

Жизнеспособность пыльцы *Picea obovata* Ledeb. в условиях техногенного стресса

Е. В. БАЖИНА^{1, 2}, М. И. СЕДАЕВА¹

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: genetics@ksc.krasn.ru

²Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

Статья поступила 24.03.2023

После доработки 10.04.2023

Принята к печати 19.04.2023

АННОТАЦИЯ

Результаты сравнительного исследования пыльцы ели сибирской в фоновых условиях и при повышенном уровне загрязнения (граница крупного промышленного центра – г. Красноярск) показали, что динамика развития и жизнеспособность пыльцы варьируют в зависимости от погодных условий года развития в периоды формирования пыльцевых зерен и пыления, техногенного загрязнения. В условиях повышения уровня техногенной нагрузки на границе с городом снижаются прорастание пыльцы, длина пыльцевых трубок, накопление основного питательного вещества – крахмала.

Ключевые слова: *Picea obovata* Ledeb., техногенное загрязнение, прорастание пыльцы, длина пыльцевых трубок, содержание крахмала.

ВВЕДЕНИЕ

Мужские репродуктивные структуры хвойных особенно чувствительны к неблагоприятным внешним воздействиям. Хотя развитие и качество пыльцы значительно варьируют в зависимости от погодных условий года развития и состояния деревьев, локальные градиенты факторов (загрязнение среды, абсолютная высота произрастания древостоев, геофизические аномалии, техногенное загрязнение и др.) могут оказывать решающее значение на жизнеспособность пыльцы различных видов [Seidbold, 1968; Козубов, 1974; Karnosky, Stairs, 1974; Smith, 1990; Третьякова, Бажина, 1994; Delph et al., 1997; Pra-

sad et al., 2011]. Воздушные поллютанты (особенно SO₂, O₃, C₂H₂, HF, тяжелые металлы) негативно влияют на количество, процессы развития и качество пыльцы хвойных [Mejnartowicz, 1983; Ставрова, 1990; Осколков, Воронин, 2003; Калашник и др., 2008]. Жизнеспособность пыльцы снижается в условиях хронического загрязнения, высокого уровня токсических веществ в среде, обильных кислотных дождей и туманов [Houston, Dochinger, 1977; Cox, 1983; Sidhu, 1983; Keller, Beda, 1984; Wolters, Martens, 1987].

Реакция вида на действие воздушных поллютантов контролируется генетически [Karnosky, Stairs, 1974; Ecological genetics..., 1987].

При проращивании *in vitro* выявлены видоспецифические реакции пыльцы на изменения pH среды [Сох, 1983]. Экспериментально показано снижение жизнеспособности темнохвойных видов (*Picea omarica* (Pancic) Purk., *Abies sibirica* Ledeb.) при повышении уровня загрязнения среды [Антипов, Болотов, 1977; Krug, 1990]. Сравнение показателей аномальности и фертильности пыльцы *Picea obovata* Ledeb., растущей в условиях техногенного загрязнения, показало достоверно более высокий уровень и широкий спектр аномалий развития пыльцевых зерен (стерильные гипертрофированные и мелкие, пыльцевые зерна без воздушных мешков, с одним и тремя воздушными мешками) по сравнению с контролем при высоких уровнях значимости [Калашник и др., 2008].

Ель сибирская занимает обширный ареал от границы лесотундры на севере до степной зоны на юге, что свидетельствует о приспособленности вида к воздействиям экстремальных факторов внешней среды [Каппер, 1954; Поликарпов, 1970]. Однако в пределах ареала еловые леса распределены крайне неравномерно, в основном они приурочены к влажным экотопам Европейского Севера и гор Урала и Сибири. Ранее показано, что в условиях повышенной влажности пыльца растений менее толерантна к техногенному загрязнению среды [Genetics effects..., 1987].

Цель настоящих исследований заключалась в сравнительном изучении качества пыльцы ели сибирской, произрастающей в условиях техногенного стресса (непосредственно на окраине крупного промышленного центра – г. Красноярска) и в фоновых древостоях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись деревья ели сибирской, растущие в 15–25 км к западу от г. Красноярска: юго-восточная окраина Западно-Сибирской равнины, 56°08' с. ш. и 92°32' в. д., долина р. Еловка, 300 м над ур. м. (пробная площадь (ПП1)) и окрестности пос. Сухая, 250 м над ур. м. (ПП2) – фоновые условия и непосредственно на юго-восточной границе города: отроги Восточного Саяна, охранная зона национального парка “Красноярские Столбы”, 55°57' с. ш. и 92°47' в. д., долина р. Базаиха, 250 м над ур. м. (ПП3) – повышенный уровень загрязнения [Летопись..., 2014].

Для территории Западно-Сибирской равнины характерен холмисто-увалистый рельеф с чередованием плоских водораздельных участков и широких логов с пологими и резко крутыми склонами. Микрорельеф развит в виде бугров и понижений. Почвенный покров по склонам и вершинам увалов представлен темно-серыми и серыми лесными почвами. Влияние вредных выбросов промышленных центров (в основном г. Красноярск) незначительно ввиду удаленности от источников выбросов и господствующего направления ветров. Территория национального парка относится к отрогам Восточного Саяна. Расположение на окраине крупного промышленного центра с объемом выбросов около 200 тыс. т загрязняющих веществ в год обуславливает повышенный уровень загрязнения на его северо-восточной, прилегающей к городу границе [Летопись..., 2014; Государственный доклад ..., 2019]. Климат района исследований резко-континентальный, с господствующим юго-западным направлением ветров, холодной зимой и жарким летом. Среднегодовая температура воздуха +0,5 °C, среднегодовое количество осадков 485 мм/год. Континентальность климата выражена большой годовой (38 °C по среднемесячным значениям) и суточной (12–14 °C) амплитудами колебаний температуры воздуха. В летний период над территорией устанавливается отрог Сибирского антициклона, который формирует ясную, жаркую погоду, весной и осенью характер погоды неустойчив. Средняя дата последнего заморозка весной – 22 мая, первого осенью – 20 сентября, продолжительность безморозного периода – около 120 дней.

