

УДК 581.162.3:551.510.42

Пыльцевые частицы анемофильных растений, поступающие в атмосферу. Кластерный состав

В.В. Головки¹, Г.А. Зуева², Т.И. Киселева^{2*}

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

²Центральный сибирский ботанический сад СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Золотодолинская, 101

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

Приведены результаты исследования эмиссии пыльцы 32 анемофильных видов растений в атмосферу. Оценена доля кластеров из двух или более пыльцевых зерен от суммарного числа пыльцевых частиц, поступающих в атмосферу. Показано, что, несмотря на наличие у анемофильных растений морфологических особенностей, препятствующих образованию кластеров, подобные кластеры в значительных количествах образывались во всех сериях опытов. Доля пыльцевых кластеров варьировалась от 6,8 до 66,1% от общего числа пыльцевых частиц; доля пыльцевых зерен в составе кластеров варьировалась от 15,3 до 94,8%.

Ключевые слова: пыльца, анемофильные растения, атмосферный аэрозоль, кластеры; pollen, anemophilous plants, atmospheric aerosol, clusters.

Введение

Перенос в атмосфере пыльцы ветроопыляемых семенных растений – необходимое условие их семенного размножения, генетического обмена между отдельными особями и удаленными популяциями. Анемофилия свойственна голосеменным и представителям 60 семейств покрытосеменных растений (~16% семейств отдела [1]). Уступая насекомопыляемым растениям по числу видов (в Новосибирской области – 29,5% [2]), анемофильные растения доминируют по числу особей в растительном покрове внетропических областей (53% поверхности суши без Антарктиды), будучи основными продуцентами биомассы.

Анемофильным растениям присуща высокая пыльцевая продуктивность. Например, в новозеландских лесах продуктивность сосны лучистой достигает 1–3 т пыльцы на гектар [3]. Огромное количество пыльцевых зерен (ПЗ), поступающих в атмосферу, превращает пыльцу в одну из наиболее массовых и повсеместно распространенных компонент грубодисперсной фракции ($d > 1$ мкм) биоаэрозоля [4]. В период цветения березы повислой вклад ее пыльцы в суммарную массовую концентрацию атмосферного аэрозоля (АА) составляет в среднем 16,4%, достигая в отдельных пробах 57–66% [5]. Пыльца анемофильных растений играет важную роль в переносе химических элементов в биоценозах [6], влияет

на оптические свойства атмосферы [7], а также вызывает аллергические заболевания у 30% населения [8, 9].

Для прогнозирования содержания пыльцы в атмосфере созданы сети мониторинга пыльцевой компоненты АА. На 2016 г. в мире было 879 действующих станций отбора проб пыльцевого аэрозоля, из них 9 – в Африке, 151 – в Америке, 182 – в Азии (143 – в Японии), 525 – в Европе и 12 – в Океании [8] (<https://www.zaum-online.de/pollenmap.html>). В Российской Федерации находится 9 станций (в Москве, Санкт-Петербурге, Екатеринбурге, Краснодаре, Перми, Ростове-на-Дону, Рязани, Ставрополе, Тюмени) (<https://allergotor.com>).

На 70% станций отбор пыльцы производится по методике Хирста (ловушки Хирста, Бурхарда, Ланзони). На оставшихся 30% используются автоматические отбирающие устройства и ротаторы. Крупные размеры ПЗ анемофильных растений (средний диаметр 20–40 мкм) и сложная морфология пыльцевых частиц (ПЧ) [10, 11] – причины существенных трудностей при отборе проб АА. Отбор используемыми устройствами не изокинетический [12, 13], при нем разрушаются кластеры [14], способность пробоотборников разделять частицы по размерам недостаточна [8]. При этом даже в ряде областей Европы пунктов наблюдения мало, что делает сомнительным качество прогнозов переноса пыльцы [8].

В Российской Федерации большая площадь страны и малая плотность населения ставят под сомнение возможность развертывания достаточного количества станций пыльцевого мониторинга АА. Более перспективным представляется построение моделей пыльцевого переноса на основе учета пыльцевой продуктивности растений и физических процессов

* Владимир Викторович Головки (golovko@kinetics.nsc.ru); Галина Александровна Зуева (zuevagalina70@yandex.ru); Татьяна Ивановна Киселева (tk552008@yandex.ru).

рассеивания, атмосферного переноса и осаднения ПЧ. Дальность переноса ПЧ в атмосфере определяется высотой источника, скоростью ветра, турбулентностью, вертикальным коэффициентом диффузии и скоростью их оседания. Последняя зависит от размеров и плотности ПЗ и кластерного состава ПЧ, поступающих в атмосферу.

В настоящей работе исследуется эмиссия в атмосферу пыльцы 32 видов анемофильных растений, представленных в экспозиции ЦСБС СО РАН.

