

КАЧЕСТВО ПЫЛЬЦЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ВЫБРОСОВ АО «КАРАБАШМЕДЬ»

С.Г. Махнева^{1,2}, С.Л. Менщиков¹

¹ФГБУН Ботанический сад УрО РАН, 620130, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202 а

²ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», Россия, 620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, д. 11

makhniovasg@mail.ru

Приведены результаты изучения состояния зрелой пыльцы древостоев сосны обыкновенной в зоне действия дымовых выбросов предприятия АО «Карабашмедь» в связи с повышением уровня техногенной нагрузки. Показано, что состояние сосновых древостоев зависит от уровня техногенного загрязнения, определенного по степени накопления аэрополлютантов в снежном покрове. Выявлены симптомы хронического и острого повреждения ассимиляционного аппарата и нарушение генеративной сферы сосны на удалении 4 и 8 км от источника выбросов в юго-восточном направлении. Обнаружено значительное сходство жизненного состояния древостоев сосны из зоны слабого уровня аэрозольного загрязнения и фоновых условий, однако в пуле зрелой пыльцы древостоя из зоны слабого уровня загрязнения многократно выше частота встречаемости мелкой и дегенерированной пыльцы, тогда как в древостое в фоновых условиях выше частота встречаемости пыльцевых зерен с аномалиями воздушных мешков. Определена высокая чувствительность мужской генеративной системы к техногенному загрязнению (накопленному почвенному, аэрозольному, газовому), указано на возможность его биоиндикации в отсутствие симптомов повреждения ассимиляционного аппарата. Приведены данные, подтверждающие фиксацию нарушений в развитии мужского гаметофита в зонах техногенного загрязнения уже на ранних стадиях развития микроспор, обнаруженных по высокой частоте встречаемости мелкой недоразвитой пыльцы. Установлено соответствие большей части деревьев сосны, произрастающих на грунте мелкокаменисто-песчаного состава, категориям ослабленных и усыхающих, что позволяет признать условия насыпного грунта крайне неблагоприятными для ее роста и развития. Сделан вывод о негативном воздействии дымовых выбросов АО «Карабашмедь» на состояние сосновых насаждений и мужской генеративной системы сосны даже на значительном расстоянии от источника выбросов.

Ключевые слова: пыльцевое зерно, мужской гаметофит, техногенное загрязнение, биоиндикация

Ссылка для цитирования: Махнева С.Г., Менщиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 32–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) (далее — сосна), вследствие широкой экологической амплитуды, способна произрастать в разнообразных условиях окружающей среды. Сосну относят к ранним сукцессионным видам за ее способность осваивать гари, отвалы и скальные грунты. Однако репродуктивные возможности сосны в экстремальных для вида условиях ограничены, что обусловлено высокой уязвимостью генеративной системы к действию неблагоприятных факторов. Многими исследованиями показано негативное воздействие природных (климатических и метеорологических) факторов на репродукцию сосны [1–5]. Техногенное загрязнение также способно влиять на качественные и количественные параметры семян и пыльцы сосны [6–9]. Совместное влияние атмосферного техногенного загрязнения и неблагоприятного почвенного питания на развитие генеративной системы сосны мало изучено. Между тем лесные культуры, созданные в 1970–1980-х гг. на техногенно загрязненных территориях и рекультивированных землях, находятся под воздействием указанных факторов.

Экосистемы окрестностей г. Карабаша неоднократно составляли объект научных исследований [10–16].

Во-первых, научный интерес обусловлен необходимостью исследования биологических последствий более чем столетнего воздействия токсичных дымовых выбросов на биоту и здоровье человека, а также факторов, приведших к уничтожению природных объектов, утрате их количественных и качественных параметров.

Во-вторых — необходимостью поиска путей разрешения тяжелейшего экологического кризиса в условиях продолжающегося техногенного загрязнения.

Основным источником техногенного загрязнения окрестностей г. Карабаша являются предприятия по производству меди. Медеплавильное производство возникло на территории нынешнего г. Карабаша в 1837 г., когда первый медеплавильный завод выплавил первые тонны меди. Нынешнее предприятие — АО «Карабашмедь» под управлением Русской медной компании — было пущено в 1910 г. Используемые на заводе технологии и оборудование, передовые на момент

открытия предприятия, за многие десятилетия работы принципиально не изменялись и не соответствовали требованиям экологической безопасности и условиям промсанитарии. На 1 т черновой меди, выплавленной на предприятии до 1974 г., приходилось более 7 т выбросов в атмосферу; в настоящее время — 3,75 т [17]. До 1957 г. комбинат работал без хвостохранилищ, все отходы сбрасывал в пойму р. Сак-Элга, что привело к значительному загрязнению водоемов района исследований [18]. В период с максимальным объемом выбросов (1965–1988 гг.) в окружающую среду ежегодно поступало до 164 тыс. т сернистого газа. Так, в 1986 г. в атмосферу было выброшено 160 тыс. т SO_2 , а также более 13 тыс. т пыли, в состав которой входили соединения меди (1,04 тыс. т), цинка (325 т), мышьяка (22 т), кадмия (1,04 т) [18]. В почвах в окрестностях предприятия, было зафиксировано превышение содержания соединений металлов (меди, цинка, свинца, мышьяка, кадмия, ртути) в 3–25 раз, по сравнению с контрольными образцами почв [15, 18].

На основании результатов государственной экологической экспертизы 1996 г. селитебные и прилегающие территории г. Карабаша были признаны зонами экологического бедствия и чрезвычайной экологической ситуации. С начала XXI в. на предприятии в несколько этапов была проведена модернизация производства, в задачи которой входило улучшение условий труда, снижение техногенного воздействия предприятия на окружающую среду [18, 19]. Благодаря реконструкции объем выбросов был существенно снижен. Однако более чем столетний период воздействия предприятия на природную среду привел к деградации природных экосистем и уничтожению растительности и почвенного покрова на ближайших к предприятию территориях.

Естественное восстановление растительного покрова на подобных территориях затруднено, поскольку почвенный покров пересыщен аэро-поллютантами либо деградировал. Препятствует процессам лесовосстановления также отсутствие источников семенного материала вследствие смещения границ природных экосистем на многие километры.

Со второй половины XX в. в окрестностях г. Карабаша начали проводить мероприятия по рекультивации и восстановлению лесных экосистем. В настоящее время многие культуры перешли в репродуктивную стадию онтогенеза. Способны ли они стать источником пыльцы и семенного материала и, следовательно, основой для дальнейшего лесовосстановления, в том числе на загрязненных и нарушенных землях? Ответ на этот вопрос может дать изучение репродукции древесных лесообразующих видов растений.

Цель работы

Целью работы — изучение состояния мужской генеративной системы древостоев сосны обыкновенной, произрастающих на зональных почвах и насыпном грунте в условиях разного уровня техногенного загрязнения атмосферы АО «Карабашмедь». Этап формирования пыльцы является критическим звеном репродукции сосны, поскольку она возобновляется только семенным путем, а опыление и оплодотворение семян сосны являются обязательными условиями формирования семян.