Сбор пыльцы проводился в 2017 и 2018 гг. на временных ПП в период массового пыления (первая декада июня), с 25–29 средневозрастных деревьев на каждой ПП. Сумма эффективных температур ≥ 5 °C подсчитывалась по данным ближайших метеостанций “Аэропорт” и “Роев ручей”.

В лабораторных условиях у свежесобранной пыльцы (25–30 нормально развитых пыльцевых зерен (ПЗ) в трехкратной повторности) определялись размеры ПЗ: длина и высота тела, длина и высота воздушных мешков (ВМ), а также частота встречаемости, спектр аномалий и жизнеспособность. Для определения жизнеспособности пыльцу проращивали

in vitro в 10%-м растворе сахарозы при температуре 26 °С [Паушева, 1988] в течение 3–5 суток, в каждом образце просматривалось около 300 ПЗ, подсчитывалось число проросших (в %), измерялась длина 35–50 пыльцевых трубок (в мкм), проводился гистохимический анализ пыльцы на содержание крахмала [Дженсен, 1965]. Статистическая обработка результатов проводилась по общепринятым методикам с использованием пакета анализа MICROSOFT EXCEL-2000 и Statistica-10 (Лаккин, 1990). Достоверность различий оценивалась по критерию Стьюдента, уровень изменчивости определялся по С. А. Мамаеву [1973].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пыление наблюдалось в третьей декаде мая – первой декаде июня при сумме эффективных температур 150–151,0 градусо-дней. Погодно-климатические условия в период исследований оказались благоприятными для развития пыльцы (положительные среднесуточные температуры воздуха и отсутствие осадков) (рис. 1).

Размеры пыльцевых зерен ели сибирской характеризуются достаточно низким уровнем изменчивости (табл. 1). Морфометрические показатели пыльцы в пределах одного насаждения (ПП) колебались от 8,4 до 24,5 %, различия статистически не достоверны. Между насаждениями достоверно отличалась пыльца деревьев, растущих на ПП2 (по длине тела ПЗ и ВМ), на ПП1 и ПП3 – по высоте тела ПЗ.

Частота встречаемости аномальных ПЗ.

Количество аномальных ПЗ колебалось от 0

до 31,6 % у отдельных деревьев (табл. 2). Максимальная частота аномалий отмечена у деревьев, растущих в долине р. Базаиха, на контрольных участках показатель не превышал 7,4–8,1 %. Наиболее часто встречались мелкие ПЗ (табл. 3). Предполагается, что они формируются вследствие нарушений мейоза, когда часть генетического материала утрачивается в результате нарушений веретена деления или хромосомных мутаций [Rana et al., 2013]. Другие типы аномалий представлены в основном аномалиями по числу воздушных мешков – с одним воротничковым или с 3–4, либо без ВМ.

Жизнеспособность пыльцы. Прорастание и длина пыльцевых трубок (ПТ) более значительно варьировали в зависимости от года развития и места произрастания древостоев (14,7–38,5 %) и, в меньшей степени, на индивидуальном уровне (в пробах одного дерева) (рис. 2). Оценка данных методом квантиль-квантиль показала, что значения показателей жизнеспособности пыльцы близки к нормальному закону распределения (рис. 3).

Прорастание пыльцы у деревьев, растущих на ППЗ, в среднем составляло 27,9–28,6 % (в контроле – 63,4–64,9 и 55,0–76,6 %), у 41 % деревьев здесь проросло менее 40 % ПЗ. Кластерный анализ выявил закономерное разделение массива данных на два кластера (рис. 4, а), стьюдент-тест показал, что различия достоверны на обоих уровнях значимости ($\alpha = 0,05$ и $0,01$). Диапазон варьирования показателя, как правило, выше в условиях загрязнения, в 2018 г. индивидуальные различия между деревьями были более значительны.