Материалы и методы

Пыльца сдувалась ветром с соцветий на предметные стекла, покрытые глицерин-желатином с добавлением красителя кумаши голубого (рис. 1). Расстояние до подложек составляло 20–25 см, что позволяло избежать контакта с соцветиями. Отбор проб пыльцы каждого вида проводился пятикратно с короткими интервалами.

Время экспозиции – несколько секунд. Одновременно с помощью прибора Center 311 измерялись температура и относительная влажность воздуха. Подсчет ПЧ (одиночных ПЗ и их кластеров) проводился на 10 трансектах при 10–40-кратном увеличении объектива микроскопа (рис. 2).

У ПЗ ветроопыляемых растений есть ряд особенностей, препятствующих их слипанию и образованию кластеров. Можно предположить, что в ходе эмиссии в атмосферу из пыльников поступают одиночные ПЗ, а кластеры образуются на предметном стекле.

При оценке количества кластеров из не менее чем двух ПЗ, которое могло образоваться на подложке, сделаны следующие допущения: 1) оседание ПЗ на подложку не зависит от оседания других ПЗ; 2) в кластере ПЗ располагаются в один слой. С ростом числа ПЗ в кластерах их количество уменьшается. Если математическое ожидание числа кластеров из N ПЗ меньше единицы, то частицы из не менее чем N ПЗ на препарате при заданном числе ПЗ на единицу площади не образуются.

Кластер образуется, если расстояние между геометрическими центрами ПЗ не превышает два радиуса. Математическое ожидание числа кластеров из не менее чем двух ПЗ можно представить соотношением

$$N_{\geq 2} = 4pN_{\geq 1}, \quad (1)$$

где $N_{\geq 1}$ – число ПЗ в кластерах из не менее чем одного ПЗ (фактически – общее количество ПЗ, осевших на подложки);

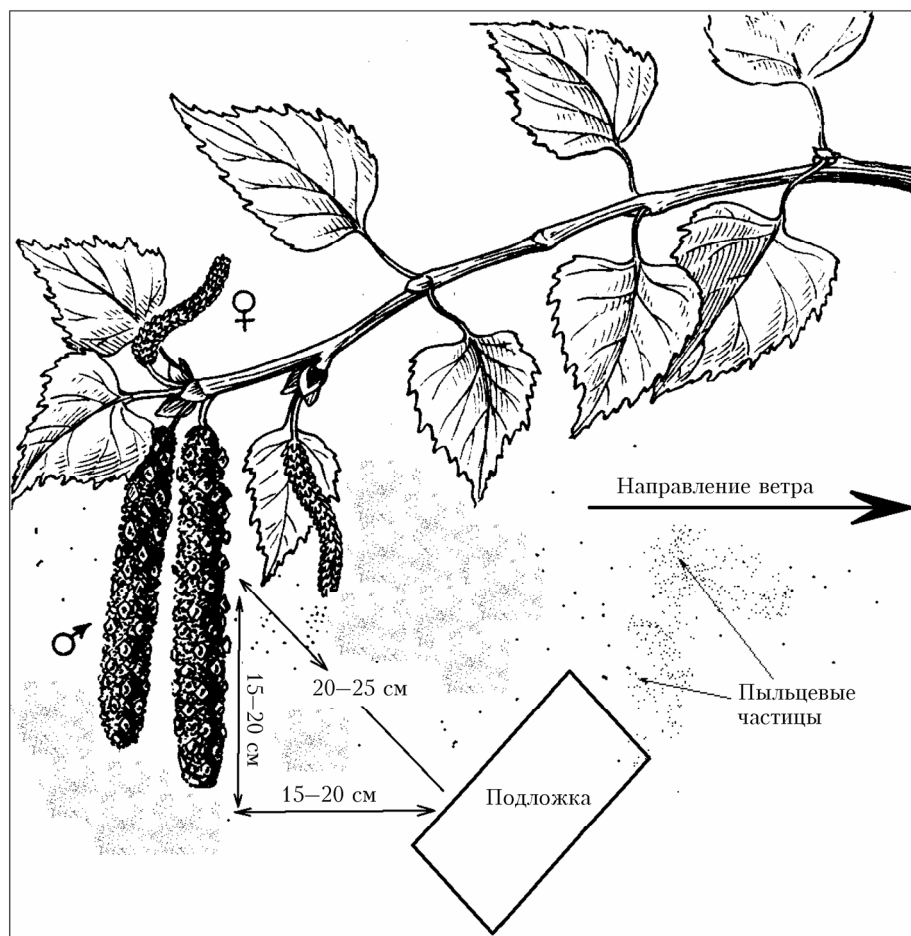


Рис. 1. Схема улавливания пыльцы растений в момент ее высывания из пыльника (на примере серезок березы желтой)