Объекты и методы исследования

Карабашский медеплавильный завод расположен в Саймоновской долине — естественной депрессии, окруженной цепью гор и возвышенностей, относительная высота которых не превышает 200...250 м. Исследования проведены на территориях Кыштымского и Миасского лесничеств, соответственно, Карабашского и Новоандреевского участков лесничеств. Район г. Карабаша отнесен к лесной зоне Уральской горно-лесной лесорастительной области [20]. Климат континентальный. Среднегодовая температура января составляет $-16,3^\circ$, июля — $+15,7^\circ$. Снег выпадает в октябре–ноябре и сохраняется до апреля [21]. Преобладают западные, юго- и северо-западные направления ветров. Почвы разнообразны: бурые горно-лесные, бурые лесные, оподзоленные глееватые, серые горно-лесные, горно-подзолистые типы. Характерна сильная каменистость и невысокая мощность почвенного профиля. Лесистость района исследований составляет 79,7 и 71,4 % на территориях соответственно Кыштымского и Миасского лесничеств [21]. Лесной фонд представлен преимущественно защитными лесами. Высокопроизводительные насаждения (Ia, I и II классов бонитета) составляют 51 % площади, покрытой лесной растительностью, что свидетельствует о благоприятных условиях для произрастания основных лесообразующих пород на территории лесничеств [21].

Объектами исследования были культуры сосны обыкновенной 3-го класса возраста, произрастающие в окрестностях г. Карабаша на различном расстоянии от него. В насаждениях сосны были заложены пробные площади (ПП). Для исследования репродукции на ПП были отобраны и промаркированы модельные деревья сосны, которые ежегодно формировали мужские и женские шишки. ПП 11-2, ПП 21 и ПП 20 заложены в древостоях сосны, произрастающих на зональных почвах на удалении 8, 13 и 19 км от основного источника техногенного загрязнения в восточном, юго-восточном и южном направлениях от пред-

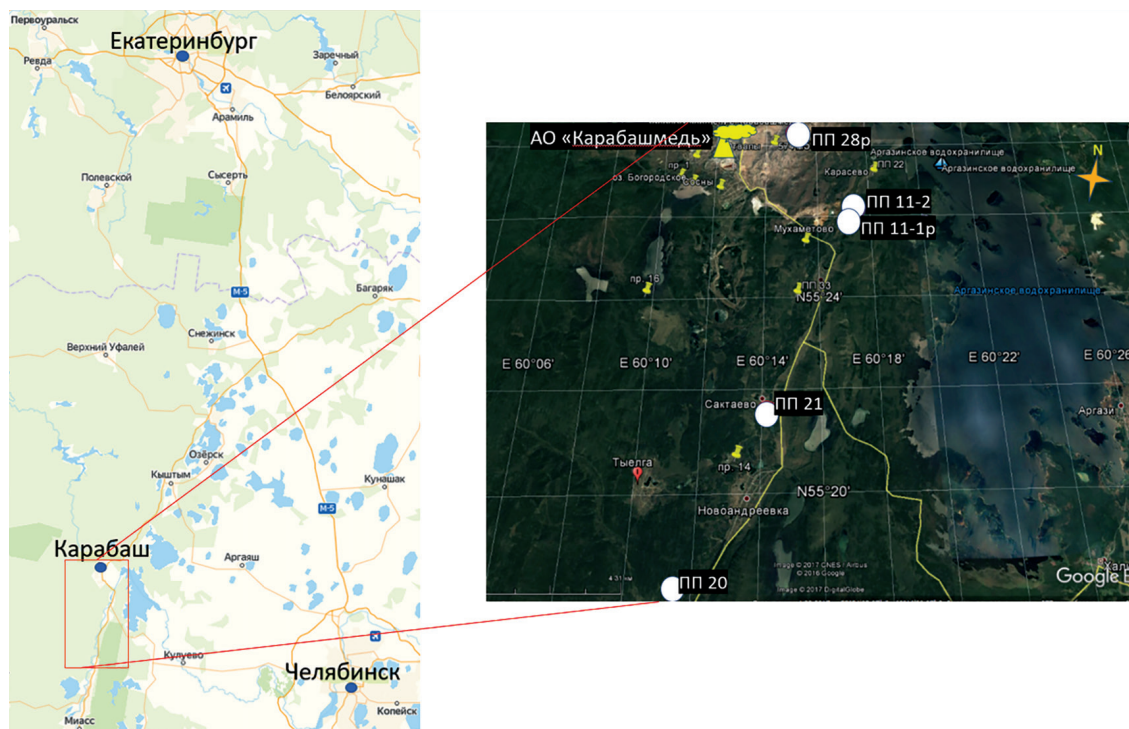


Рис. 1. Район и объекты исследований
Fig. 1. Area and research objects

приятия (рис. 1). ПП 28р и ПП 11-1р заложены в культурах сосны на насыпном грунте мелкокаменисто-песчаного состава на удалении 4 и 8 км в восточном и юго-восточном направлениях.

Методы исследования

Уровень техногенного загрязнения зоны исследования определяли по накоплению загрязняющих веществ в снежном покрове [22]. Наличие большого количества газообразных выбросов в составе дымовых газов, а также выделение газов из твердых отходов производства (отвалы, хвостохранилища) требуют введения дополнительных критериев для оценки реального уровня техногенного воздействия. Поэтому при определении уровня техногенной нагрузки на насаждения учитывали состояние древостоев по комплексу показателей: дефолиации крон, сроку жизни хвои, ее длине, наличию хлорозов и некрозов, наличию и степени разложения лесной подстилки [23].

Пыльцу сосны собирали перед пылением отдельно с каждого модельного дерева всех изучаемых древостоев. Зрелую пыльцу отделяли от тканей микростробила просеиванием. До проращивания пыльцу хранили в эксикаторе при температуре 22°, далее — в холодильнике. Качество зрелой пыльцы оценивали по показателям фертильности, характеризующей потенциальную пригодность пыльцевого зерна к опылению и

оплодотворению семяпочки, и жизнеспособности, характеризующей его возможность прорасти, формировать пыльцевую трубку. Фертильность пыльцы определяли по морфологической полноценности пыльцы, содержанию в ней крахмала и липидов. Пыльца с аномалиями была разделена на три крупные группы: 1) с морфологическими нарушениями (мелкая, крупная; с аномалиями воздушных мешков, формы тела, оболочки); 2) цитологическими нарушениями (плазмолизом, пикнозом, хроматолизом и др.); 3) с обоими типами нарушений (дегенерированная). Жизнеспособность пыльцы определяли по ее возможности прорасти на искусственной питательной среде, по длине и параметрам пыльцевой трубки [24, 25]. Пыльцу проращивали в течение трех дней в климат-камере Sanyo MLR-351H при температуре 26° и влажности 60 % в капле дистиллированной воды. Микроскопию пыльцы проводили на микроскопе AxioScore.A1 (Zeiss), с камерой AxioCam MR5, применяя программы обработки изображения AxioVision Rel 4.8. Для статистической обработки данных использовали методы дескриптивной и многомерной статистики.

Результаты и обсуждение

Характеристика жизненного состояния исследуемых древостоев представлена в табл. 1. Состояние 82 и 96 % деревьев на ПП 21 и ПП 20 было оценено нами как фоновое (деревья не имели признаков ощутимых повреждений). На ПП 11-2,

Т а б л и ц а 1

Локализация и жизненное состояние исследуемых древостоев

Localization and life state of the studied stands

| Пробная площадь | Направление от предприятия | Возраст, лет | Расстояние от источника, км | Почвенные условия | Дефолиация, % | Срок жизни хвои, лет |
|-----------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|-------------------|---------------|----------------------|
| ПП 28р | В. | 40 | 4 | Насыпной грунт | 40...95 | 1...3 |
| ПП 11-1р | Ю.-в. | ~50 | 8 | То же | 10...80 | 1...4 |
| ПП 11-2 | «←→» | ~50 | 8 | Зональные почвы | 5...60 | 2...4 |
| ПП 21 | «←→» | 40 | 13 | То же | 5...25 | 3...4 |
| ПП 20 | Ю. | 40 | 19 | «←→» | 5...25 | 3...4 |



a



б

Рис. 2. Сосновые древостои на ПП 28р (*a*) и ПП 11-1р (*б*)
Fig. 2. Pine stands on PP 28r (*a*) and PP 11-1r (*б*)

на удалении 8 км от источника, 59 % деревьев не имели признаков повреждения кроны, доля ослабленных составляла 22 %, сильно ослабленных и усыхающих – соответственно 15 и 4 %.

