

## Жизнеспособность пыльцы березы повислой в пригородных биоценозах с различной техногенной нагрузкой

Е. В. БАЖИНА<sup>1, 2</sup>, Л. Н. СКРИПАЛЬЩИКОВА<sup>1</sup>, А. С. ШУШПАНОВ<sup>1, 3, 4</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –  
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28  
E-mail: genetics@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>3</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева  
660037, Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 31

<sup>4</sup>Томский государственный университет  
634050, Томск, просп. Ленина, 36

Статья поступила 17.03.2023

После доработки 28.03.2023

Принята к печати 11.04.2023

### АННОТАЦИЯ

Береза повислая (*Betula pendula* Roth.) характеризуется как устойчивый к техногенному загрязнению среды вид древесных растений. Известно, что генеративные процессы растений и, в частности, формирование и жизнеспособность пыльцы крайне чувствительны к воздействию техногенного загрязнения. Исследования жизнеспособности пыльцы проводились в условиях Средней Сибири, в наиболее распространенной группе типов леса – березняках разнотравных, произрастающих в пригородной зоне крупного промышленного центра г. Красноярска, на восьми пробных площадях. Несмотря на устойчивость вида, мужские генеративные органы *B. pendula* оказались чувствительными к воздействию промышленного загрязнения. Исследования показали снижение качества пыльцы при усилении степени техногенной нагрузки, достоверных различий по диаметру пыльцевых зерен в различных условиях произрастания, как и деформированных пыльцевых зерен не обнаружено. Уровень изменчивости размеров пыльцевых зерен по диаметру в биоценозе не превышал 9,3–9,9 %. Максимальное число проросших пыльцевых зерен отмечалось в фоновых условиях, минимальное – на восточной окраине города, по основному направлению переноса техногенных аэрозолей. Длина пыльцевых трубок у деревьев, растущих в этих условиях, уменьшалась более чем в 2 раза по отношению к критическому значению (диаметр пыльцевого зерна 18–20 мкм). Выявлены взаимосвязи прорастания пыльцы и количества пыли, аккумулированной на листовых пластинках, а также содержания в ассимиляционной массе свинца и алюминия ( $r = -0,1-0,3$ ;  $p \leq 0,05$ ). Функциональные показатели пыльцы березы повислой можно рекомендовать в качестве биоиндикационного показателя при проведении мониторинга окружающей среды.

**Ключевые слова:** береза повислая, техногенное загрязнение, пыльца, жизнеспособность, содержание крахмала.

© Бажина Е. В., Скрипальщикова Л. Н., Шушпанов А. С., 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Береза повислая (*Betula pendula* Roth.) является одним из лесообразующих видов древесных растений лесостепной зоны, она выполняет важные средообразующие и санитарно-гигиенические функции, поддерживает экологическую стабильность природных комплексов. Березовые леса в Сибири преобладают по поймам рек и склонам гор, часто с примесью осины, сосны и лиственницы. Распространенность березы в пригородных биоценозах свидетельствует о приспособленности вида, которая, очевидно, представляет собой результат высокой толерантности и плодovitости [Грант, 1991; Ломоносова и др., 1992]. Однако березе свойственно массовое образование пустых плодов, что связывают с недостатком и низким качеством пыльцы [Курдиани, 1914; Sarvas, 1952; Фролова, 1957; Koski, 1971; Смирнова, 1978; Некрасова, 1983]. В городских и пригородных лесах г. Красноярска выявлено снижение качества семян, обусловленное многолетним воздействием промышленных выбросов [Бажина и др., 2018]. В настоящее время показано, что увеличение уровня загрязнения среды представляет серьезную угрозу функционированию, структуре и разнообразию экосистем, изменяет регенеративные способности лесообразующих видов [Bobbink, 1998; Darbah et al., 2008].

Формирование урожая семян у представителей рода *Betula*, как и у большинства анемофильных видов, в значительной степени зависит от результативности системы опыления и морфофизиологических свойств пыльцы. Морфология, жизнеспособность и прорастание пыльцы березы повислой на рыльце пестика и искусственной среде изучены ранее [Каледа, 1979; Некрасова, 1983; Gorden et al., 2000]. Жизнеспособность свежесобранной пыльцы в условиях Западной Сибири составляла более 96 %. В городских фитоценозах вследствие повышения концентрации в воздухе угарного газа доля стерильной пыльцы березы увеличивалась [Хлебова, Ерещенко, 2012]. При проращивании в экспериментах *in vitro* снижение жизнеспособности пыльцы березы наблюдалось при увеличении концентрации в среде меди и цинка [Лях и др., 2004].

В настоящее время достоверно установлено, что пыльца растений (процессы ее формирования и жизнеспособность), как и ре-

продуктивные процессы в целом, крайне чувствительны к воздействию техногенного загрязнения среды [Wolters et al., 1987; Gotardini et al., 2004; Darbah et al., 2008; Солнцева, Глазунова, 2010; Malayeri et al., 2011]. Под воздействием загрязнителей высокой концентрации и при длительной экспозиции жизнеспособность пыльцы снижается даже у относительно устойчивых к поллютантам видов [Houston et al., 1977; Grover et al., 2016]. Негативное влияние на качество пыльцы оказывает накопление отдельных токсичных элементов как в среде, так и в ассимиляционной массе, даже когда видимое повреждение спорфита еще не наблюдается [Houston et al., 1997; Лях и др., 2004]. Исследования жизнеспособности пыльцы толерантных видов, произрастающих в разных экологических условиях, в том числе и при разном уровне техногенных нагрузок, позволяют дополнить оценку состояния пригородных экосистем.