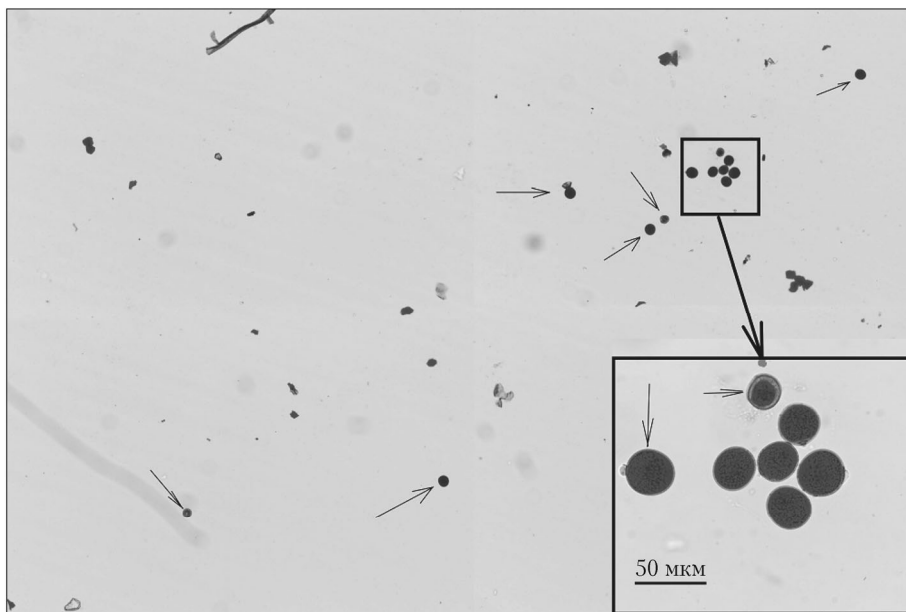


Рис. 2. Осадок ПЧ мятлика альпийского на подложке (при $\times 10$ увеличении объектива). Отдельные ПЗ и кластер из двух ПЗ указаны стрелками. Обведен и показан при $\times 40$ увеличении объектива кластер из пяти пыльцевых зерен мятлика альпийского

$$p = S_{pg} \cdot N_{\geq 1} / S_T \quad (2)$$

— доля поверхности, которую занимают ПЗ, S_{pg} — среднее значение площади проекции ПЗ, S_T — площадь просмотренных препаратов.

В центре коллективного пользования микроскопического анализа биологических объектов СО РАН при ИЦиГ СО РАН были сделаны снимки ~ 200 ПЗ всех исследуемых видов растений. Площади проекций ПЗ нашли путем обработки их снимков программой MapInfo Professional.

Математическое ожидание числа кластеров из двух ПЗ можно оценить соотношением

$$N_2 = N_{\geq 2} - N_{\geq 3}, \quad (3)$$

где

$$N_{\geq 3} = 7pN_{\geq 2} \quad (4)$$

— математическое ожидание числа кластеров из не менее чем трех ПЗ.

Математические ожидания числа кластеров $N_{\geq j}$ и N_j из не менее чем j ПЗ можно представить соотношениями

$$N_{\geq j} = (3(j-1) + 4)pN_{\geq (j-1)}; \quad (5)$$

$$N_j = N_{\geq j} - N_{\geq j+1}. \quad (6)$$

Математическое ожидание количества одиночных ПЗ

$$N_1 = N_{\geq 1} - 2N_2 - 3N_3 - \dots - jN_j. \quad (7)$$

При оседании пыльцы на подложке оказывается либо одиночное ПЗ, либо ПЗ в составе кластера. Таким образом, задача сводится к сравнению долей одиночных ПЗ от общего числа осевших на подлож-

ки ПЗ, т.е. к оценке достоверности различия двух выборок по частоте встречаемости данного показателя, характеризующегося альтернативным распределением. С этой целью использовался критерий Фишера с ϕ -преобразованием (угловое преобразование Фишера), предназначенный для сопоставления двух выборок по частоте встречаемости интересующего исследователя показателя:

$$F = \frac{(\phi_1 - \phi_2)^2 \cdot N_{a \geq 1} \cdot N_{b \geq 1}}{N_{a \geq 1} \cdot N_{b \geq 1}} \sim F_{(a, df_1, df_2)}, \quad (8)$$

где ϕ_1 и ϕ_2 — преобразованные доли; $N_{a \geq 1}$, $N_{b \geq 1}$ — объемы выборок (в данном случае — суммарные количества ПЗ на подложках). Полученное значение сравнивалось с табличным при заданном уровне значимости (α) и числом степеней свободы $df_1 = 1$; $df_2 = N_{a \geq 1} + N_{b \geq 1} - 2$.