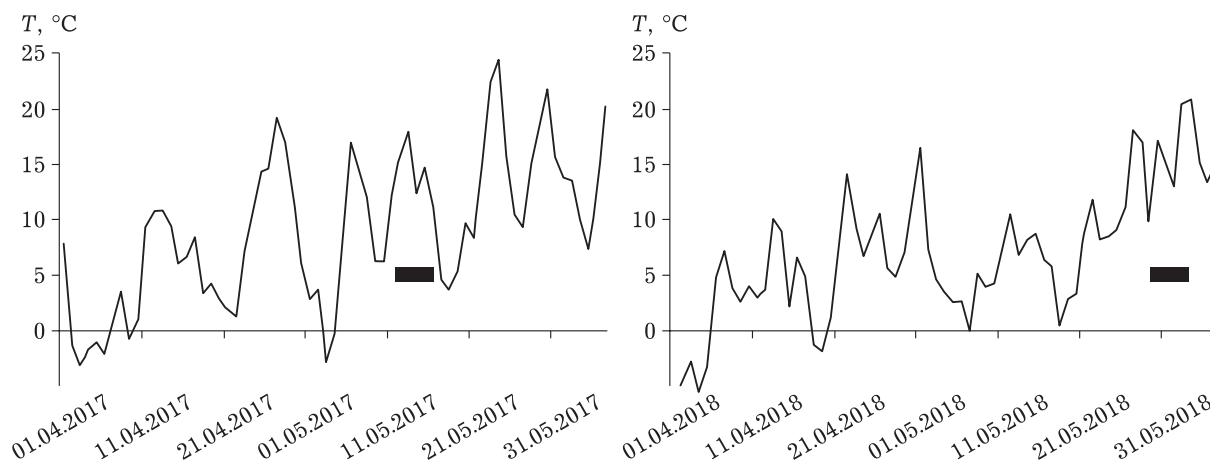


Рис. 1. Сроки пыления у ели сибирской в зависимости от температуры воздуха

Т а б л и ц а 1
Размеры пылевых зерен, мкм*

Место произрастания	Пыльцевое зерно		Воздушный мешок	
	Длина	Высота	Длина	Высота
2017 г.				
ПП1	$78,4 \pm 0,27$	$60,3 \pm 0,26$	$40,7 \pm 0,20$	$47,2 \pm 0,21$
	57,9–97,0	38,1–76,8	25,5–53,9	34,0–62,5
ПП2	$74,6 \pm 0,33$	$60,6 \pm 0,31$	$39,0 \pm 0,27$	$47,2 \pm 0,28$
	53,3–103,7	34,1–85,6	21,1–65,6	31,3–68,6
ПП3	$62,79 \pm 0,506$	$55,63 \pm 0,659$	$35,83 \pm 0,473$	$49,62 \pm 0,531$
	33,24–92,15	20,83–100,24	18,74–68,04	23,34–80,70
2018 г.				
ПП1	$70,97 \pm 0,281$	$49,81 \pm 0,273$	$43,41 \pm 0,210$	$41,60 \pm 0,217$
	49,27–95,52	29,30–71,72	24,14–61,12	26,26–64,40
ПП2	$69,51 \pm 0,334$	$49,13 \pm 0,356$	$41,62 \pm 0,251$	$42,00 \pm 0,345$
	50,83–92,13	31,23–72,75	21,65–59,30	26,18–72,50
ПП3	$70,88 \pm 0,324$	$46,76 \pm 0,259$	$42,25 \pm 0,226$	$40,96 \pm 0,207$
	43,80–96,64	28,35–75,50	26,40–65,76	26,26–63,98

* В числителе – средние значения $\pm$ ошибка, в знаменателе – размах варьирования.

Т а б л и ц а 2
Показатели качества пыльцы, %

Место произрастания	Доля пылевых зерен*		
	Аномальных	Давших положительную реакцию на крахмал	Проросших
2017 г.			
ПП1	$1,5$	$98,5$	$63,4$
	0–7,9	94,9–99,7	35,8–89,3
ПП2	$0,8$	$98,2$	$64,9$
	0–2,7	94,2–99,6	15,2–81,6
ПП3	$7,2$	$62,1$	$28,6$
	0–31,6	10,6–99,0	0–61,1
2018 г.			
ПП1	$2,2$	$93,4$	$55,0$
	0–7,4	83,0–100,0	10,3–89,1
ПП2	$2,4$	$95,3$	$76,6$
	0–8,1	90,1–98,0	46,5–94,3
ПП3	$2,1$	$89,1$	$27,9$
	0–9,9	64,1–100,0	1,2–81,3

* В числителе – средние значения, в знаменателе – размах варьирования.

Значительные индивидуальные различия в зависимости от условий произрастания наблюдались и по показателю длины ПТ – средние значения варьировали у отдельных деревьев от 62,1 до 235,03 мкм (на 73,6 %). При

этом лишь 33–41 % значений укладывается в доверительный интервал 2σ (рис. 5).

В среднем для ценопопуляции длина ПТ была существенно выше у деревьев, растущих на контрольных участках (126–149 мкм –

Т а б л и ц а 3

Частота представленности аномалий пылевых зерен, %

Тип аномалии пылевых зерен	Средняя (максимальная) частота
Мелкие пылевые зерна	1,560 (4,762)
Воротничковые воздушные мешки	0,036 (0,971)
Трехмешковые пылевые зерна	0,036 (0,493)
Четырехмешковые пылевые зерна	0,073 (1,905)
Пылевые зерна с одним воздушным мешком	0,073 (1,802)
Пылевые зерна без воздушных мешков	0,290 (7,207)