Цель наших исследований заключалась в оценке жизнеспособности пыльцы березы повислой, произрастающей в пригородных лесах г. Красноярска с различным уровнем антропогенной нагрузки.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в березняках, произрастающих в пригородной зоне крупного промышленного центра г. Красноярска. По лесорастительному районированию территория исследований входит в Среднесибирскую плоскогорную и Алтае-Саянскую горную лесорастительные области [Сергеев, 1971; Чередникова и др., 1999]. Наиболее распространенной является разнотравная группа типов леса, в которую входят два преобладающих типа – березняк осочково-разнотравный и березняк вейниково-разнотравный на серых лесных почвах, лесистость составляет не более 15 %.

Уровень загрязнения территории определяется в основном выбросами г. Красноярска (более 200 тыс. т токсических веществ ежегодно), среди которых преобладают бенз(а)пирен, формальдегид, соединения серы, азота, фтора, взвешенные вещества, металлы, пыль [Государственный доклад..., 2018]. Индекс загрязнения атмосферы города в настоящее время характеризуется как высокий [Государственный доклад..., 2022].

Сбор пыльцы проводили в березняках разнотравных на постоянных пробных площадях (ПП), расположенных по основному переносу промышленных выбросов города (ПП 1–4) и подверженных многолетнему антропогенному прессу, а также вне зоны техногенного воздействия, условно контрольные ПП (№ 5–8). Насаждения характеризуются II–IV классами бонитета, возрастом V–VIII классов, средним диаметром древостоев 15–30 см, полнотой 0,6–0,9 [Скрипальщикова и др., 2017; Бажина и др., 2018].

Мужские сережки березы собирали в период пыления, в первой декаде мая. На каждой ПП с западной стороны с 15–20 деревьев диаметром 25–30 см, без видимых повреждений на высоте от 2,5 до 6,0 м секатором срезали ветви с сережками. В лабораторных условиях сережки подсушивали при комнатной температуре, пыльцу просеивали через слой марли, определяли размеры и жизнеспособность пыльцевых зерен. Данные о размерах пыльцевых зерен получены на основании следующих биометрических показателей: два перпендикулярных диаметра тела пыльцевого зерна (большой и меньший), длина и высота воздушных мешков. Качество пыльцы определяли по потенциальной (процент пыльцевых зерен, давших положительную реакцию на крахмал по йодной пробе, люголь) и фактической жизнеспособности [Паушева, 1980]. Для определения жизнеспособности пробы пыльцы проращивали в растворах сахарозы 10, 15, 17 и 20 % при температуре 26 °C. Через 3–4 дня после заложения пыльцы на проращивание для каждого дерева в 4–5 полях зрения учитывали число проросших пыльцевых зерен (в %) и измеряли длину пыльцевых трубок (в мкм). Материал просматривали на микроскопе Микромед-2, объектив  $\times 40$ . Для каждой ПП проанализировано более 500 пыльцевых зерен.

Для определения содержания токсических веществ на каждой ПП в нижней части кроны модельных деревьев отбирали образцы листы (100–150 г). Каждый образец взвешивали и промывали в 1 л дистиллированной воды с последующей фильтрацией через абсолютно сухой беззольный фильтр. Количество пыли определяли на 1 кг абсолютно сухой массы листьев [Детри, 1973]. В листовой массе 15 модельных деревьев определяли содержа-

ние следующих элементов – алюминия, свинца, цинка, кадмия и фтора. Содержание фтора и металлов определяли в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ГЦАС “Красноярский” по сертифицированным методикам: фтор – ионометрическим методом [Методические указания..., 1995], металлы – масс-спектрометрическим методом согласно ПНД Ф 16.1:2:3.11–98. Содержание элементов определяли для каждого дерева, затем данные усредняли. Статистическую обработку проводили с помощью программ Microsoft Excell-2013 и Statistica-10, использовались регрессионный и корреляционный (коэффициент Пирсона) анализы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследованные древостои по уровню техногенного загрязнения можно условно разделить на импактные, расположенные на восточной окраине города, по основному переносу промышленных выбросов (ПП 1–4, рис. 1), где пылевые нагрузки составляют более 3 г/кг, в ассимиляционной массе отмечается увеличение содержания свинца и алюминия. Содержание фтора у отдельных деревьев варьирует от 5,4 до 28,8 мг/кг абсолютно сухой массы (абс. сух. массы) [Скрипальщикова и др., 2017]. ПП 5–8 расположены вне зоны техногенного воздействия города и классифицируются как фоновые. Повышение содержания алюминия в листе на фоновой ПП7, возможно, объясняется его высоким содержанием здесь в почвах [Летопись..., 2014].