Когда объемы выборок исчисляются сотнями и тысячами, значение $F = 3,8$ при $\alpha = 0,05$; $6,6$ при $\alpha = 0,01$; $10,8$ при $\alpha = 0,001$. Если вычисленные значения F превышают указанные величины, то нулевую гипотезу при заданном уровне значимости следует отбросить [15].

Результаты

Исследован кластерный состав поступающей в атмосферу пыльцы 14 видов древесных растений, 11 видов злаков и 7 видов прочих травянистых растений — разнотравья.

Кластеры из не менее чем двух ПЗ отмечены в отобранных пыльцевых пробах всех анемофильных растений (табл. 1–3). У древесных растений (табл. 1) доля кластеров из двух и более ПЗ от общего количества ПЧ, осевших на подложки, варьировалась

Таблица 1

Наличие кластеров в пыли древесных растений, поступающей в атмосферу

| № | Видовое название | Дата наблюдения (2018 г.) | t, °C | RH, % | Число | | Доля кластеров из не менее чем двух ПЗ, % | Доля ПЗ в кластерах из не менее чем двух ПЗ, % |
|----|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|---|--|
| | | | | | ПЧ | ПЗ | | |
| 1 | Береза растопыренная | 01.05 | 14,0 | 57,0 | 774 | 2025 | 39,3 | 76,8 |
| 2 | Береза пушистая | 01.05 | 14,4 | 56,7 | 4032 | 5621 | 19,6 | 42,4 |
| 3 | Береза даурская | 29.05 | 14,7 | 53,8 | 2837 | 4928 | 34,7 | 62,4 |
| 4 | Береза желтая | 30.05 | 14,9° | 55,6 | 492 | 883 | 25,8 | 58,7 |
| 5 | Береза кустарниковая | 30.05 | 16,7 | 49,6 | 977 | 1284 | 19,3 | 38,6 |
| 6 | Вяз низкий | 06.05 | 26,6 | 21,1 | 7434 | 13394 | 29,2 | 60,7 |
| 7 | Вяз японский | 06.05 | 26,3 | 22,3 | 1836 | 2897 | 30,1 | 55,7 |
| 8 | Ива остролистная | 11.05 | 15,0 | 28,5 | 1829 | 6617 | 62,7 | 89,7 |
| 9 | Ива пепельная | 18.05 | 16,0 | 34,0 | 1232 | 6289 | 58,6 | 91,9 |
| 10 | Ива пурпурная | 16.05 | 16,2 | 31,0 | 694 | 4553 | 66,1 | 94,8 |
| 11 | Ива розмаринолистная | 18.05 | 17,0 | 37,0 | 645 | 2225 | 55,3 | 87,1 |
| 12 | Лещина американская | 01.05 | 9,0 | 46,0 | 1809 | 3110 | 34,0 | 61,6 |
| 13 | Лещина обыкновенная | 01.05 | 11,2 | 86,8 | 593 | 779 | 15,2 | 35,4 |
| 14 | Ольха черная | 26.04 | 13,9 | 38,2 | 2170 | 2388 | 6,8 | 15,3 |

Таблица 2

Наличие кластеров в пыли злаков, поступающей в атмосферу

| № | Видовое название | Дата наблюдения (2018 г.) | t, °C | RH, % | Число | | Доля кластеров из не менее чем двух ПЗ, % | Доля ПЗ в кластерах из не менее чем двух ПЗ, % |
|----|----------------------|---------------------------|-------|-------|-------|------|---|--|
| | | | | | ПЧ | ПЗ | | |
| 1 | Ковыль перистый | 26.04 | 25,6 | 73,5 | 505 | 607 | 14,1 | 28,5 |
| 2 | Мятлик альпийский | 09.06 | 23,5 | 71,2 | 838 | 1489 | 32,3 | 61,9 |
| 3 | Мятлик лесной | 26.06 | 26,6 | 64,7 | 1635 | 2035 | 14,5 | 31,3 |
| 4 | Овес посевной | 26.06 | 24,8 | 77,6 | 1029 | 1321 | 12,9 | 32,2 |
| 5 | Просо прутьевидное | 20.07 | 26,2 | 75,8 | 75,8 | 924 | 11,6 | 27,3 |
| 6 | Райграс бульбоносный | 26.06 | 26,1 | 74,0 | 836 | 1031 | 11,5 | 28,2 |
| 7 | Райграс пастбищный | 20.07 | 24,4 | 77,5 | 598 | 798 | 18,4 | 38,8 |
| 8 | Трясунка большая | 26.07 | 23,8 | 66,6 | 349 | 475 | 18,9 | 40,4 |
| 9 | Чий блестящий | 09.08 | 36,6 | 40,2 | 552 | 711 | 16,5 | 35,2 |
| 10 | Щетинник пурпурный | 09.08 | 32,5 | 41,3 | 2039 | 2601 | 15,2 | 33,5 |
| 11 | Щучка дернистая | 18.07 | 25,7 | 60,0 | 428 | 565 | 21,0 | 40,2 |