Более 65 % живых деревьев сосны на ПП 28р были отнесены нами к 4-му классу жизненного состояния (усыхающие). У части деревьев степень дефолиации достигала 90 %, живая хвоя отмечена только на концах ветвей (хвоя первого года жизни) (рис. 2, *a*). У отдельных деревьев (9 %) дефолиация не превышает 40 %, однако изменена форма кроны, сильно развиты ветви нижней части кроны, расположенные очень близко к

почве, на которых могут формироваться мужские шишки. Состояние 20 % деревьев на ПП 11-1р соответствует категории фоновых; 52 % деревьев были охарактеризованы как ослабленные, высока также доля сильно ослабленных (20 %) и усыхающих (8 %) деревьев (рис. 2, *б*). Почвенный покров и травянистая растительность в обоих древостоях практически отсутствуют.

ПП 11-1р находится на удалении ~100 м от ПП 11-2. Обе площади характеризуются равными уровнями атмосферного техногенного загрязнения, но разными условиями корневого питания. Значительные различия, выявленные в состоянии

Т а б л и ц а 2

Характеристика техногенного загрязнения снежного покрова района исследований

Technogenic pollution characteristics of the snow cover of the study area

| Точка отбора проб снега; пробная площадь | Расстояние от источника загрязнения, км | Содержание, г/м ² | | | pH |
|--|---|------------------------------|---------------|-------|------|
| | | Взвешенные вещества | Сухой остаток | Сумма | |
| ТОПС 18 | 1,2 | 22,83 | 2,63 | 25,46 | 6,16 |
| ТОПС 17 | 2,7 | 17,05 | 2,65 | 19,70 | 7,00 |
| ПП 28 | 4,0 | 4,37 | 7,47 | 11,85 | 5,82 |
| ПП 11 | 7,6 | 1,52 | 2,76 | 4,28 | 5,96 |
| ПП 21 | 12,8 | 2,03 | 2,22 | 4,25 | 6,15 |
| ПП 20 | 18,7 | 1,52 | 0,49 | 2,02 | 6,29 |

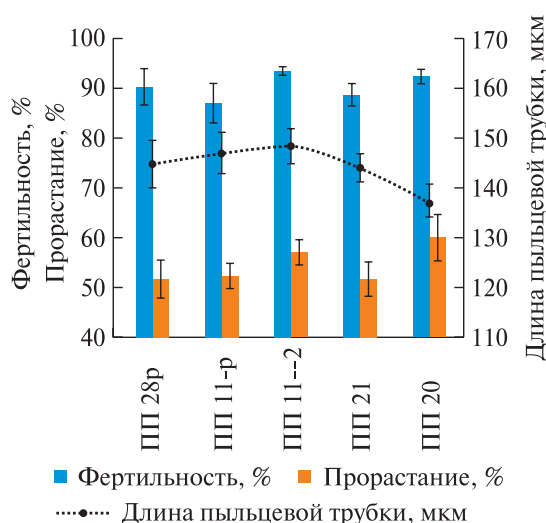


Рис. 3. Фертильность и жизнеспособность пыльцы
Fig. 3. Fertility and pollen viability

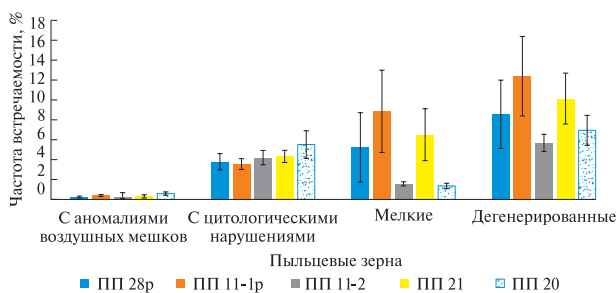


Рис. 4. Частота встречаемости пыльцевых зерен с разными типами аномалий, %
Fig. 4. Incidence degree of pollen grains with different types of anomalies, %

исследуемых насаждений и ассимиляционного аппарата сосны (см. табл. 1), свидетельствуют о крайне неблагоприятном действии условий насыпного грунта на рост и развитие деревьев сосны на ПП 11-1р и ПП 28р. В литературе отмечены случаи усыхания древостоев в неблагоприятных почвенных условиях [26].

Уровень техногенного загрязнения определяли по содержанию загрязняющих веществ в снежном покрове в точках отбора проб снега (ТОПС) и на ПП (табл. 2). В соответствии с комплексом пока-

зателей атмосферного техногенного загрязнения и состоянием древесной растительности были выделены следующие зоны:

- очень высокого уровня техногенной нагрузки — ТОПС 18 и 17, находящиеся на удалении соответственно 1,2 и 2,7 км от предприятия в восточном и юго-западном направлениях, где отсутствует древесная растительность;
- сильного — ПП 28, находящаяся на удалении 4 км;
- среднего — ПП 11, 8 км;
- слабого — ПП 21, 13 км;
- фонового — ПП 20, 19 км от источника.

На малом расстоянии от завода основным загрязнителем атмосферного воздуха определена фракция нерастворимых в воде веществ (взвешенных веществ), тогда как на удалении 4, 8 и 13 км — мелкодисперсная фракция растворимых в воде веществ (сухой остаток) (см. табл. 2). Мелкодисперсная фракция дымовых выбросов может переноситься на значительные расстояния в атмосфере; вещества затем оседают и накапливаются во всех компонентах окружающей среды в виде подвижных водорастворимых форм, которые обладают высокой биологической активностью [27].

Рассмотрим результаты изучения качества пыльцы сосны исследуемых древостоев. Значения показателя фертильности пыльцы сосны всех древостоев варьируют в диапазоне 87,0...93,7 % (рис. 3); достоверных различий между ПП по данному показателю не установлено.

Пыльца сосны разных древостоев при близких значениях показателя фертильности характеризуется своеобразием спектров аномалий. Так, в фоновом древостое основной вклад в стерильность пыльцы вносят пыльцевые зерна типичного для зрелой пыльцы размера с цитологическими нарушениями (пикноз, плазмолиз и др.), на их долю приходится 73 % пыльцевых зерен с аномалиями (рис. 4). 18 % аномальной пыльцы фонового древостоя отнесено к категории мелкой, 8 % пыльцы имело нарушения строения, развития и/или числа воздушных мешков. Пыльца с цитологическими нарушениями достаточно редко выявляется на пер-

вом этапе гаметогенеза до начала проталлиальных делений [25]. Таким образом, микроспоры сосны фонового древостоя на ранних стадиях развития имеют высокую жизнеспособность, увеличиваются в размерах, формируют полноценные воздушные мешки, т. е. благополучно проходят первые стадии микрогаметогенеза. Признаки дегенерации цитоплазмы и ядер таких пыльцевых зерен проявляются позднее, на стадиях проталлиальных делений. Аналогичный спектр аномалий был выявлен для древостоя ПП 11-2 (68, 26 и 7 % соответственно). Для фонового древостоя отметим относительно более высокую частоту встречаемости пыльцы с аномалиями воздушных мешков, которая превышает аналогичный показатель для других древостоев в 1,4–2,6 раза (см. рис. 4). Согласно литературным данным, причинами аномалий в строении оболочек пыльцевых зерен и воздушных мешков (их числа и размеров) могут быть как природные, так и антропогенные факторы [28].