Пыление березы повислой в пригородных лесах г. Красноярска, независимо от места произрастания древостоев, проходит в первой декаде мая при сумме эффективных температур  $t > 5\text{ °C} > 88,2$  градусодней.

**Размеры пыльцы.** Пыльцевые зерна (ПЗ) березы повислой являются более мелкими по сравнению с другими видами семейства *Betulaceae* [Николаевская и др., 2009]. Размеры ПЗ березы повислой в условиях Красноярской лесостепи в целом соответствуют видовым характеристикам (таблица), хотя они несколько мельче, а уровень изменчивости диаметра ПЗ ниже, чем в березовых колках Западной Сибири и западных регионах России – Центрально-Черноземном районе, Карелии [Куприянова, Алешина, 1972; Каледа,

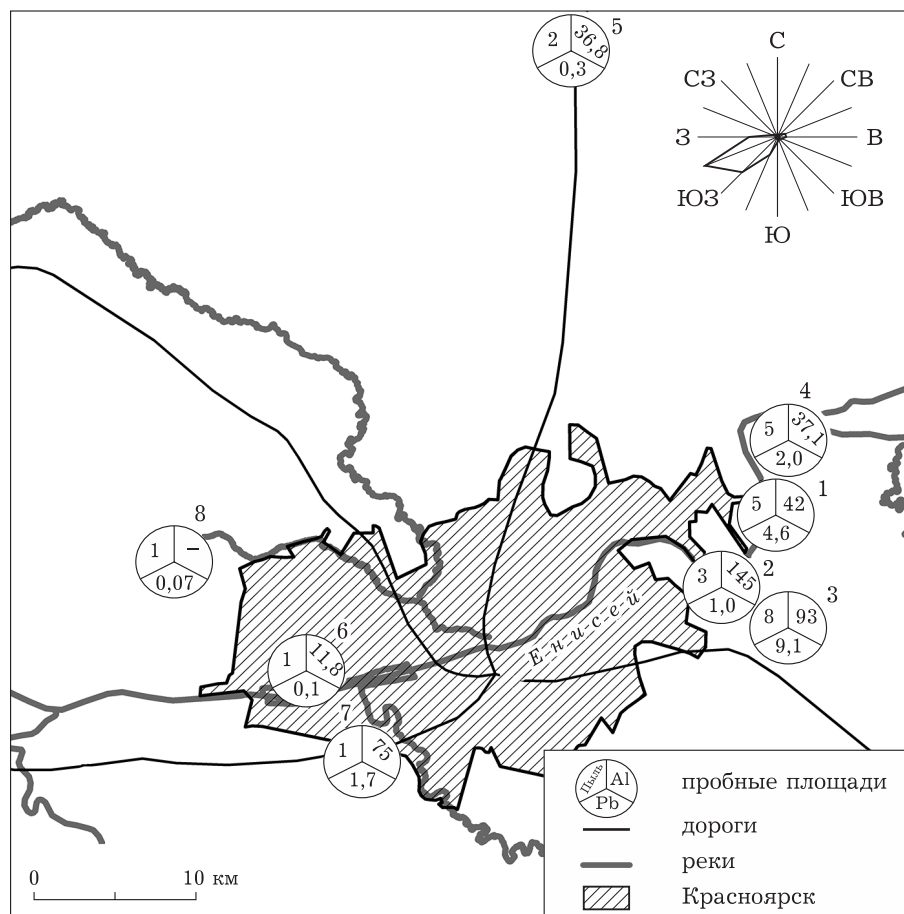


Рис. 1. Карта-схема расположения березняков в пригородной зоне г. Красноярск

Приведено содержание пыли на поверхности листовых пластинок, г/кг, алюминия (Al) и свинца (Pb) в ассимиляционной массе, мг/кг абс. сух. массы (коэффициенты вариации,  $C_V$  – 19,6–26,1 %,  $P = 0,95$ )

#### Размеры пылевых зерен, мкм

| № п/п | Диаметр тела ПЗ |                 | Воздушные мешки |                 |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|       | 1               | 2               | Длина           | Высота          |
| 1     | $20,3 \pm 0,42$ | $19,2 \pm 0,42$ | $6,2 \pm 0,12$  | $10,4 \pm 0,24$ |
|       | 7,00            | 7,3             | 6,5             | 7,6             |
| 2     | $19,1 \pm 0,20$ | $17,7 \pm 0,18$ | $6,3 \pm 0,13$  | $9,9 \pm 0,13$  |
|       | 3,3             | 3,2             | 6,5             | 4,2             |
| 3     | $20,3 \pm 0,59$ | $18,9 \pm 0,52$ | $6,3 \pm 0,16$  | $10,6 \pm 0,33$ |
|       | 6,08            | 6,8             | 6,3             | 7,5             |
| 4     | $19,1 \pm 0,44$ | $17,8 \pm 0,50$ | $6,3 \pm 0,18$  | $10,8 \pm 0,30$ |
|       | 7,3             | 9,0             | 9,2             | 8,6             |
| 5     | $19,8 \pm 0,20$ | $18,9 \pm 0,29$ | $6,6 \pm 0,15$  | $10,9 \pm 0,27$ |
|       | 2,4             | 3,8             | 6,0             | 6,0             |
| 6     | $19,4 \pm 0,64$ | $18,7 \pm 0,39$ | $6,4 \pm 0,16$  | $11,0 \pm 0,35$ |
|       | 8,1             | 5,3             | 6,2             | 7,9             |
| 7     | $18,8 \pm 0,58$ | $18,4 \pm 0,61$ | $5,3 \pm 0,30$  | $10,3 \pm 0,46$ |
|       | 9,3             | 9,9             | 17,0            | 13,4            |
| 8     | $20,8 \pm 0,25$ | $19,4 \pm 0,33$ | $6,8 \pm 0,07$  | $10,8 \pm 0,15$ |
|       | 2,4             | 3,4             | 2,2             | 2,7             |