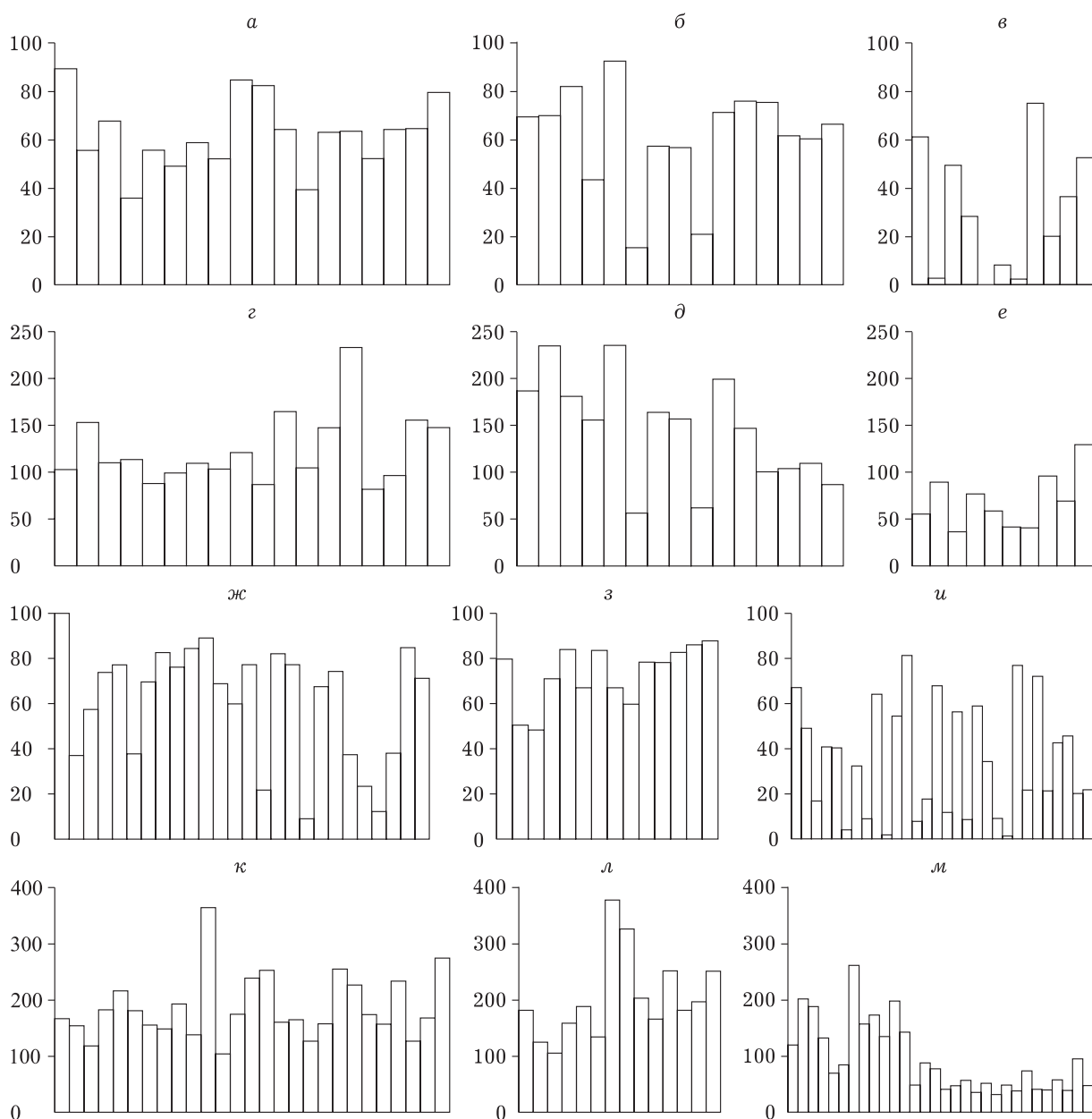


Рис. 2. Прорастание пыльцы (%) в пробах 2017 г. (*а* – ПП1, *б* – ПП2, *в* – ПП3) и длина ПТ (мкм) (*г* – ПП1, *д* – ПП2, *е* – ПП3) и 2018 г. (*ж*–*и*, *к*–*м* соответственно); каждый столбец соответствует одному дереву