Таблица 3

Наличие кластеров в пыли разнотравья, поступающей в атмосферу

| № | Видовое название | Дата наблюдения (2018 г.) | t, °C | RH, % | Число | | Доля кластеров из не менее чем двух ПЗ, % | Доля ПЗ в кластерах из не менее чем двух ПЗ, % |
|---|------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|------|---|--|
| | | | | | ПЧ | ПЗ | | |
| 1 | Крапива жгучая | 24.06 | 23,1 | 60,3 | 1029 | 2165 | 38,7 | 70,9 |
| 2 | Осока алтайская | 09.06 | 24,2 | 65,7 | 467 | 1626 | 67,9 | 90,8 |
| 3 | Осока бледноватая | 09.06 | 24,2 | 65,7 | 2204 | 3682 | 32,4 | 59,6 |
| 4 | Осока повислая | 09.06 | 24,4 | 67,0 | 398 | 849 | 37,9 | 70,9 |
| 5 | Осока пузырчатая | 09.06 | 24,4 | 66,4 | 760 | 1149 | 28,6 | 52,7 |
| 6 | Осока светлая | 09.06 | 25,5 | 63,4 | 426 | 748 | 35,7 | 63,4 |
| 7 | Подорожник ланцетолистный | 26.07 | 24,3 | 70,0 | 1105 | 1756 | 25,2 | 53,0 |

от 6,8 (ольха черная) до 66,1% (ива пурпурная). В состав кластеров входило 15,3–94,8% от общего числа ПЗ, осевших на подложки. Столь широкий диапазон варьирования, видимо, обусловлен различиями морфологии пыльцевых оболочек у видов различных семейств и разными фазами цветения.

У злаков (табл. 2) доля кластеров от общего количества ПЧ варьировалась от 11,5 (райграс бульбоносный) до 32,3% (мятлик альпийский). В их состав входило от 27,3 (просо прутьевидное) до 61,9% от общего числа осевших на подложки ПЗ. Морфология пыльцевых оболочек злаков монотипная, и различия, видимо, обусловлены разными фазами цветения.

У прочих травянистых растений – разнотравья (табл. 3) – доля кластеров от общего количества ПЧ варьировалась от 25,2 (подорожник ланцетолистный) до 67,9% (осока алтайская). В их состав входило от 52,7 (осока пузырчатая) до 90,8% от общего числа осевших на подложки ПЗ. Варьирование, видимо, обусловлено различиями морфологии пыльцевых оболочек у видов различных семейств и разными фазами цветения.

В табл. 4–6 приводятся: 1) общее количество пыльцевых зерен, осевших на подложки ($N_{\geq 1}$); 2) доля поверхности препаратов, которую занимают зерна пыльцы ($p, \%$); 3) реально наблюдавшееся количество кластеров из j ПЗ на подложках (n_j)

и его математическое ожидание (N_j); 4) вычисленные значения критерия Фишера (F) при сравнении долей одиночных ПЗ.

Суммарная площадь проекции осевших на подложки ПЗ у древесных растений (табл. 4) варьировалась от 0,03 до 3,46% от просмотренной поверхности