П р и м е ч а н и е. В числителе – средние значения, в знаменателе – коэффициент вариации, %; 1 и 2 – два перпендикулярных диаметра тела пылевого зерна.

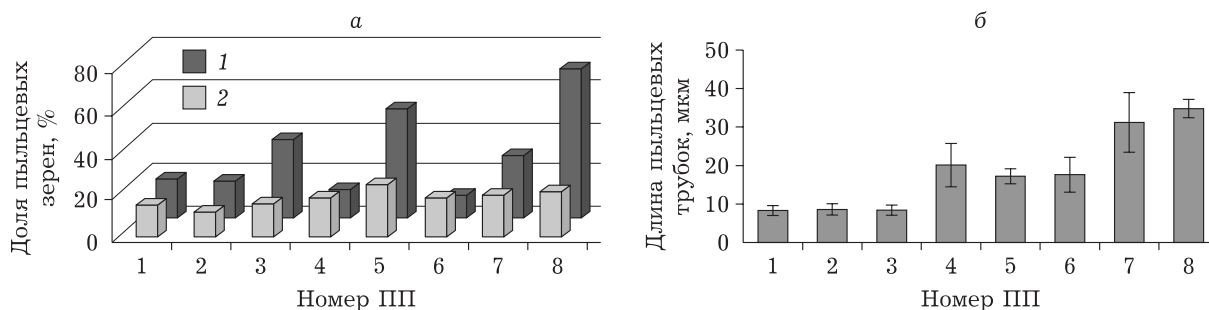


Рис. 2. Жизнеспособность пыльцы березы повислой:

а: 1 – доля пылевых зерен, давших положительную реакцию на крахмал, %, 2 – доля проросших пылевых зерен, %; б – длина пылевых трубок, мкм (средние значения  $\pm$  доверительный интервал,  $P = 95\%$ )

1979; Николаевская и др., 2009], что может быть обусловлено генетически либо экологическими факторами местообитаний. Исследования не выявили достоверных различий по диаметру в различных условиях произрастания, деформированных ПЗ также не обнаружено. Уровень изменчивости размеров ПЗ в биоценозе по диаметру не превышал 9,3–9,9 %, по длине и высоте воздушных мешков варьировал от 2,2 до 17,0 %. Минимальной изменчивостью характеризовались ПЗ в биоценозе, расположенном на максимальном удалении от города в западном направлении (фоновая ПП8).

**Жизнеспособность пыльцы.** Пыльца березы относится к крахмальному типу. Содержание основного питательного вещества – крахмала – на разных ПП составляло от 10,6 до 71,4 % (рис. 2, а). Максимальное количество ПЗ, давших положительную реакцию на крахмал (53,6–95,1 %), отмечалось у деревьев, растущих в фоновых условиях (ПП 5, 8) и снижалось до 10,6–37,3 % в фитоценозах, растущих на окраинах города по основному переносу ветров – юго- и северо-восточное направление (ПП 1, 2, 4, 6). Достаточно высокое содержание крахмала, отмеченное у деревьев, растущих на ПП3, как и низкое – в фоновых условиях (ПП7) может быть обусловлено лесорастительными условиями. Известно, что развитие и продуктивность древесных растений, как правило, напрямую связаны с тем, в каком типе леса они произрастают [Сергеев, 1971]. Насаждения ПП1, 2, 4 относятся к разнотравно-злаковой группе типов леса, а ПП3 – к более влажной, разнотравно-осочковой. В этих условиях, более благоприятных для развития и продуктивности бере-

зы повислой в лесостепной зоне [Чередникова и др., 1999], репродуктивные органы, вероятно, получают больше питательных веществ и содержание крахмала в пыльце выше.

Пыльца березы относительно слабо прорастала на питательной среде, оптимальным для прорастания оказался 17 %-й раствор сахарозы. Максимальное число проросших ПЗ отмечалось в фоновых условиях (ПП8), тогда как на восточной окраине города (ПП 1–4) уменьшалось в 1,3–4,5 раза. Необходимо отметить, что потенциальная жизнеспособность пыльцы, определенная по реакции на крахмал, несколько выше, чем фактически реализованная, при этом характер изменения показателей практически однотипен, хотя коэффициент корреляции (Пирсона,  $r = 0,2$ ) свидетельствует о слабой силе связи этих показателей (рис. 3).