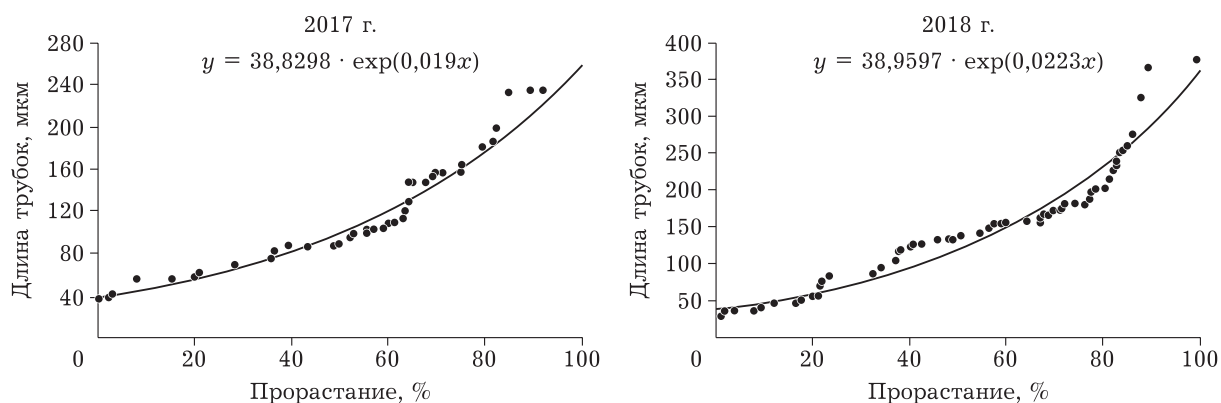


Рис. 3. Диаграмма размаха квантиль-квантиль для показателей прорастания

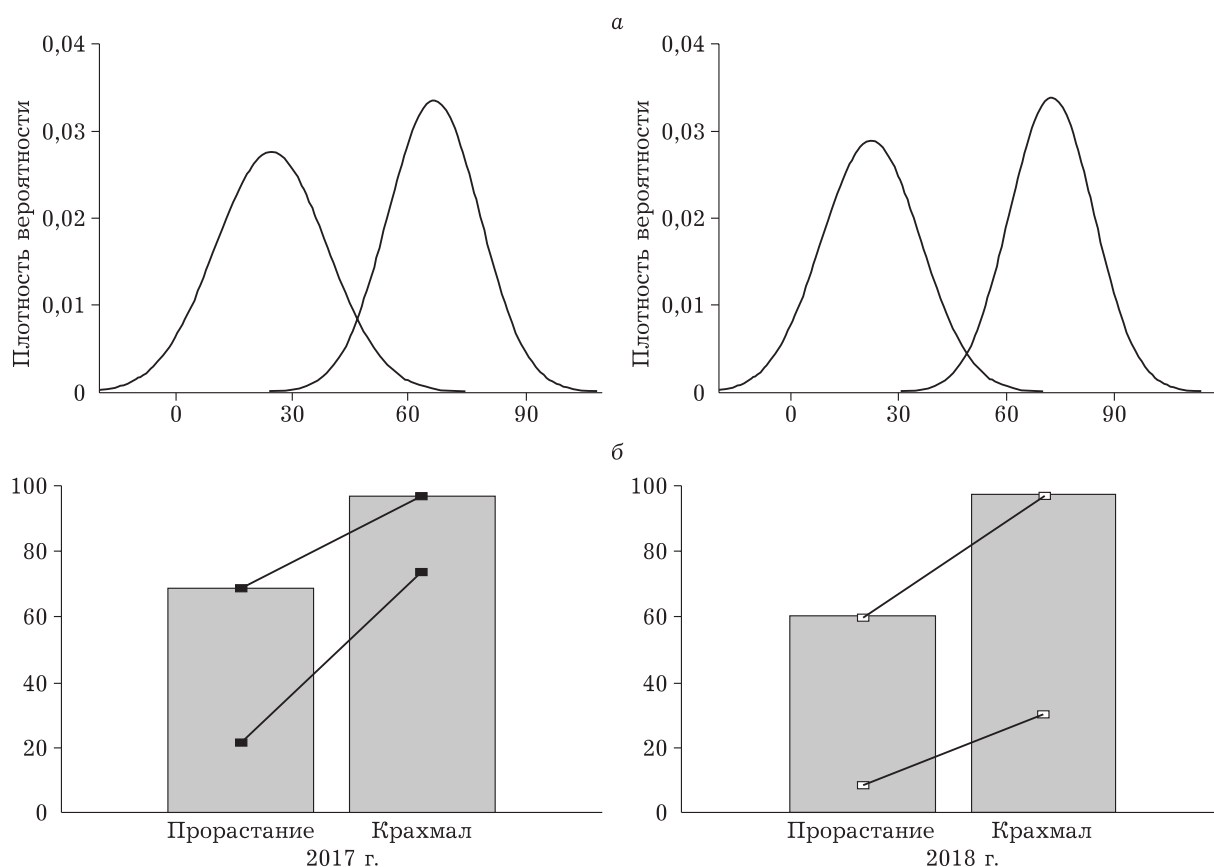


Рис. 4. Кластерный анализ показателей прорастания пыльцы (а, ось y – функция плотности) и числа проросших и покрашенных пылевых зерен (б).

Левый столбик — кластер 1, правый — кластер 2

в 2017 г. и 195–213 мкм – в 2018 г.). В пригородном древостое показатель уменьшался в разные годы до 81–140 мкм, в 2017 г. был близок к критическому значению. При проращивании на искусственных средах пыльца считается жизнеспособной, если длина пылевых трубок превышает размеры пылевого зерна [Третьякова, Бажина, 1994; Nak, Russel, 2004].

Гистохимические исследования пыльцы. Жизнеспособность пыльцы в значительной степени зависит от содержащихся в ней питательных веществ, так как в начальный период прорастания пылевые трубки развиваются главным образом за счет собственных запасов [Поддубная-Арнольди, 1964]. Пыльца видов *Picea*, как и у большинства пред-

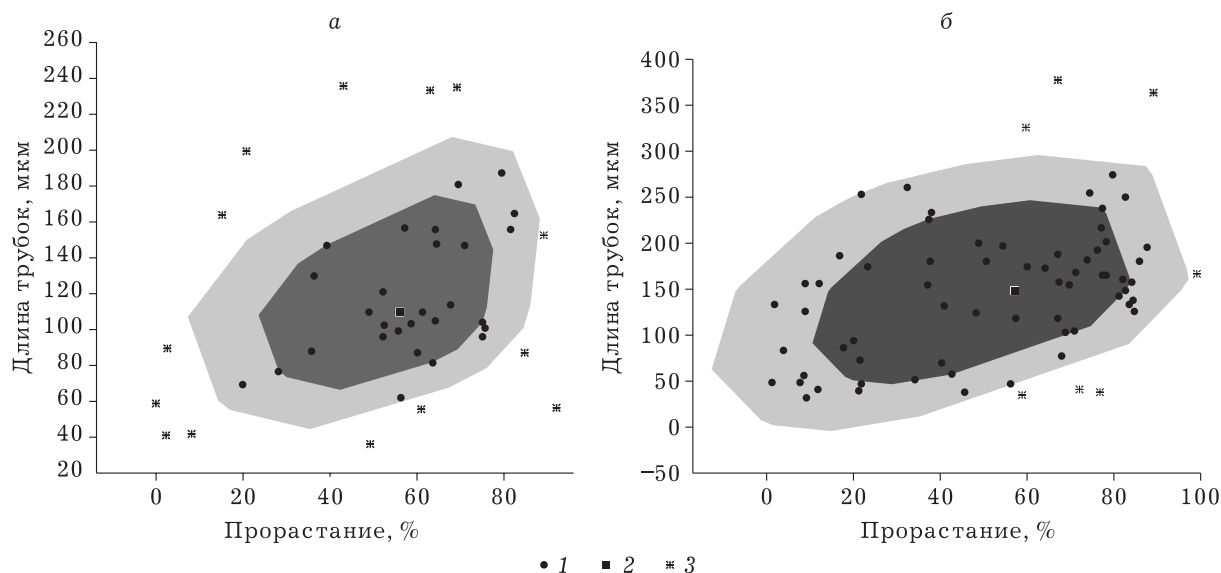


Рис. 5. Диаграммы концентрации жизнеспособности ПЗ (длина трубок и прорастание): а – 2017 г., б – 2018 г.: 1 – длина трубок, 2 – медиана Тьюки, 3 – выбросы. Темный фон – область 1, содержит 50 % точек с наибольшей глубиной, серый фон – многоугольник, полученный растяжением области 1 в 1,5 раза

