	3,2	2,2
	$\sigma_g$	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2

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 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 уменьшается разброс значений скоростей седиментации.

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:

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

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

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

$$Y_j = \beta + \alpha X_j \quad (2)$$

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, предложенные в табл. 3.

Таблица 3

Эмпирические зависимости и коэффициенты корреляции

n/n	Видовое название	Эмпирическая зависимость $\bar{V}_j$ , см/с	Коэффициент корреляции $r$
1	<i>Salix caprea</i> L.	$\bar{V}_j = 1,2 \times j^{0,343}$	0,994
2	<i>Salix pentandra</i> L.	$\bar{V}_j = 1,2 \times j^{0,317}$	0,987
3	<i>Betula davurica</i> Pall.	$\bar{V}_j = 2,5 \times j^{0,322}$	0,977
4	<i>Plantago media</i> L.	$\bar{V}_j = 1,6 \times j^{0,383}$	0,995
5	<i>Chenopodium album</i> L.	$\bar{V}_j = 1,6 \times j^{0,300}$	0,986
6	<i>Artemisia sieversiana</i> Willd.	$\bar{V}_j = 1,3 \times j^{0,298}$	0,988

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

$$\bar{V}_j = a * j^k, \quad \text{для } 1 \leq j \leq 6, \quad (3)$$

где  $\bar{V}_j$  - среднее значение скорости седиментации кластера состоящего из  $j$  частиц, размерные коэффициенты  $a$  ( $\bar{V}_1$ ) и показатель степени  $k$  находятся из

экспериментальных данных для каждого вида растений. Коэффициент корреляции  $r$  - принимает значения в диапазоне  $0,977 \leq r \leq 0,994$ ,  $k$  принимает значения в диапазоне  $0,298 \leq k \leq 0,383$ . Зафиксированный диапазон  $\bar{V}_j$  от 1,2 см/с для единичного ПЗ *Salix caprea* до 4,5 см/с для кластера состоящего из шести ПЗ *Betula davurica*, обусловлен различием размеров ПЧ. Наличие в пробах распыленной пыльцы значительного количества кластеров, оседающих с большой скоростью, указывает на их возможное существование в природных условиях. Что хорошо согласуется с оседанием основного количества пыльцы под кронами продуцирующих растений. Установленные экспериментальным путем зависимости позволяют оценить скорости седиментации кластеров, состоящих из произвольного числа ПЗ. Можно оценить эквивалентные диаметры ПЧ и использовать полученные значения при моделировании распространения пыльцы в атмосфере.

### Выводы

1. Установлено, что при экспериментальном распылении пыльцы исследованных видов ветроопыляемых растений образуются значительные количества кластеров из  $\geq 2$  ПЗ, на долю которых приходится от 32,4 до 53,3 % образующихся частиц при этом в их состав входит от 59,4 до 79,2 % распыленных ПЗ.
2. Для пыльцы шести видов растений экспериментально определены скорости седиментации кластеров, в состав которых входит от 1 до 6 ПЗ.
3. Предложены эмпирические формулы зависимости скорости седиментации кластеров пыльцевых зерен анемофильных видов растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН, от их размеров.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rogers C. A., Levetin E. Evidence of long-distance transport of mountain cedar pollen into Tulsa, Oklahoma // International Journal of Biometeorology. 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. // Atmospheric Environment. 1989. V. 23. N 12. P. 2761-2766.
4. Rantio-Lehtimäki A. Aerobiology of Pollen and Pollen Antigens // Bioaerosols Handbook / Editors: Cox C. S., Wathes C. M. / Boca Raton, Florida, Lewis Publishers Inc, 1995, pp. 387-406.
5. Федорова Р. В. Количественные закономерности распространения пыльцы древесных пород воздушным путем // Труды академии наук СССР. (Труды института 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.
8. 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.
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. Owens J. N., Takaso T., Runions C. J. Pollination in conifers. // Trends in plant science. 1998. V. 3. N. 12. P. 1360–1385.
11. Erdtman G. Handbook of palynology // Munksgaard, Copenhagen, Denmark. 1969. - 486 p.

12. 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.
13. Harrington J. B., Metzger K. Ragweed pollen density. // *Amer. J. Bot.* 1963. V. 50. N 6. P. 532-539.
14. Дунский В. Ф. Аэромикробиология и прогнозирование болезней растений. Аэрозоли в защите растений // *Научные труды*. М., 1982. С. 166-191.
15. Истомин В.Л., Куценогий К.П. Определение скорости седиментации спор плауна агломератов // *Теплофизика и аэромеханика*, 2001. Т. 8. № 2. – С. 295-300.
16. Грегори Ф. Микробиология атмосферы. – М.: Мир, 1964. – 372 с.
17. Федорова Р. В., Вронский В. А. О закономерностях рассеивания пыльцы и спор в воздухе // *Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода*. – 1980. – N 50. – С. 153-165.
18. 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.

© В. В. Головки, К. А. Хлебус, А. П. Беланова, 2019