При проращивании на искусственных средах пыльца считается жизнеспособной, если длина пылевых трубок превышает размеры ПЗ [Nak, Russell, 2004]. Исследования показали, что длина пылевых трубок у деревьев, растущих на ПП 4–8, как правило, была больше или равна диаметру (18–20 мкм) ПЗ (рис. 2, б). В то же время у деревьев, растущих на восточной окраине города (ПП 1–3), показатель уменьшался более чем в 2 раза по отношению к критическому значению. В биоценозах, растущих в северо-восточном направлении (ПП4, на удалении 25 км от границы города), наблюдалось максимальное варьирование этого показателя, только у 30 % проанализированных пылевых зерен средняя длина пылевых трубок превышала диаметр ПЗ.

Снижение жизнеспособности пыльцы (и числа проросших ПЗ и длины пылевых

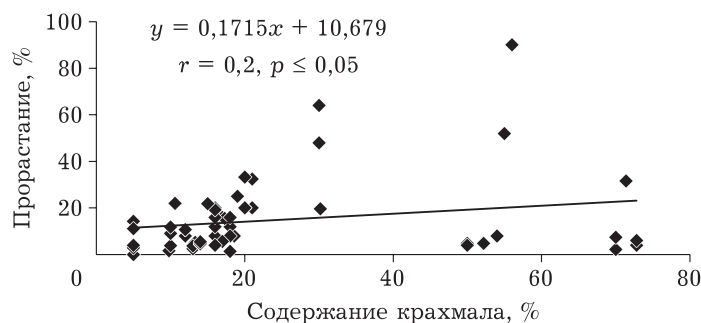


Рис. 3. Связь между содержанием крахмала (доля пыльцевых зерен, давших реакцию на крахмал) и прорастанием пыльцы, %

трубок) коррелирует с накоплением некоторых токсичных элементов. Регрессионный анализ показал, что прорастание пыльцы отрицательно коррелировало с накоплением алюминия и свинца в ассимиляционной массе ( $r = -0,1 \dots -0,3$ ,  $p \leq 0,05$ ), оценка качества моделей показала, что максимальные величины достоверности ( $R^2$ ) обеспечиваются экспоненциальной аппроксимацией (рис. 4). Длина пыльцевых трубок достоверно, но крайне слабо положительно связана с накоплением цинка ( $r = 0,03$ ,  $p \leq 0,05$ ). Накопление пыли на листовых пластинках негативно связано с показателями жизнеспособности ( $r = -0,3 \dots -0,4$ ,  $p \leq 0,05$ ), тогда как достоверных связей с содержанием фтора и кадмия в листе не выявлено.

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Береза повислая отличается экологической пластичностью, быстрым ростом, доста-

точно хорошо адаптируется и растет даже в условиях загрязненной среды обитания [Замятин, 1951; Emberlin et al., 2007; Николаевская и др., 2009; Хлебова, Ерещенко, 2012]. Несмотря на многолетнее техногенное воздействие выбросов г. Красноярск накопление алюминия, свинца, фтора, кадмия в ассимиляционной массе исследованных березняков не превышает пороговых уровней, вызывающих повреждения растений [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Скрипальщикова и др., 2017]. Однако высокий разброс показателей (коэффициент вариации,  $C_V = 19,6-26,1\%$ ) свидетельствует о нарушении гомеостаза деревьев в фитоценозе.

В природной среде на растения действует комплекс факторов, в том числе и многокомпонентное загрязнение. Известно, что характер влияния поллютантов на метаболизм довольно сложен, контролируется генетически и, негативные эффекты, как в целом на растения, так и на репродуктивные процессы,

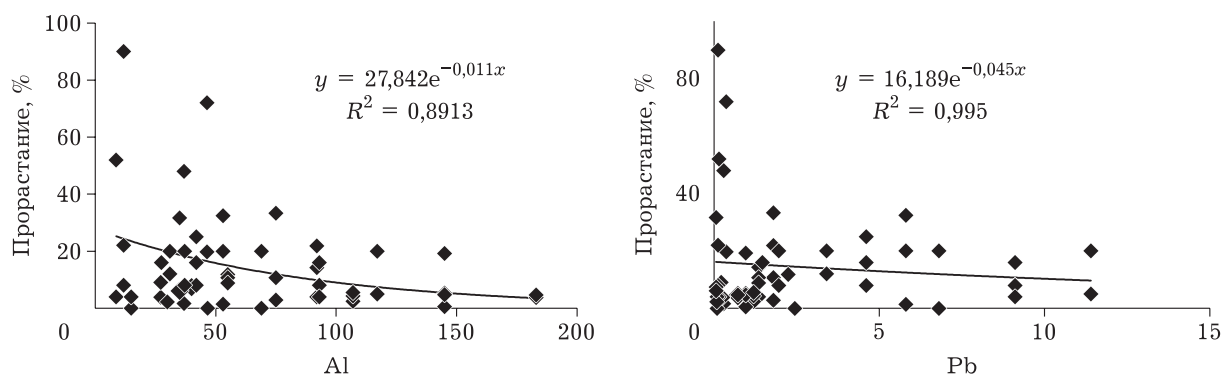


Рис. 4. Зависимости между прорастанием пыльцы березы и содержанием в ассимиляционной массе (мг/кг абс. сух. массы) алюминия ( $r = -0,3$ ,  $p \leq 0,05$ ) и свинца ( $r = -0,1$ ,  $p \leq 0,05$ );  $R^2$  – коэффициент достоверности аппроксимации модели