ставителей голосеменных, относится к так называемому крахмальному типу. Гистохимический анализ пыльцевых зерен показал, что положительную реакцию на основное питательное вещество – крахмал – дают 85,7–100 % пыльцевых зерен (см. табл. 2). Так же как число проросших ПЗ, данные группируются в два кластера (см. рис. 4, б).

ОБСУЖДЕНИЕ

Репродуктивный успех растений во многом определяется наличием жизнеспособной пыльцы, поскольку от качества пыльцевых зерен во многом зависит получение качественных семян [Поддубная-Арнольди, 1964; Wilcock, 2000]. Развитие и жизнеспособность пыльцы растений определяются как внутренними (состояние дерева, особенности метаболизма), так и внешними (условия произрастания, температура, осадки) факторами. Виды *Picea* хорошо адаптированы к умеренному климату бореальной зоны, ель сибирская в условиях Средней Сибири характеризуется регулярным развитием и высокой жизнеспособностью пыльцы [Бажина и др., 2019, 2020]. Однако техногенный стресс может изменить резистентность организма, при этом сила и характер воздействия определяются свойствами организма и зависят от

его исходного состояния. Хотя пыльца хвойных менее чувствительна к изменениям pH среды, чем у широколиственных растений, и прорастание, и длина пыльцевых трубок уменьшаются в условиях воздушного загрязнения [Manning, Fewer, 1980; Cox, 1983; Ecological genetics ..., 1987; Kormutak et al., 1994]. Жизнеспособность снижается как при высоких концентрациях, так и при значительной продолжительности воздействия. Отмечается видоспецифичность реакции на поллютанты, в частности, темнохвойные виды оказываются более чувствительны [Genetics effects..., 1987; Калашник и др., 2008]. Как показали настоящие исследования, техногенный стресс оказывает негативное воздействие на функциональные свойства пыльцы ели сибирской – непосредственно на границе крупного промышленного центра прорастание и длина ПТ уменьшаются. Аналогичная картина наблюдалась ранее в этих условиях и у деревьев пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) [Бажина, 2007]. Разделение массива данных на два кластера свидетельствует о его неоднородности – часть деревьев, очевидно, продуцирует стерильные ПЗ. Увеличение стерильности пыльцы, наблюдаемое в этих условиях, может привести к снижению генетического разнообразия ели, а также к нарушению процессов оплодотворения и формирования семян.

Репродуктивные органы считаются сильными потребителями питательных веществ, синтетические процессы в них зависят от количества поступающих ассимилянтов [Чиков, 1987], а следовательно, и от состояния деревьев. В условиях загрязнения у хвойных наблюдаются нарушения метаболизма, даже когда видимые повреждения спорофита еще не проявляются. Очевидно, на функциональных свойствах пыльцы прежде всего сказываются изменения в составе питательных и физиологически активных соединений – углеводов, служащих резервным источником энергии и поставщиком субстрата для роста, аминокислотного состава, обуславливающего изменения белковых компонентов и их каталитических свойств [Поддубная-Арнольди, 1964], фенольных соединений, накопление которых рассматривается как неспецифическая реакция растений на стресс [Pont, Pezet, 1991; Судачкова и др., 1997]. Установлено, что пыльца с повышенным содержанием углеводов отличается более высокой жизнеспособностью [Stanley, Linskens, 1974; Некрасова, 1983; Третьякова, Носкова, 2004]. Аналогичная зависимость выявлена и для пыльцы ели сибирской – жизнеспособность пыльцы выше у деревьев, большее число ПЗ которых дает положительное окрашивание на крахмал, однако связи не всегда функциональны. Значительная вариабельность показателей качества пыльцы ели в пробах одного дерева свидетельствует о функциональной мультивариантности реакции особи на стресс, что, в конечном итоге, обеспечивает выживание вида.

Анализ химических показателей загрязнения среды часто не отражает состояния экосистем, так как на растения действует смесь нескольких загрязнителей одновременно в сочетании с природными факторами. Экосистемы могут приспосабливаться к такому влиянию, но по состоянию чувствительных видов можно судить об уровне загрязнения. Влияние неблагоприятных условий сказывается в первую очередь на продолжительности жизни биоты и репродуктивных процессах, в частности на жизнеспособности пыльцы растений [Keller, Bada, 1984; Wolters Martens, 1987; Лямеборшай, Родин, 2002].