Для других древостоев из зон техногенного загрязнения спектр аномалий пыльцы имеет принципиально иную структуру. Основной вклад в стерильность вносит мелкая недоразвитая пыльца (см. рис. 4) — на ее долю приходится от 55 до 68 %; 28...41 % приходится на пыльцу с цитологическими нарушениями; 3...4 % — на пыльцу с аномалиями воздушных мешков. Таким образом, количество мелкой недоразвитой пыльцы в зонах техногенного загрязнения выше в 1,2–6,5 раза, чем в фоновом древостое. Мелкая пыльца — это пыльца, остановившаяся в развитии на стадии микроспор, не способная к росту, формированию полноценных воздушных мешков, проталлиальным делениям и в целом к формированию мужского гаметофита. Частота мелкой пыльцы в пуле зрелой пыльцы отражает частоту ранней реализации нарушений в мужской генеративной системе.

Для определения функциональной полноценности пыльцу проращивали на питательной среде. На третий день опыта пыльца сосны фонового древостоя характеризовалась более высокими значениями показателя прорастания (см. рис. 3), но формировала пыльцевые трубки пыльцы несколько короче, по сравнению с пыльцой из зон техногенного загрязнения. Однако пыльцевые трубки пыльцы сосны загрязненных территорий характеризовались достоверно более высокой частотой вздутий и ветвлений — признаков, характеризующих качество самих пыльцевых трубок пыльцы и в целом пыльцы (табл. 3). Частота встречаемости пыльцевых трубок пыльцы с аномалиями развития в зонах техногенного загрязнения выше на 9...38 %, чем в фоновом древостое.

Содержание запасных веществ является еще одной важной физиологической характеристикой зрелого пыльцевого зерна сосны. По содержанию

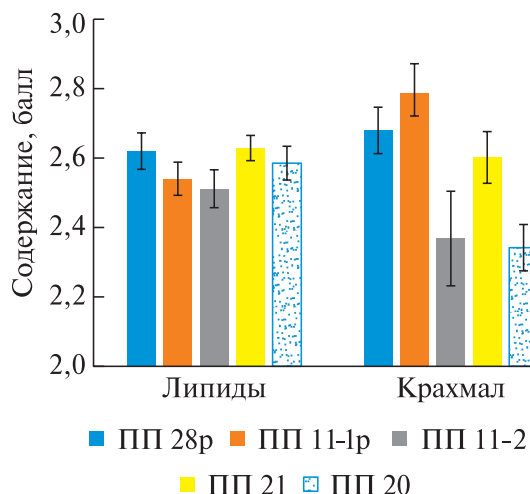


Рис. 5. Содержание липидов и крахмала в пыльце (средний балл)

Fig. 5. The content of lipids and starch in pollen (average score)

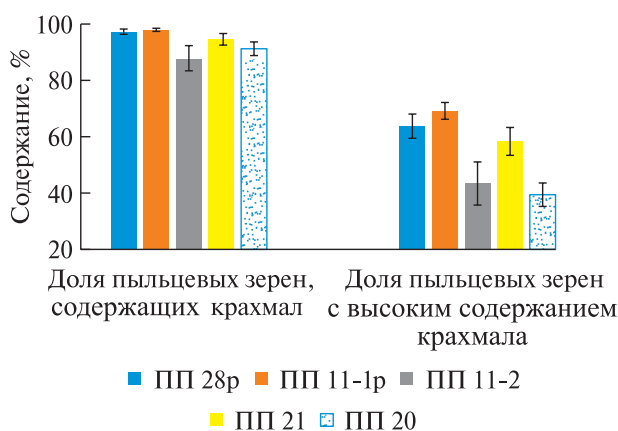


Рис. 6. Пыльцевые зерна с крахмалом

Fig. 6. Pollen grains with starch

липидов в зрелой пыльце сосны различий между исследуемыми древостоями не выявлено (рис. 5). Содержание крахмала в пыльце фонового древостоя достоверно ниже, чем в условиях техногенного загрязнения (см. табл. 3). Эту закономерность отражает как средний уровень содержания крахмала в зрелой пыльце сосны (см. рис. 5), так и доля пыльцевых зерен, имеющих крахмал и особенно имеющих высокий (3–4 балла) уровень накопления крахмала (рис. 6).

Таким образом, пыльца фонового древостоя по сравнению с пыльцой из зон техногенного загрязнения имеет равное с ними среднепопуляционное значение показателя фертильности, более высокое — показателя прорастания при существенно более низком уровне содержания крахмала в пыльце. Пыльца фонового древостоя значительно реже формирует пыльцевые трубки с нарушениями развития, чем пыльца из зон техногенного загрязнения. Относительно высокая

Т а б л и ц а 3

Достоверность различий между древостоями из зон техногенного загрязнения и фоновым древостоем по показателям пыльцы

Differences between stands from technogenic pollution zones and the background stand in terms of pollen indicators

| Показатель | Значения p для t -критерия Стьюдента | | | | Результаты дисперсионного анализа | |
|---|--|------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|------------------|
| | ПП 28р и ПП 20 | ПП 11-1р и ПП 20 | ПП 11-2 и ПП 20 | ПП 21 и ПП 20 | Значения критерия Фишера, F | Вероятность, p |
| Длина пыльцевых трубок пыльцы (среднее), мкм | 0,19 | 0,077 | 0,026 | 0,111 | 1,296 | 0,281 |
| Максимальная длина пыльцевых трубок пыльцы, мкм | 0,086 | 0,042 | 0,058 | 0,268 | 1,567 | 0,194 |
| Частота встречаемости пыльцы со вздутиями пыльцевых трубок, % | 0,16 | 0,043 | 0,022 | 0,358 | 2,440 | 0,056 |
| Содержание крахмала в пыльце (среднее), балл | 0,001 | 0,000 | 0,802 | 0,017 | 5,264 | 0,001 |
| Доля пыльцевых зерен, имеющих крахмал, % | 0,026 | 0,005 | 0,468 | 0,181 | 3,330 | 0,015 |
| Доля пыльцевых зерен, имеющих высокий уровень крахмала, % | 0,001 | 0,000 | 0,621 | 0,007 | 6,706 | 0,000 |
| <i>Примечание.</i> Жирным шрифтом выделены значения $p \leq 0,05$ | | | | | | |

частота встречаемости пыльцы с аномалиями воздушных мешков в древостое в фоновых условиях свидетельствует об экологическом неблагополучии условий произрастания древостоя, которые не оказывают значимого влияния на ассимиляционный аппарат сосны, но проявляются в нарушениях развития мужского гаметофита.

Корреляционный анализ, проведенный по результатам исследования зрелой пыльцы сосны на трех ПП относительно градиента атмосферного техногенного загрязнения, выявил взаимосвязь между расстоянием от источника аэрополлютантов и длиной пыльцевых трубок пыльцы ($r = -0,358$) (здесь и далее значения r достоверны при $p < 0,05$), а также частотой встречаемости пыльцы, формирующей дефектные пыльцевые трубки ($r = -0,405$). Длина пыльцевых трубок пыльцы, в свою очередь, положительно коррелирует с уровнем накопления крахмала в зрелой пыльце ($r = 0,445$) и частотой встречаемости пыльцы с высоким уровнем накопления крахмала ($r = 0,468$). Таким образом, пыльца сосны всех древостоев с высоким уровнем накопления крахмала к третьему дню опыта формирует более длинные пыльцевые трубки. Пыльцевые трубки пыльцы из зон техногенного загрязнения растут интенсивнее, что может быть обусловлено более высоким содержанием крахмала в пыльце, однако они при этом характеризуются большей частотой аномалий.