Таблица 4

Количество и математические ожидания кластеров из j ПЗ древесных растений

| Видовое название | $N_{\geq 1}$ | $p, \%$ | Параметр | j | | | | | | | | | | | | F | |
|----------------------|--------------|---------|----------|------|------|-----|-----|-----|----|----|----|----|-----------|-----------|------------|-----|-------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | ≥ 10 | ≥ 20 | ≥ 100 | | |
| Береза растопыренная | 2025 | 0,08 | n_j | 2013 | 6 | | | | | | | | | | | | 63,1 |
| | | | N_j | 470 | 76 | 63 | 40 | 36 | 18 | 9 | 9 | 9 | 33 | 11 | | | |
| Береза пушистая | 5621 | 0,79 | n_j | 5253 | 169 | 9 | 1 | | | | | | | | | | 47,7 |
| | | | N_j | 3240 | 483 | 155 | 58 | 23 | 14 | 13 | 14 | 4 | 28 | | | | |
| Береза желтая | 883 | 0,03 | n_j | 881 | 1 | | | | | | | | | | | | 34,7 |
| | | | N_j | 365 | 58 | 18 | 11 | 5 | 11 | 8 | 6 | 1 | 8 | 1 | | | |
| Береза кустарниковая | 1284 | 0,08 | n_j | 1276 | 4 | | | | | | | | | | | | 30,0 |
| | | | N_j | 788 | 141 | 23 | 12 | 7 | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | | | |
| Береза даурская | 4928 | 0,88 | n_j | 4567 | 164 | 10 | 1 | | | | | | | | | | 63,2 |
| | | | N_j | 1853 | 528 | 212 | 102 | 55 | 29 | 16 | 13 | 10 | 16 | 3 | | | |
| Вяз низкий | 13394 | 3,46 | n_j | 9203 | 1405 | 294 | 86 | 31 | | | | | | | | | 49,0 |
| | | | N_j | 5266 | 1045 | 417 | 258 | 138 | 66 | 54 | 29 | 21 | 93 | 47 | | | |
| Вяз Японский | 2897 | 0,23 | n_j | 2845 | 26 | | | | | | | | | | | | 53,8 |
| | | | N_j | 1284 | 340 | 96 | 54 | 26 | 15 | 7 | 5 | 0 | 6 | 3 | | | |
| Ива остролистная | 6617 | 0,57 | n_j | 6307 | 146 | 6 | | | | | | | | | | | 118,0 |
| | | | N_j | 682 | 332 | 196 | 129 | 185 | 54 | 40 | 32 | 18 | 100 | 61 | | | |
| Ива пепельная | 6289 | 0,58 | n_j | 5995 | 139 | 5 | | | | | | | | | | | 119,3 |
| | | | N_j | 510 | 194 | 111 | 68 | 67 | 41 | 27 | 30 | 24 | 92 | 52 | 16 | | |
| Ива пурпурная | 4553 | 0,27 | n_j | 4454 | 48 | 1 | | | | | | | | | | | 113,9 |
| | | | N_j | 235 | 116 | 60 | 34 | 28 | 23 | 27 | 16 | 15 | 72 | 56 | 12 | | |
| Ива розмаринолистная | 2225 | 0,22 | n_j | 2187 | 19 | | | | | | | | | | | | 71,4 |
| | | | N_j | 288 | 113 | 59 | 31 | 27 | 27 | 15 | 15 | 12 | 38 | 20 | | | |
| Лещина американская | 3110 | 0,11 | n_j | 3082 | 14 | | | | | | | | | | | | 80,1 |
| | | | N_j | 1194 | 318 | 144 | 64 | 33 | 23 | 7 | 8 | 4 | 14 | | | | |
| Лещина обыкновенная | 779 | 0,06 | n_j | 775 | 2 | | | | | | | | | | | | 22,3 |
| | | | N_j | 503 | 49 | 18 | 10 | 4 | 2 | 4 | 3 | | | | | | |
| Ольха черная | 2388 | 0,39 | n_j | 2312 | 37 | 1 | | | | | | | | | | | 15,4 |
| | | | N_j | 2022 | 115 | 20 | 7 | 3 | 1 | 1 | | | | | 1 | | |

Таблица 5

Количество и математические ожидания кластеров из j ПЗ злаков

| Видовое название | $N_{\geq 1}$ | $p, \%$ | Параметр | j | | | | | | | | | | | | F | |
|----------------------|--------------|---------|----------|------|-----|----|----|----|---|---|---|---|-----------|-----------|------------|-----|------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | ≥ 10 | ≥ 20 | ≥ 100 | | |
| Ковыль перистый | 607 | 0,08 | n_j | 603 | 2 | | | | | | | | | | | | 16,8 |
| | | | N_j | 434 | 47 | 18 | 5 | 1 | | | | | | | | | |
| Мятлик альпийский | 1489 | 0,07 | n_j | 1481 | 4 | | | | | | | | | | | | 45,2 |
| | | | N_j | 567 | 141 | 48 | 32 | 20 | 7 | 7 | 6 | 1 | 6 | 3 | | | |
| Мятлик лесной | 2035 | 0,18 | n_j | 2005 | 15 | | | | | | | | | | | | 30,1 |
| | | | N_j | 1398 | 134 | 71 | 14 | 11 | 5 | 1 | 1 | | | | | | |
| Овес посевной | 1321 | 0,40 | n_j | 1278 | 20 | 1 | | | | | | | | | | | 21,7 |
| | | | N_j | 896 | 83 | 23 | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 | 5 | | | | |
| Просо прутьевидное | 924 | 0,34 | n_j | 898 | 13 | | | | | | | | | | | | 16,4 |
| | | | N_j | 672 | 57 | 13 | 5 | 4 | 6 | 2 | | 1 | | | | | |
| Райграс бульбоносный | 1031 | 0,14 | n_j | 1019 | 6 | | | | | | | | | | | | 20,6 |
| | | | N_j | 740 | 57 | 16 | 9 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | | | | |
| Райграс пастбищный | 798 | 0,07 | n_j | 794 | 2 | | | | | | | | | | | | 23,9 |
| | | | N_j | 488 | 80 | 12 | 5 | 3 | 3 | 2 | 1 | 1 | | | | | |
| Трясунка большая | 475 | 0,03 | n_j | 473 | 1 | | | | | | | | | | | | 19,6 |
| | | | N_j | 283 | 55 | 4 | | | | | | | | 7 | | | |
| Чий блестящий | 711 | 0,05 | n_j | 709 | 1 | | | | | | | | | | | | 21,6 |
| | | | N_j | 461 | 58 | 15 | 7 | 5 | 6 | | | | | | | | |
| Щетинник пурпурный | 2601 | 0,26 | n_j | 2549 | 26 | | | | | | | | | | | | 34,1 |
| | | | N_j | 1729 | 208 | 56 | 17 | 14 | | | | | | 15 | | | |
| Щучка дернистая | 565 | 0,03 | n_j | 564 | 1 | | | | | | | | | | | | 21,5 |
| | | | N_j | 338 | 64 | 16 | 7 | 1 | | | | 1 | | 1 | | | |