Любые изменения внешней среды вызывают в живом организме соответствующие адаптивные реакции, которые нередко име-

ют достаточно сложный характер. Они могут выражаться в изменении различных функциональных систем, определяя их качественно новую структуру. В результате изменившихся условий существования в организме вырабатываются адекватные компенсаторные реакции, обеспечивающие нормальную его жизнедеятельность и общий гомеостаз. Мы полагаем, что значительные вариации качества ПЗ обусловлены как локальными различиями в условиях произрастания (загрязнение), так и состоянием, генетическими особенностями (способностью к адаптации) отдельных деревьев. Увеличение стерильности пыльцы, наблюдаемое при нарушении гомеостаза деревьев в стрессовых условиях, может привести к нарушению процессов оплодотворения и формирования семян, как это происходит у пихты сибирской [Бажина, 1997]. Однако у ели сибирской, как показали исследования, при настоящем уровне загрязнения, очевидно, происходит компенсация негативных воздействий, хотя прорастание и длина пыльцевых трубок снижаются; у основной массы ПЗ критических значений показатели пока не достигают. Пыльцу ели сибирской можно использовать в работах по комплексному мониторингу качества среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Picea obovata в условиях Сибири характеризуется регулярным развитием и высокой жизнеспособностью пыльцы, в условиях повышения уровня загрязнения наблюдается некритичное снижение жизнеспособности и увеличение вариабельности прорастания и длины ПТ, что свидетельствует о функциональной мультивариантности реакции особи на загрязнение. Уменьшение жизнеспособности пыльцы ели сибирской может привести к нарушению процессов оплодотворения и формирования семян, снижению генетического разнообразия вида. Пыльцу ели сибирской можно использовать в работах по комплексному мониторингу качества среды.

Работа выполнена в рамках базового проекта № FWES-2021-0009 “Функционально-динамическая индикация биоразнообразия лесов Сибири”.

Авторы признательны дирекции национального парка “Красноярские Столбы” за возможность проведения исследований на территории парка, а также канд. биол. наук А. К. Экарту за помощь в сборе образцов.

ЛИТЕРАТУРА

- Антипов В. Г., Болотов Н. А. Отношение видов пихты к загрязнению воздуха промышленными газами // Защитное лесоразведение и лесные культуры: сб. науч. тр. / Воронеж. гос. ун-т. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1977. Вып. 4. С. 15–21.
- Бажина Е. В. Половая репродукция пихты сибирской в нарушенных лесных экосистемах оз. Байкал: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 1997. 20 с.
- Бажина Е. В. Жизнеспособность пыльцы как показатель состояния пихты сибирской в заповеднике “Столбы” // Заповедное дело. Науч.-методич. записки комиссии по сохранению биологического разнообразия (секция заповедного дела). 2007. Вып. 12. С. 56–67.
- Бажина Е. В., Седаева М. И., Муратова Е. Н. Мейоз при микроспорогенезе у ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) в условиях юга Средней Сибири // Онтогенез. 2019. Т. 50, № 3. С. 170–180 [Bazhina E. V., Cedaeva M. I., Muratova E. N. Meiosis during Microsporogenesis in Siberian Spruce (*Picea obovata* Ledeb.) in the South of Central Siberia // *Rus. J. Develop. Biol.* 2019. Vol. 50, N 3. P. 113–123].
- Бажина Е. В., Седаева М. И., Экарт А. К. Жизнеспособность пыльцы ели сибирской в южной тайге Красноярского края // Лесоведение. 2020. № 4. С. 377–384.
- Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2018 году”. Красноярск: Мин-во экологии и рациона природопользования Красноярского края КГБУ “ЦРМП и ООС”, 2019. 298 с.
- Дженсен У. Д. Ботаническая гистохимия. М.: Мир, 1965. 977 с.
- Калашник Н. А., Ясowieва С. М., Преснухина Л. П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале // Лесоведение. 2008. № 2. С. 33–40.
- Каппер О. Г. Хвойные породы. М.; Л.: Лесн. пром-ть, 1954. 304 с.
- Козубов Г. М. Биология плодоношения хвойных на Севере. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1974. 136 с.
- Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: Высш. школа, 1990. 343 с.
- Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. 200 с.
- Летопись природы Государственного природного заповедника “Столбы”. Красноярск, 2014. Кн. 72. С. 156–161.
- Лямеборшай С. Х., Родин С. А. Определение экологического ущерба лесным насаждениям при антропогенном воздействии // Лесоведение. 2002. № 6. С. 36–42.
- Мамаев С. А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М.: Наука, 1973. 283 с.
- Некрасова Т. П. Пыльца и пыльцевой режим хвойных Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 198 с.
- Осколков В. А., Воронин В. И. Репродукционный процесс у сосны обыкновенной в условиях техногенного загрязнения. Иркутск: Изд-во ИрГУ, 2003. 120 с.
- Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.
- Поддубная-Арнольди В. А. Общая эмбриология покрытосеменных растений. М.: Наука, 1964. 482 с.
- Поликарпов Н. П. Комплексные исследования в горных лесах Западного Саяна // Вопросы лесоведения. Красноярск: Кн. изд-во, 1970. Т. 1. С. 26–79.
- Ставрова Н. И. Влияние атмосферного загрязнения на семеношение хвойных пород // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1990. С. 115–121.
- Судачкова Н. Е., Шеин И. В., Романова Л. И., Милютин И. Л., Кудашева Ф. Н., Вараксина Т. Н., Степень Р. А. Биохимические индикаторы стрессового состояния древесных растений. Новосибирск: Наука, 1997. 174 с.
- Третьякова И. Н., Бажина Е. В. Жизнеспособность пыльцы пихты сибирской в экосистемах гор Южной Сибири // Экология. 1994. Т. 25, № 6. С. 20–28 [Tret'yakova I. N., Bazhina E. V. Viability of Siberian-fir pollen in disturbed forest ecosystems of the mountains of Southern Siberia // *Russ. J. Ecol.* 1994. Vol. 25, N 6. P. 413–420].
- Третьякова И. Н., Носкова Н. Е. Пыльца сосны обыкновенной в условиях экологического стресса // Экология. 2004. Т. 35, № 1. С. 26–33 [Tret'yakova I. N., Noskova N. E. Scotch pine pollen under conditions of environmental stress // *Russ. J. Ecol.* 2004. Vol. 35, N 1. P. 20–26].
- Чиков В. И. Фотосинтез и транспорт ассимилятов. М.: Наука, 1987. 188 с.
- Cox R. M. Sensitivity of forest plant reproduction to long range transported air pollutants. In vitro and sensitivity of pollen to simulated acid rain // *New Phytologist.* 1983. Vol. 95, N 2. P. 296–276.
- Delph L. F., Johannsson M. H., Stephenson A. G. How environmental factors affect pollen performance: ecological and evolutionary perspectives // *Ecology.* 1997. Vol. 78. P. 1632–1639.
- Ecological genetics and evolution. Shtiintsa, 1987. 166 p.
- Genetics effects of Air Pollutants in Forest Tree Populations // Proc. of the Joint Meeting of the IUFRO Working Parties Genetic Aspects of Air Pollution and Ecological Genetics. Biochemical Genetics. Berlin. Heidelberg. New York; London; Paris; Tokio; Hong Kong: Springer-Verlag, 1987. 201 p.
- Hak O., Russell J. H. Environmental Effects on Yellow-Cedar Pollen Quality // *Forest Genet. Council. Extension Note.* 2004. Vol. 5. P. 1–9.
- Houston D. B., Dochinger L. S. Effect of ambient air pollution on cone, seed and pollen characteristics in eastern white and red pines // *Envir. Pollut.* 1977. Vol. 12. P. 1–5.
- Karnosky D. F., Stairs G. R. The effect of SO₂ on *in vitro* forest tree pollen germination and tube elongation // *J. Environm. Quality.* 1974. Vol. 3. P. 406–409.
- Keller T., Beda N. Effect of SO₂ on the germination of *Conifer* pollen // *Envir. Pollut.* 1984. Vol. 33, N 3. P. 237–243.
- Kormutak A., Salay I., Vookova B. Pollen viability and seed set of silver fir (*Abies alba* Mill.) in polluted areas of Slovakia // *Silvae Genet.* 1994. Vol. 43, N 2–3. P. 68–73.
- Krug E. Reduced fertilization capacity of SO₂-fumigated *Picea omorica* pollen // *Eur. J. Forest Pathol.* 1990. Vol. 20, N 1. P. 122–129.
- Manning W. J., Fewer W. A. Biomonitoring air pollutants with plants. London: Appl. Sci. Publ., 1980. 141 p.
- Mejnartowitz L. E. Change in genetic structure of Scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) population affected by industrial emission of fluoride and SO₂ // *Genet. Pol.* 1983. Vol. 24. P. 41–50.
- Pont V., Pezet R. Un moyen de defence naturel des vegetaux: phenols // *Rev. Suisse Agr.* 1991. Vol. 23, N 4. P. 237–241.