Для других показателей пыльцы и ее пыльцевых трубок не найдено достоверно значимых связей с увеличением расстояния от источника аэрополлютантов. Исследования, проведенные

нами ранее в других промышленных центрах Урала [25, 29], и работы [28, 30–32] указывают на наличие определенных закономерностей в реакции мужской генеративной системы на действие техногенного загрязнения. Так, в качестве биоиндикаторов уровня техногенной нагрузки нами ранее были предложены некоторые параметры пыльцы, характеризующие ее фертильность (например, частота встречаемости диад) и жизнеспособность (показатели прорастания и длины пыльцевых трубок пыльцы).

В качестве возможных причин отсутствия подобных закономерностей реакции мужской генеративной системы сосны на разные уровни техногенного загрязнения окружающей среды АО «Карабашмедь» назовем следующие.

Во-первых, дымовые выбросы медеплавильного производства включают в себя газообразную фракцию (в основном SO_2), на долю которой приходится 65...90 % объема выбросов в атмосферу [18]. Концентрации SO_2 в подфакельной зоне предприятия на удалении 1 км от источника в 2000 г. составили до 20 000 мг/м³ [33]. Газовая фракция переносится на далекие расстояния; ее хронические эффекты диагностируют на значительном расстоянии от источника выбросов по состоянию ассимиляционного аппарата растений [10, 23]. Острое воздействие высокой концентрации газов дымовых выбросов АО «Карабашмедь» было выявлено нами на ПП и в других насаждениях в окрестностях города по некрозам хвои и листьев, массовому пожелтению и опадению листьев березы в летний период, массовой гибели генеративных и вегетативных почек сосны.

Во-вторых, окрестности г. Карабаша относят к территориям с огромным накопленным экологическим ущербом. Концентрация ртути в почве превышает предельно допустимые концентрации в 2 раза, мышьяка — в 279 раз, меди — в 368 раз, свинца — в 300 раз [34], кадмия — в 5,2 раза, цинка — 3,8 раза [35]. Расчетная пылевая нагрузка на площади 30 км² в 1970-е гг. могла достигать 2,6 т/км²·сут [36], при этом фоновый уровень поступления пыли для района исследований, рассчитанный по результатам изучения снежного покрова в 2000 г., составлял 10...15 кг/км²·сут [12]. Колоссальный уровень техногенного загрязнения почв района исследований, сформированный за многие десятилетия работы предприятия, и газовое загрязнение им атмосферы обуславливают аккумуляцию загрязняющих веществ в тканях растений и повреждение вегетативной и генеративной систем растений древостоев, в том числе удаленных от источника выбросов.

Дискриминантный анализ позволил оценить уровень различий между древостоями сосны по комплексу показателей зрелой пыльцы. Провели сравнение древостоев ПП 11-2, ПП 21 и ПП 20, которые произрастают на зональных почвах, по градиенту аэрозольного атмосферного техногенного загрязнения в юго-восточном и южном направлениях от источника дымовых выбросов. Были выявлены достоверно значимые различия между ними по комплексу показателей пыльцы ($p < 0,05$) (рис. 7).

Основной вклад в дискриминацию древостоев вносят показатели частоты встречаемости пыльцевых трубок пыльцы со вздутиями, содержания запасных веществ (крахмала и липидов в сумме), доли пыльцы с аномалиями воздушных мешков и максимального значения длины пыльцевой трубки пыльцы.

Особый интерес представляют результаты сравнения древостоев ПП 11-1р и ПП 28р, которые произрастают на насыпном грунте в сходных условиях корневого питания, но различаются по уровню атмосферного техногенного загрязнения, а также древостой ПП 11-1р и ПП 11-2, которые произрастают при равных условиях атмосферного загрязнения, но в разных условиях корневого питания. Результаты дискриминантного анализа (рис. 8) указывают на значительное сходство между древостоями ПП 28р и ПП 11-1р ($p = 0,626$), а также на достоверно значимые различия между древостоями ПП 11-1р и ПП 11-2 ($p < 0,05$) по параметрам мужской генеративной системы.

Основной вклад в дискриминацию древостоев вносят показатели, характеризующие накопление запасных веществ в зрелой пыльце, долю пыльцы с аномалиями воздушных мешков в спектре аномалий, частоты встречаемости дегенерированной

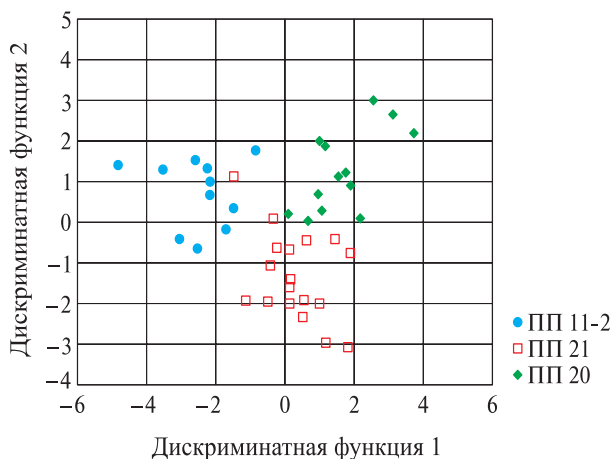


Рис. 7. Результаты дискриминантного анализа древостоев пробных площадей по градиенту атмосферного техногенного загрязнения

Fig. 7. The results of the discriminant analysis of the stands on the trial plots along the gradient of atmospheric technogenic pollution

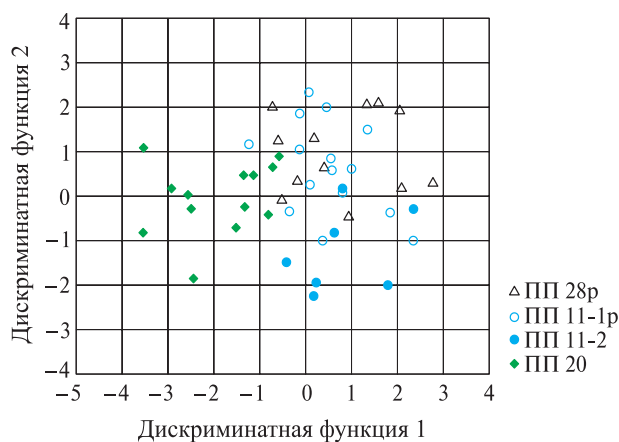


Рис. 8. Результаты дискриминантного анализа древостоев пробных площадей в разных условиях корневого питания

Fig. 8. Results of discriminant analysis of stands on trial plots under different conditions of root nutrition

пыльцы и частоты встречаемости пыльцевых трубок пыльцы со вздутиями. Приведенные данные свидетельствуют о значительном влиянии как атмосферного загрязнения, так и условий корневого питания на формирование мужской генеративной системы сосны, на ее качественные показатели.

Выводы

В окрестностях г. Карабаша вследствие многолетнего действия дымовых выбросов АО «Карабашмедь» сформирована обширная зона техногенного загрязнения. Состояние растительного покрова в целом находится в соответствии с выделенными нами на основании анализа состава снеговой воды зонами техногенного загрязнения. В подфакельной зоне предприятия растительный покров отсутствует. Сосновые древостой отсут-

ствуют на удалении до 3,5 км от источника дымовых выбросов. На удалении 8 км в юго-восточном направлении сформирована зона хронического техногенного загрязнения, которая характеризуется наличием древесной растительности, в том числе сосновых древостоев, имеющих симптомы хронического и острого повреждения ассимиляционного аппарата и нарушения генеративной сферы. Отметим значительное сходство в жизненном состоянии древостоев на удалении 13 км (слабый уровень загрязнения) и 19 км (фоновый уровень) от источника, при этом различия в содержании загрязняющих веществ в снежном покрове достигают от 1,3 до 4,5 раза (в зависимости от фракции). В пуле зрелой пыльцы древостоя на удалении 13 км частота встречаемости мелкой и дегенерированной пыльцы выше в 4,8 и 1,5 раза соответственно, чем в фоновых условиях.