возможны даже при низких уровнях содержания токсикантов [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Gottardini et al., 2004; Malayeri et al., 2011]. Порог чувствительности видов р. *Betula* к накоплению в растении и окружающей среде токсичных веществ не установлен, как и факторы, определяющие жизнеспособность генеративных органов. Показано, что при повышении уровня углекислого газа у *Betula papyrifera* Marsh. увеличивается продукция пыльцы и женских сережек, вес и прорастание семян, тогда как повышение уровня озона, напротив, уменьшает эти показатели, а при совместном действии газов достоверно уменьшается только вес семян [Darbah et al., 2008].

Пыльца березы повислой, в целом, характеризуется высокой жизнеспособностью [Мауринь, Кауров, 1956; Фролова, 1957; Vaclav, 1958; Pasonen et al., 2002]. В условиях города снижение фертильности пыльцы наблюдалось при усилении степени антропогенной нагрузки, а вдоль оживленных автомагистралей увеличивалось и количество деформированных пыльцевых зерен [Хлебова, Ерещенко, 2012]. Настоящие исследования показали снижение жизнеспособности пыльцы в пригородных березняках, подверженных многолетнему комплексному городскому загрязнению (по основному направлению ветрового переноса техногенных аэрозолей), несмотря на то что допустимые уровни поллютантов в ассимиляционной массе не превышены [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989].

В условиях техногенного загрязнения у деревьев наблюдаются глубокие структурные и физиолого-биохимические изменения различных тканей и органов, нарушается поглощение и метаболизм химических элементов, уменьшается площадь листовой пластинки, снижается уровень хлорофиллов, изменяется кислотность коры и ветвей, снижается линейный и радиальный прирост, сокращаются сроки вегетации [Солнцева, Глазунова, 2010; Grover et al., 2016; Скрипальщикова и др., 2017]. Вследствие отложения пыли и свинца на поверхности листьев и проникновения их в ткани растений могут возникать эффекты торможения роста и нарушения метаболизма [Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989]. Показано также [Яковлева, 2018], что высокие концентрации алюминия непосредственно или косвенно влияют на процессы жиз-

недеятельности растений: водный режим, метаболизм азота, минеральное питание, фотосинтез, окислительно-восстановительные реакции. Очевидно, эти изменения приводят и к нарушениям жизнеспособности генеративных структур. Действие поллютантов на генеративные процессы проявляется в нарушениях начальных этапов формирования ПЗ и зародышевого мешка, обеспечения их питательными веществами, в снижении прорастания пыльцы, а также в структурных изменениях генеративных органов, дефектах эмбриогенеза [Wolters et al., 1987; Солнцева, Глазунова, 2010]. В пыльце даже устойчивых видов растений в условиях аэропромышленного загрязнения разрушается и становится тоньше экзина, изменяются содержание и спектр белков при электрофорезе [Sousa et al., 2012]. Мы полагаем, что изменения функциональных показателей пыльцы у деревьев, растущих на восточной окраине города, могут быть следствием влияния поллютантов даже при незначительном повышении их содержания в ассимиляционной массе [Скрипальщикова и др., 2017]. Многолетнее ослабление деревьев в результате нарушений метаболизма при повышении уровня техногенных нагрузок определяет снижение жизнеспособности генеративных органов. О нарушении гомеостаза свидетельствует высокий уровень варьирования показателей, достоверные отрицательные (хотя и невысокие) корреляции числа проросших пыльцевых зерен с содержанием токсикантов в листе. Снижение жизнеспособности пыльцы березы повислой, очевидно, может объяснить ухудшение качества семян данного вида, отмеченное в пригородных лесах г. Красноярска [Бажина и др., 2018].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жизнеспособность пыльцы березы повислой, растущей в пригородных фитоценозах г. Красноярска, варьирует в зависимости от уровня техногенных нагрузок (расположение и удаленность биоценозов относительно города). Несмотря на толерантность вида, мужские генеративные органы березы, как и репродуктивная система в целом, оказываются чувствительными к воздействию промышленного загрязнения. В северо-восточном направлении (по основному переносу, ПП 1–4) отмечено снижение функциональных харак-

теристик пыльцы (длина пыльцевых трубок – почти в 2 раза по отношению к диаметру тела пыльцевого зерна – 18–20 мкм), что, очевидно, обусловлено увеличением количества и рассеиванием городских техногенных выбросов. Оценка влияния показателей техногенных нагрузок на жизнеспособность пыльцы березы показала отрицательные корреляции ее прорастания с накоплением пыли на листовых пластинках, содержанием алюминия и свинца в ассимиляционной массе. Достоверных зависимостей жизнеспособности пыльцы с содержанием кадмия и фтора не выявлено. Высокая чувствительность мужских генеративных органов растений позволяет использовать при мониторинге загрязнения атмосферы пыльцу не только чувствительных, но и устойчивых видов даже в тех случаях, когда повреждение спорофита еще не началось. Настоящие исследования показали, что функциональные показатели пыльцы березы повислой можно использовать как биоиндикаторы загрязнения при мониторинге среды.