- Prasad P. V., Boote K. J., Allen L. H. Longevity and temperature response of pollen as affected by elevated growth temperature and carbon dioxide in peanut and grain sorghum // *Environ. Exp. Bot.* 2011. Vol. 1. P. 51–57.
- Rana P. K., Kumar P., Singhal V. K. Spindle irregularities, chromatin transfer and chromatin stickiness during male meiosis in *Anemone tetrasepala* (Ranunculaceae) // *Turkish J. Bot.* 2013. N 97. P. 167–176.
- Seidbold H. W. UV-Dosimetric a *Pinus sylvestris* pollen and stimulations – untersuchungen des pollenschlauch nach UV and ionisierender Bestrahlung. Diss. Doct. Natur Wiss. Fak. Math. Ahd Naturwiss. Hannover: Techn. Univ., 1968. 283 p.
- Sidhu S. S. Effect of simulated acid rain on pollen germination and pollen tube growth of white spruce (*Picea glauca*) // *Can. J. Bot.* 1983. Vol. 61. P. 3095–3099.
- Smith W. Air pollution and Forests: Interaction between air contaminants and forest ecosystems. 2nd ed. Berling; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1990. 618 p.
- Stanley R. G., Linskens H. F. Pollen. Biology Biochemistry management. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1974. 307 p.
- Wilcock C. C. Недостаток опыления в естественных популяциях: значение для сохранения редких видов растений // *Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции*. Т. 3. Системы репродукции / ред. Т. Б. Батыгина. Санкт-Петербург, 2000. С. 126–136.
- Wolters J. H., Martens M. Effect of air pollution on pollen // *Bot. Rev.* 1987. Vol. 63, N 3. P. 372–414.

Pollen viability of *Picea obovata* Ledeb. under technogenic stress conditions

E. V. BAZHINA^{1, 2}, M. I. SEDAeva¹

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: genetics@ksc.krasn.ru

²Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny pr., 79

The Siberian spruce (*Picea obovata* Ledeb.) pollen viability was studied on the border of Krasnoyarsk city as well as unpolluted growth conditions. The study discovered the variability and correlation between the functional characteristics of pollens, as well as a low rate of development anomalies. The viability of pollen growth in forest ecosystems of the Eastern Sayans middle mountains (northeast border of national park “Krasnoyarskie Stolby”) decreased under pollution press. A great variety of pollen viability characteristics of the Siberian spruce pollen makes evident the high degree of flexibility and adaptability of species’ reproductive processes.

Key words: *Picea obovata* Ledeb., pollution, germination of pollen, length of pollen tubes, starch content.