Количество и математические ожидания кластеров из j ПЗ разнотравья

| Видовое название | $N_{\geq 1}$ | $p, \%$ | Параметр | j | | | | | | | | | | | | | F |
|---------------------------|--------------|---------|----------|------|-----|-----|----|----|----|----|----|---|-----------|-----------|------------|--|------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | ≥ 10 | ≥ 20 | ≥ 100 | | |
| Крапива жгучая | 2165 | 0,08 | n_j | 2151 | 7 | | | | | | | | | | | | 60,5 |
| | | | N_j | 631 | 175 | 77 | 55 | 22 | 9 | 4 | 10 | 9 | 36 | 1 | | | |
| Осока алтайская | 1626 | 0,20 | n_j | 1600 | 13 | | | | | | | | | | | | 64,8 |
| | | | N_j | 150 | 90 | 61 | 45 | 31 | 23 | 11 | 15 | 7 | 30 | 4 | | | |
| Осока бледноватая | 3682 | 1,07 | n_j | 3354 | 146 | 11 | 1 | | | | | | | | | | 49,6 |
| | | | N_j | 1489 | 390 | 144 | 85 | 42 | 17 | 13 | 4 | 4 | 15 | 1 | | | |
| Осока повислая | 849 | 0,07 | n_j | 845 | 2 | | | | | | | | | | | | 38,1 |
| | | | N_j | 247 | 70 | 40 | 10 | 5 | 3 | 3 | 1 | 0 | 15 | 4 | | | |
| Осока пузырчатая | 1149 | 0,08 | n_j | 1141 | 4 | | | | | | | | | | | | 35,1 |
| | | | N_j | 543 | 127 | 51 | 15 | 16 | 2 | 2 | 3 | 1 | | | | | |
| Осока светлая | 748 | 0,05 | n_j | 744 | 2 | | | | | | | | | | | | 33,0 |
| | | | N_j | 274 | 69 | 38 | 19 | 15 | 7 | 3 | 1 | | | | | | |
| Подорожник ланцетолистный | 1756 | 0,31 | n_j | 1714 | 21 | | | | | | | | | | | | 38,9 |
| | | | N_j | 826 | 141 | 63 | 27 | 11 | 12 | 6 | 6 | 6 | 6 | 1 | | | |

препаратов. Кластерные составы пылевых осадков на подложки резко отличались от тех, которые возникли бы при формировании кластеров на предметных стеклах при оседании на них одиночных ПЗ. Значения F_{ϕ} варьировались от 15,4 до 113,9, что значительно выше его значения при $\alpha = 0,001$.

Площадь проекции осевших ПЗ у злаков (табл. 5) варьировалась от 0,03 до 0,4% от просматриваемой поверхности препаратов. Значения F_{ϕ} варьировались от 16,4 до 45,2, что значительно выше его значения при $\alpha = 0,001$.

Площадь проекции осевших ПЗ разнотравья (табл. 6) варьировалась от 0,05 до 1,07% от просматриваемой поверхности препаратов. Значения F_{ϕ} варьировались от 33 до 64,8, что значительно выше его значения при $\alpha = 0,001$.

Исходя из вышеизложенного, следует отвергнуть исходную гипотезу о формировании пылевых кластеров непосредственно на подложке у исследованных 14 видов древесных растений, 11 видов злаков и 7 видов разнотравья. Формирование кластеров у них происходит непосредственно в пыльниках в процессе поступления пыльцы в атмосферу.