На удалении 19 км от предприятия степень загрязнения снежного покрова аэрополлютантами ниже в 15 раз, чем на ближайших к источнику выбросов территориях. Однако состояние мужской генеративной системы сосны в условиях фонового уровня загрязнения атмосферы аэрозолями указывает на экологическое неблагополучие среды обитания, обусловленное, возможно, хроническим воздействием газовой фракции дымовых выбросов и почвенного загрязнения, сформированного в период интенсивных выбросов предприятия на протяжении XX века.

Зрелая пыльца сосны из зон техногенного загрязнения характеризуется равными с фоновыми значениями показателя фертильности, относительно низкими — показателя прорастания, достоверно более высокими — уровня накопления крахмала и частоты встречаемости пыльцевых трубок с нарушениями развития. Нарушения в развитии мужского гаметофита реализуются уже на ранних стадиях развития микроспор и обнаруживают себя по высокой частоте встречаемости мелкой недоразвитой пыльцы. Результаты исследования указывают на высокую чувствительность мужской генеративной системы сосны к техногенному загрязнению (накопленному почвенному, аэрозольному, газовому) и возможность его биоиндикации в отсутствие симптомов повреждения ассимиляционного аппарата.

Большая часть деревьев в древостоях сосны, произрастающих на грунте мелкокаменисто-песчаного состава, соответствует категориям ослабленных и усыхающих, что позволяет признать условия насыпного грунта крайне неблагоприятными для роста и развития сосновых древостоев. Зрелая пыльца сосны данных древостоев характеризуется своеобразием черт, отличающих ее по комплексу признаков от зрелой пыльцы других древостоев.

В целом следует признать, что многолетнее техногенное загрязнение всех компонентов окружающей среды выбросами предприятия АО «Карабашмедь» оказывает негативное воздействие на состояние сосновых насаждений и проявляется токсическими и мутагенными эффектами в мужской генеративной системе даже на значительном расстоянии от источника выбросов.

Работа выполнена в рамках государственного задания Ботанического сада Уральского отделения Российской академии наук.

Список литературы

- [1] Parantainen A., Pulkkinen P. Pollen viability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in different temperature conditions: high levels of variation among and within latitudes // *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 167, no. 1–3, pp. 149–160. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00722-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00722-8)
- [2] Сурсо М.В. Фенология репродуктивных циклов и качество семян хвойных (Pinaceae, Cupressaceae) в северной тайге // *Arctic Environmental Research*. 2017, № 4. С. 355–367.
- [3] Пименов А.В., Седельникова Т.С., Ефремов С.П. Морфология и качество пыльцы сосны обыкновенной в контрастных экотопах Хакасии // *Лесоведение*, 2014, № 1. С. 57–64.
- [4] Свинцова В.С., Кузнецова Н.Ф., Пардаева Е.Ю. Влияние засухи на генеративную сферу и жизнеспособность пыльцы сосны обыкновенной // *Лесоведение*, 2014, № 3. С. 49–57.
- [5] Велисевич С.Н. Качество пыльцы высокогорных популяций *Pinus sibirica* du Tour (Pinaceae) в аридных и гумидных районах Алтая // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Биология*, 2017. Т. 10. № 3. С. 301–311. DOI: 10.17516/1997-1389-0014
- [6] Федорков А.Л. Половая репродукция у сосны обыкновенной при агротехническом загрязнении в условиях Субарктики // *Лесной журнал*, 1992. № 4. С. 60–64.
- [7] Носкова Н.Е., Третьякова И.Н., Носков Е.А. Особенности формирования мужской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях техногенеза // *Хвойные бореальной зоны*, 2006. Т. 23. № 2. С. 211–214.
- [8] Калашник Н.А. Аномалии пыльцы у сосны обыкновенной в различных экологических условиях // *Бюллетень ботанического сада Саратовского государственного университета*, 2012. № 10. С. 46–52.
- [9] Садакова К.А., Колясникова Н.Л. Фертильность пыльцевых зерен и содержание тяжелых металлов в пыльце сосны обыкновенной, произрастающей в местах с разной антропогенной нагрузкой // *Современные проблемы науки и образования*, 2014. № 6. С. 1444.
- [10] Кулагин Ю.З. О газоустойчивости сосны и березы // *Растительность и промышленные загрязнения. Охрана природы на Урале / под ред. С.А. Мамаева*. Свердловск: [б.и.], 1964. С. 115–122.
- [11] Макунина Г.С. Деградация и химические свойства почв Карабашской техногенной аномалии // *Почвоведение*, 2002. № 3. С. 368–376.
- [12] Удачин В.Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Томск, 2012. 48 с.

- [13] Коротеева Е.В., Вейсберг Е.И., Куянцева Н.Б. Оценка состояния лесной ценофлоры в зоне воздействия Карабашского медеплавильного комбината (Южный Урал) // Известия Самарского научного центра Российской академии наук (Лесные ресурсы), 2011. Т. 13. № 1(4). С. 1005–1011.
- [14] Усольцев В.А., Борников А.В., Жанабаева А.С., Воробейчик Е.Л., Колтунова А.И. Продуктивность ассимиляционного аппарата деревьев вблизи медеплавильных заводов Урала // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2011. № 3 (31). С. 67–70.
- [15] Kumar A., Tripti, Maleva M., Kiseleva I., Kumar S.M., Morozova M. Toxic metal(loid)s contamination and potential human health risk assessment in the vicinity of century-old copper smelter, Karabash, Russia // Environ Geochem Health, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00414-3>
- [16] Бачурина А.В., Залесов С.В. Оценка состояния окружающей среды по показателю флуктуирующей асимметрии // Актуальные проблемы лесного комплекса, 2020. № 56. С. 98–103.
- [17] Шнейдмиллер Н.Ф., Мамедов Г.Р. Особенности развития малых городов России в условиях экологического кризиса на примере города Карабаш Челябинской области // Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки, 2018. № 3. С. 183–190. DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [18] Калабин Г.В., Титова А.В., Шаров А.В. Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния // Маркшейдерия и недропользование, 2011. № 3 (53). С. 65–70.
- [19] Запарий В.В., Набойченко С.С. Медная отрасль Урала: Итоги двадцати лет реформ // Экономическая история, 2012. № 4 (19). С. 37–51.
- [20] Колесников Б.П. Леса СССР: Леса Челябинской области. М.: Наука, 1969. Т. 4. 257 с.
- [21] Залесов С.В., Бачурина А.В., Бачурина С.В. Состояние лесных насаждений, подверженных влиянию промышленных поллютантов ЗАО «Карабашмедь», и реакция их компонентов на проведение рубок обновления. Екатеринбург: УГЛТУ, 2017. 277 с. URL: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6620> (дата обращения 03.07.2020).
- [22] Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД52.04.186–89. М., 1991. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200036406> (дата обращения 03.07.2020).
- [23] Меншиков С.Л. Методические аспекты оценки ущерба лесов, поврежденных промышленными выбросами на Среднем Урале // Леса Урала и хозяйство в них, 2001. Вып. 21. С. 243–251.
- [24] Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.
- [25] Махнева С.Г., Бабушкина Л.Г., Зуева Г.В. Состояние мужской генеративной системы сосны обыкновенной при техногенном загрязнении среды. Екатеринбург: УГЛТУ, 2003. 154 с.
- [26] Богуславская Д.М., Завалишин С.И., Галецкая Г.А., Кальченко Л.И. Влияние состояния почв на усыхание сосны обыкновенной в условиях лесосеменной станции Озерского лесничества // Леса Евразии — Большой Алтай: Материалы XV Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 150-летию со дня рождения профессора Г.Н. Высоцкого, Барнаул, 13–20 сентября 2015 г. М.: МГУЛ, 2015. С. 120–122.
- [27] Park M.V., Neigh A.M., Vermeulen J.P. The effect of particle size on the cytotoxicity, inflammation, developmental toxicity and genotoxicity of silver nanoparticles // Biomaterials, 2011, v. 32(36), pp. 9810–9817. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.08.085
- [28] Дзюба О.Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 198 с.
- [29] Makhniova S., Kuzmina N., Menschikov S. Quality of scots pine pollen depending on the aerotechnogenic pollution level with emissions from Reftinskiy GRES power plant // J. of Geoscience and Environment Protection, 2017, v. 5, no. 4, pp. 99–117. DOI: 10.4236/gep.2017.54009
- [30] Бессонова В.П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжелыми металлами // Экология, 1994. № 4. С. 45–50.
- [31] Кочубей О.В. Палиноиндикация качества окружающей среды в местах проведения подземных ядерных взрывов на Европейской территории России. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. С.-Пб., 2015. 21 с.
- [32] Решетова С.А., Сумарокова И.Е. Пыльца растений урбанизированных территорий как биоиндикатор условий техногенного загрязнения (Забайкалье) // Географические исследования, 2019. № 4. С. 15–23. DOI: 10.17223/25421379/13/2
- [33] Udachin V.N., Williamson B.J., Purvis O.W., Spiro B., Dubbin W., Herrington R.J., Mikhailova I. Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia // Sust. Devel., 2003, v. 11, pp. 1–10. DOI:10.1002/sd.211
- [34] Тацкий Ю.Г. Эколого-геохимическая оценка загрязнения окружающей среды в зоне действия Карабашского медеплавильного комбината // Вестник Тюменского государственного университета. Сер. Экология и природопользование, 2012. № 12. С. 90–96.
- [35] Синявский И.В., Князева Т.Г. Тяжелые металлы в системе «почва – растение – человек» в промышленных городах горнолесной зоны Южного Урала // Агропродовольственная политика России, 2016. № 4(52). С. 59–62.
- [36] Линник В.Г., Хорошавин В.Ю., Пологрудова О.А. Дegradaция природных ландшафтов и химическое загрязнение в ближней зоне влияния Карабашского медеплавильного комбината // Вестник Тюменского государственного университета. Сер. Экология и природопользование, 2013. № 4. С. 105–114.