Работа выполнена в рамках выполнения научных тем № FWES-2021-0009 и 0287-2021-0008 государственного задания.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бажина Е. В., Скрипальщикова Л. Н., Барченков А. П. Особенности плодоношения березы повислой в Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2018. № 6. С. 112–120.
- Грант В. Эволюционный процесс. М.: Мир, 1991. 488 с.
- Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2017 году”. Красноярск, Мин-во экологии и рационального природопользования Красноярского края, 2018. 301 с.
- Государственный доклад “О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2021 году”. Красноярск, 2022. 317 с.
- Детри Ж. Атмосфера должна быть чистой: Загрязнители атмосферы и борьба с ними. М.: Прогресс, 1973. 379 с.
- Замятин Б. Н. Род *Betula* – Берёза // Деревья и кустарники СССР. Дикорастущие, культивируемые и перспективные для интродукции. Л.: Изд-во АН СССР, 1951. С. 295–296.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 440 с.
- Каледа В. М. Жизнеспособность и размеры пыльцы березы повислой в условиях Западной Сибири // Изв. СО АН СССР. 1979. № 15. Сер. биол. наук. Вып. 3. С. 75–78.
- Куприянова Л. А., Алешина Л. А. Пыльца и споры растений флоры европейской части СССР. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1972. Т. 1. 171 с.
- Курдиани С. З. Из биологии плодоношения древесных пород // Лесн. журн. 1914. Вып. 9–10. С. 1498–1502.
- Летопись природы Государственного природного заповедника “Столбы”. Кн. 71, 2013 год. Красноярск, 2014. С. 18–25, 156–161.
- Ломоносова М. Н., Большаков Н. М., Красноборов И. М., Кашина Л. И., Тупицина Н. Н., Гельтман Д. В., Шемберг М. А. Флора Сибири. В 14 т. Т. 5. Salicaceae – Amaranthaceae/ под ред. д-ра И. М. Красноборова, Л. И. Малышева. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. 312 с.
- Лях В. А., Пересыпкина Т. Н., Дубовая Е. В., Фендюк Л. М. Влияние тяжелых металлов на жизнеспособность пыльцы некоторых древесных // Науч. вестн. СумДУ. Сер.: Технические науки. 2004. № 2 (61). С. 177–179.
- Мауринь А. М., Кауров И. А. Сравнение методов определения жизнеспособности пыльцы древесных растений // Ботан. журн. 1956. Т. 41, № 1. С. 81–84.
- Методические указания по ионометрическому определению содержания фтора в растительной продукции, кормах и комбикормах (утв. зам. министра сельск. хоз-ва и продовольствия РФ 14.04.1995). М.: ЦИНАО, 1995. 10 с.
- Некрасова Т. П. Пыльца и пыльцевой режим хвойных. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1983. 169 с.
- Николаевская Т. С., Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф., Лебедева О. Н. Изучение пыльцы у аборигенных и интродуцированных в условиях Карелии представителей рода *Betula* L. // Тр. Карел. науч. центра РАН. 2009. № 4. С. 90–95.
- Паушева З. П. Практикум по цитологии растений. М.: Колос, 1980. 304 с.
- ПНД Ф 16.1:2.3.11-98 “Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой”. М.: Госкомитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1998. 31 с.
- Сергеев Г. И. Островные лесостепи и подтайга Приенисейской Сибири. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1971. 263 с.
- Скрипальщикова Л. Н., Пономарева Т. В., Бажина Е. В., Барченков А. П., Белянин А. В. Техногенные нагрузки на березняки Красноярской лесостепи // Сиб. лесн. журн. 2017. № 6. С. 130–135.
- Смирнова Н. Г. Рентгенографическое изучение семян лиственных растений. М.: Наука, 1978. 243 с.
- Солнцева М. П., Глазунова К. П. Влияние промышленного и транспортного загрязнения среды на репродукцию семенных растений // Журн. общ. биологии. 2010. Т. 71, № 2. С. 163–175.
- Чередникова Ю. С., Молокова Н. И., Перевозникова В. Д. Особенности типологической структуры лесов зеленой зоны г. Красноярска // Ботанические исследования в Сибири. Красноярск: Ин-т леса СО РАН, 1999. Вып. 7. С. 176–180.
- Фролова Г. Д. Вопросы биологии цветения некоторых берез // Ботан. журн. 1957. Т. 4, № 6. С. 885–889.
- Хлебцова Л. П., Ерещенко О. В. Качество пыльцы березы повислой *Betula pendula* Roth. в условиях Барнаула // Изв. Алт. гос. ун-та. 2012. № 3-1 (75). С. 89–92.
- Яковлева О. В. Фитотоксичность ионов алюминия // Тр. по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2018. Т. 179, № 3. С. 315–331. doi: org/10.30901/2227-8834-2018-3-315-331
- Bobbink R. Impacts of tropospheric ozone on airborne nitrogenous pollutants on natural and semi-natural ecosystems: a commentary // New Phytologist. 1998. Vol. 139. P. 11–23.
- Darbah J., Kubiske M. E., Nelson N., Oksanen E., Vapaavuori E., David F., Karnosky D. F. Effects of decad-