Заключение

Исследован кластерный состав поступающей в атмосферу пыльцы $\sim 1/12$ от общего числа (417) анемофильных видов растений Новосибирской области. Поступающая в атмосферу пыльца ветроопыляемых растений не монодисперсна. Помимо одиночных ПЗ, в атмосферу поступают кластеры, содержащие два и более ПЗ. Процентная доля таких кластеров от общего количества образовавшихся ПЧ варьируется в широких пределах и может сильно различаться у разных видов растений. Подобное варьирование, вероятно, обусловлено различиями в морфологии оболочек ПЗ и разными фазами цветения анемофильных растений.

Морфологические особенности строения пылевых зерен анемофильных растений не предотвращают образование кластеров при эмиссии пыльцы в атмосферу.

Поступающая в атмосферу пыльца ветроопыляемых растений не монодисперсна, а представлена как одиночными ПЗ, так и их кластерами из двух или более ПЗ.

Доля кластеров от общего количества образовавшихся частиц и процентная доля ПЗ в их составе варьируются в широких пределах.

1. Ackerman J.D. Abiotic pollen and pollination: Ecological, functional, and evolutionary perspectives // Plant Syst. Evol. 2000. V. 222. P. 167–185.
2. *Определитель* растений Новосибирской области / И.М. Красноборов, М.Н. Ломоносова, Д.Н. Шауло [и др.]. Новосибирск: Наука, Сибирское предприятие РАН, 2000. 492 с.
3. Erdtman G. Handbook of Palynology. Munksgaard, 1969. 487 p.
4. Despre V.R., Huffman A.J., Burrows S.M., Hoose C., Safatov A.S., Buryak G., Fröhlich-Nowoisky J., Elbert W., Andreae M.O., Pösch U., Jaenicke R. Primary biological aerosol particles in the atmosphere: A review // Tellus B. 2012. V. 64. P. 1–58.
5. Головки В.В., Куценогий К.П., Истомин В.Л. Счетные и массовые концентрации пылевой компоненты атмосферного аэрозоля в окрестностях г. Новосибирска в период цветения древесных растений // Оптика атмосф. и океана, 2015. Т. 28, № 6. С. 529–533.
6. Greenfield L.G. Weight loss and release of mineral nitrogen from decomposing pollen // Soil Biol. Biochem. 1999. V. 31, N 3. P. 351–353.
7. Bohlmann S., Shang X., Giannakaki E., Filioglou M., Romakkaniemi S., Komppula M., Saarto A. Detection and characterization of birch pollen in the atmosphere using a multiwavelength Raman polarization lidar and Hirst-type pollen sampler in Finland // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19, N 23. P. 14559–14569.
8. Buters J.T.M., Antunes C., Galveias A., Bergmann K.C., Thibaudon M., Galán C., Schmidt-Weber C., Oteros J. Pollen and spore monitoring in the world // Clin. Transl. Allergy. 2018. V. 8. P. 9. DOI: 10.1186/s13601-018-0197-8.
9. Beggs P.J. Allergen aerosol from pollen-nucleated precipitation: A novel thunderstorm asthma trigger // Atmos. Environ. 2017. V. 152. P. 455–457.
10. Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры двудольных растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука, 1978. Т. 1. 174 с.
11. Crook B. Inertial Samplers: Biological Perspectives // Bioaerosols Handbook / C.S. Cox, C.M. Wathes (eds.).

- Boca Raton, Florida: Lewis Publishers Inc, 1995. P. 247–267.
12. *Crook B.* Non-Inertial Samplers: Biological Perspectives // *Bioaerosols Handbook* / C.S. Cox, C.M. Wathes (eds.). Boca Raton, Florida: Lewis Publishers Inc, 1995. P. 269–283.
13. *Фукс Н.А.* Механика аэрозолей. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 352 с.
14. *Головко В.В., Беланова А.П., Зуева Г.А.* Исследование кластерного состава пылевых частиц, поступающих в атмосферу во время цветения анемофильных растений // *Оптика атмосф. и океана*. 2019. Т. 32, № 6. С. 476–481. DOI: 10.15372/АОО20190610.
15. *Ивантер Э.В., Коросов А.В.* Элементарная биометрия. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. 104 с.

V.V. Golovko, G.A. Zueva, T.I. Kiseleva. **Pollen grains of anemophilic plants entering the atmosphere. Cluster composition.**

The results of the study of pollen of 32 anemophilic plant species into the atmosphere are given. The proportion of clusters of two or more pollen grains in the total number of pollen particles entering the atmosphere is estimated. It is shown that despite the presence of morphological features in anemophilic plants that prevent the formation of clusters, similar clusters were formed in significant quantities in all series of experiments. The percentage of pollen clusters ranged from 6.8 to 66.1% of the total number of pollen particles; the percentage of pollen grains in the composition of the clusters varied from 15.3 to 94.8%.