Сведения об авторах

Махнева Светлана Георгиевна — канд. биол. наук, доцент, ст. науч. сотрудник ФГБУН Ботанический сад УрО РАН; доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин ФГАОУ ВО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», makhniovasg@mail.ru

Меншиков Сергей Леонидович — д-р с.-х. наук, зав. лабораторией экологии техногенных растительных сообществ ФГБУН Ботанический сад УрО РАН, m.sergei1951@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.10.2020.

Принята к публикации 02.11.2020.

COMMON PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) POLLEN QUALITY IN JSC «KARABASHMED» EMISSION ZONE

S.G. Makhniova^{1,2}, S.L. Menshchikov¹

¹Botanical Garden of Ural Branch of RAS, 202a, 8 Marta st., 620130, Ekaterinburg, Russia

²Russian State Professional Pedagogical University, 11, Mashinostroiteley st., 620012, Ekaterinburg, Russia

makhniovasg@mail.ru

The study results of Common pine mature pollen state in the smoke emissions from the plant JSC «Karabashmed» in connection with the level of technogenic impact are presented. It is shown that the state of the vegetation cover is in accordance with the level of technogenic pollution, determined by the accumulation degree of air pollutants in the snow cover. It was established that the soil and vegetation were degraded in the flare zone of the plant. There are no pine stands at a distance of less than 3.5 km from the source of smoke emissions. Symptoms of chronic and acute damage to the assimilation apparatus and disturbance of the generative sphere of pine at a distance of 8 km to the southeast were revealed. A significant similarity in the vital state of pine stands at a distance of 13 km (zone of low aerosol pollution) and 19 km (background conditions) from the source was established. At the same time, the frequency of small and degenerated pollen was many times higher in the pool of mature pine pollen in the stand under conditions of a low level of pollution than under background conditions. A high frequency of pollen grains with anomalies of air pockets was detected in the stand under background conditions. The results of the study indicate a high susceptibility of the male generative system to technogenic pollution (accumulated soil, aerosol, gas) and the possibility of its bioindication in the absence of symptoms of damage to the assimilation apparatus. It was shown that disturbances in the development of male gametophyte in the zones of technogenic pollution are already realized at the early stages of microspore development and are revealed by the high frequency of small underdeveloped pollen. It was found that most of the pine trees growing on the soil of fine-stone-sandy composition correspond to the categories of weakened and dying ones, which makes it possible to recognize the conditions of the man-made land as extremely unfavorable for the growth and development of pine. The mature pine pollen of these stands is characterized by the peculiar features that distinguish it from the pollen of other stands. The conclusion is made about the negative effect of smoke emissions from the JSC «Karabashmed» plant on the condition of pine plantations and the male generative system of pine, even at a considerable distance from the source of emissions.

Keywords: pollen grain, male gametophyte, technogenic pollution, bioindication

Suggested citation: Makhniova S.G., Menshchikov S.L. *Kachestvo pyl'tsy sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v zone deystviya vybrosov AO «Karabashmed»* [Common pine (*Pinus sylvestris* L.) pollen quality in JSC «Karabashmed» emission zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 32–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44

References

- [1] Parantainen A., Pulkkinen P. Pollen viability of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in different temperature conditions: high levels of variation among and within latitudes. *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 167, no. 1–3, pp. 149–160. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00722-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00722-8)
- [2] Surso M.V. *Fenologiya reproductivnykh tsiklov i kachestvo semyan khvoynykh (Pinaceae, Cupressaceae) v severnoy tayge* [Phenology of reproductive cycles and quality of seeds of conifers (Pinaceae, Cupressaceae) in the northern taiga]. *Arctic Environmental Research*, 2017, no. 4, pp. 355–367.
- [3] Pimenov A. V., Sedel'nikova T. S., Efremov S. P. *Morfologiya i kachestvo pyl'tsy sosny obyknovennoy v kontrastnykh ekotopakh Khakasii* [Morphology and quality of the Scots pine pollen in contrasting ecotopes of Khakassia]. *Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 1, pp. 57–64.
- [4] Svintsova V. S., Kuznetsova N. F., Pardaeva E. Yu. *Vliyaniye zasukhi na generativnyuyu sferu i zhiznesposobnost' pyl'tsy sosny obyknovennoy* [Drought impact on generative sphere and sustainability of scots pine pollen]. *Russian Journal of Forest Science*, 2014, no. 3, pp. 49–57.
- [5] Velisevich S.N. *Kachestvo pyl'tsy vysokogornyykh populyatsiy Pinus sibirica du Tour (Pinaceae) v aridnykh i gumidnykh rayonakh Altaya* [Pollen Quality of *Pinus sibirica* Du Tour (Pinaceae) Mountain Populations in Arid and Humid Regions of Altai]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta* [Journal of Siberian Federal University]. *Biology*, 2017, vol. 10 (3), pp. 301–309. DOI: 10.17516/1997-1389-0014
- [6] Fedorkov A.L. *Polovaya reproduksiya u sosny obyknovennoy pri agrotekhnicheskom zagryaznenii v usloviyakh Subarktiki* [Sexual reproduction in Scots pine under agrotechnical pollution in the Subarctic]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 1992, no. 4, pp. 60–64.
- [7] Noskova N.E., Tref'yakova I.N., Noskov E.A. *Osobennosti formirovaniya muzhskoy generativnoy sfery sosny obyknovennoy v usloviyakh tekhnogeneza* [Features of the formation of the male generative sphere of scalpine pine under technogenesis conditions]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal area], 2006, vol. 23, no. 2, pp. 211–214.
- [8] Kalashnik N.A. *Anomalii pyl'tsy u sosny obyknovennoy v razlichnykh ekologicheskikh usloviyakh* [Pollen anomalies in scots pine under different ecological conditions]. *Byulleten' botanicheskogo sada Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Botanic Garden of Saratov State University] 2012, no. 10, pp. 46–52.
- [9] Sadakova K.A., Kolyasnikova N.L. *Fertil'nost' pyl'tsevykh zeren i sodержaniye tyazhelykh metallov v pyl'tse sosny obyknovennoy, proizrastayushchey v mestakh s raznoy antropogennoy nagruzkoj* [Fertility of pollen grains and content of heavy metals in pine pollen growing in places with different anthropogenic load]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2014, no. 6, p. 1444.