- al exposure to interacting elevated CO<sub>2</sub> and/or O<sub>3</sub> on paper birch (*Betula papyrifera*) reproduction // Environ. Pollut. 2008. Vol. 155. P. 446–452.
- Emberlin J., Detani M., Gehrig R., Jaeger S., Noland N., and Ratio-Letimaki A. Response in the start of the *Betula* (Birch) pollen seasons to recent changes in spring temperature across Europe // Int. J. Biometeorol. 2007. Vol. 51, N 3. P. 159–170.
- Gorden J., Millington W., Bailey J. UK regional variations in *Betula* pollen (1993–1997) // Aerobiologia. 2000. Vol. 16, N 2. P. 227–232.
- Gottardini E., Cristofolini F., Paoletti E., Lazzeri P., Pepponi G. Pollen viability for air pollution bio-monitoring // J. Atmos. Chem. 2004. Vol. 49. P. 149.
- Grover A., Twell D., Schleiff E. Pollen as a target of environmental changes // Plant Reprod. 2016. Vol. 29. P. 1–2. doi: 10.1007/s00497-016-0285-7
- Hak O., Russel J. N. Environmental effects on Yellow-cedar pollen Quality // FGC Extension Note. 2004. 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 // Environ. Pollut. 1977. Vol. 12. P. 1–5.
- Koski V. Embryonic lethals of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* // Commun. Inst. For. Fennica. 1971. Vol. 75, N 3. P. 1–10.
- Malayeri B. E., Noori M., Jafari M. Using the Pollen Viability and Morphology for Fluoride Pollution Biomonitoring // Biol. Trace Elem. Res. 2011. Vol. 147. N 1–3. P. 315–319. doi: 10.1007/s12011-011-9290-8
- Pasonen H.-L., Pulkkinen P., Kärkkäinen K. Genotype-environment interactions in pollen competitive ability in an anemophilous tree *Betula pendula* Roth // Theor. Appl. Genet. 2002. Vol. 105. P. 465–473.
- Sarvas R. On the flowering of birch and quality of seed crop // Commun. Inst. Forest Fenn. 1952. Vol. 40, N 7. P. 1–37.
- Sousa R., Duque L., Duarte A. J., Gomes C. R., Ribero H., Cruz A., Esteves da Silva J. C., Abreu I. In vitro exposure of *Acer negundo* pollen to atmospheric levels of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>: effects on allergenicity and germination // Environ. Sci. Technol. 2012. Vol. 46. P. 2406–2412.
- Vaclav E. Collection germination and preservation of birch pollen *Betula verrucosa* Ehrh // Sbor. Ceskosl. Akad. Zemedel. Ved. Sborn. Lesnictvi. 1958. N 11. C. 939–970. (in Czech with English abstracts).
- Wolters J. H., Martens M. Effect of air pollution on pollen // Bot. Rev. 1987. Vol. 63, N 3. P. 372–414.

## ***Betula pendula* pollen viability in suburban biocenosis with different man-made load**

E. V. BAZHINA<sup>1, 2</sup>, L. N. SKRIPAL'SHCHIKOVA<sup>1</sup>, A. S. SHUSHPANOV<sup>1, 3, 4</sup>

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

<sup>2</sup>Siberian Federal University  
660041, Krasnoyarsk, Svobodny av., 79

<sup>3</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology  
660037, Krasnoyarsk, Krasnoyarsky Rabochy av., 31

<sup>4</sup>Tomsk State University  
634050, Tomsk, Lenina str., 36

*Betula pendula* Roth. is tolerant to technogenic air pollutants. However, the viability of pollen decreases under stress conditions, as well as under air pollution. The researches were conducted in Middle Siberia on eight plots of motley birches near industrial city of Krasnoyarsk. In each plot on west side of 15–20 trees, male twigs were cut at pollination time. Pollen was extracted from the male generative organs for size and viability (potential, by starch test, and realized, by *in vitro* germination) determination. The results were analyzed by statistical methods. The researches have revealed reduction of pollen viability under technogenic pollution and reliable differences in pollen grain diameters under different growing conditions, whereas deformed pollen grain were not revealed. The variability of pollen grains in diameter in the biocenosis did not exceed 9.3–9.9 %. Maximum number of sprouted pollen grains observed under background conditions, and minimum at the eastern border of city in the main direction of the transfer of technogenic aerosols. The length of pollen tubes in trees growing under these conditions decreased by more than twice in comparison to the critical value (namely, pollen grain diameter of 18–20 µm). Regression analysis has shown correlations between pollen germination and accumulation of dust on foliage, as well as of lead and aluminum content in the foliage ( $r = -0.1-0.3$ ,  $p \geq 0.05$ ). In spite of tolerance of the species to air pollution, *Betula pendula* male generative structures are sensitive to the contamination. Pollen viability can be used as a bioindicator of environmental pollution at monitoring.

**Key words:** *Betula pendula* Roth., technogenic pollution, pollen, viability, starch content.