- [10] Kulagin Yu.Z. *O gazoustoychivosti sosny i berezy* [About gas resistance of pine and birch]. *Rastitel'nost' i promyshlennyye zagryazneniya. Okhrana prirody na Urale* [Vegetation and industrial pollution. Nature protection in the Urals]. Sverdlovsk, 1964, pp. 115–122.
- [11] Makunina G.S. *Degradatsiya i khimicheskie svoystva pochv Karabashskoy tekhnogennoy anomalii* [Degradation and chemical properties of soils of the Karabash technogenic anomaly]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2002, no. 3, pp. 368–376.
- [12] Udachin V.N. *Ekogeokhimiya gornopromyshlennogo tekhnogeneza Yuzhnogo Urala* [Ecogeochemistry of mining technogenesis of the Southern Urals]. Diss. Dr. Sci. (Geogr.). Tomsk, 2012, 48 p.
- [13] Koroteeva E.V., Veysberg E.I., Kuyantseva N.B. *Otsenka sostoyaniya lesnoy tsenoflory v zone vozdeystviya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata (Yuzhnyy Ural)* [Estimation of forest cenoflora state in zone of Karabashskiy cooper-smelt industrial complex impact (South Urals)]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk (Lesnye resursy)* [Bulletin of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 1(4), pp. 1005–1011.
- [14] Usol'tsev V.A., Bornikov A.V., Zhanabaeva A.S., Vorobeychik E.L., Koltunova A.I. *Produktivnost' assilyatsionnogo apparata derev'ev vblizi medeplavil'nykh zavodov Urala* [Productivity of the assimilation system of trees growing in the vicinity of coppersmelting plants of the Urals]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Orenburg State Agrarian University], 2011, no. 3, pp. 67–70.
- [15] Kumar A., Tripti, Maleva M., Kiseleva I., Kumar S.M., Morozova M. Toxic metal(loid)s contamination and potential human health risk assessment in the vicinity of century-old copper smelter, Karabash, Russia. *Environ Geochem Health*, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00414-3>
- [16] Bachurina A.V., Zalesov S.V. *Otsenka sostoyaniya okruzhayushchey sredy po pokazatelyu fluktuiruyushchey asimmetrii* [Assessment of the state of the environment by the indicator of fluctuating asymmetry]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forestry complex], 2020, no. 56, pp. 98–103.
- [17] Shneydmiller N.F., Mamedov G.R. *Osobennosti razvitiya malykh gorodov Rossii v usloviyakh ekologicheskogo krizisa na primere goroda Karabash Chelyabinskoy oblasti* [Development characteristics of small Russian towns in the conditions of ecological crisis: the case of Karabash (Chelyabinsk region)]. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politicheskoe, sotsiologicheskoe i ekonomicheskoe nauki* [Bulletin of Kemerovo state university. Political, Sociological and Economic Sciences], 2018, no. 3(9). DOI:10.21603/2500-3372-2018-3-183-190
- [18] Kalabin G.V., Titova A.V., Sharov A.V. *Modernizatsiya medeplavil'nogo proizvodstva kombinata ZAO «Karabashmed» i dinamika sostoyaniya prirodnoy sredy v zone ego vliyaniya* [Upgrading the close JSC Karabashmed's coppersmelting plant and the dynamics of the natural environment changes in the affected area]. *Marksheyderiya i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsurface use], 2011, no. 3 (53), pp. 65–70.
- [19] Zaparyi V.V., Naboychenko S.S. *Mednaya otrasl' Urala: Itogi dvadtsati let reform* [Ural copper industry: results of twenty years of reform]. *Ekonomicheskaya istoriya* [Economic History], 2012, no. 4 (19), pp. 37–51.
- [20] Kolesnikov B.P. *Lesa SSSR: Lesa Chelyabinskoy oblasti* [Lesas SSSR: Lesas Chelyabinskoy oblasti]. Moscow: Nauka, 1969, v. 4, 257 p.
- [21] Zalesov S.V., Bachurina A.V., Bachurina S.V. *Sostoyanie lesnykh nasazhdeniy, podverzhennykh vliyaniyu promyshlennykh pollutantov ZAO «Karabashmed», i reaktsiya ikh komponentov na provedenie rubok obnovleniya* [The state of forest stands subject to the influence of industrial pollutants of CJSC «Karabashmed», and the reaction of their components to cutting updates] [Electronic resource]. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2017, 277 p. Available at: <http://elar.usfeu.ru/handle/123456789/6620> (accessed 03.07.2020).
- [22] *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery RD52.04.186–89* [Guidelines for the control of air pollution RD52.04.186–89]. Moscow, 1991. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200036406> (accessed 03.07.2020).
- [23] Menshchikov S.L. *Metodicheskie aspekty otsenki ushcherba lesov, povrezhdennykh promyshlennymi vybrosami na Srednem Urale* [Methodological aspects of assessing the damage to forests damaged by industrial emissions in the Middle Urals]. *Lesa Urala i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Ural and the economy in them], 2001, no. 21, pp. 243–251.
- [24] Pausheva Z.P. *Praktikum po tsitologii rasteniy* [Plants Cytology Practical Work]. Moscow: Agropromizdat, 1988, 271 p.
- [25] Makhneva S.G., Babushkina L.G., Zueva G.V. *Sostoyanie muzhskoy generativnoy sistemy sosny obyknovnoy pri tekhnogenom zagryaznenii sredy* [Condition of Scots Pine Male Generative Sphere under the Environment of Technogenic Pollution]. Yekaterinburg: USFEA, 2003, 154 p.
- [26] Boguslavskaya D.M., Zavalishin S.I., Galetskaya G.A., Kal'chenko L.I. *Vliyaniye sostoyaniya pochv na usykhaniye sosny obyknovnoy v usloviyakh lesosemennoy stantsii Ozerskogo lesnichestva* [Influence of the state of soils on the drying out of Scots pine in the conditions of the forest seed station of the Ozerskoye forestry]. *Lesa Evrazii — Bol'shoy Altay: Materialy XV Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchenykh, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya professora G.N. Vysotskogo* [Forests of Eurasia — Great Altai: Materials Of the XV International Conference of Young Scientists, Dedicated to the 150-th Anniversary of Professor G.N. Vysotsky], Barnaul, 13–20 September 2015. Moscow: MSFU, 2015, pp. 120–122.
- [27] Park M.V., Neigh A.M., Vermeulen J.P. The effect of particle size on the cytotoxicity, inflammation, developmental toxicity and genotoxicity of silver nanoparticles. *Biomaterials*, 2011, v. 32(36), pp. 9810–9817. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2011.08.085
- [28] Dzyuba O.F. *Palinoindikatsiya kachestva okruzhayushchey sredy* [Palynology Indication of the Environment Quality]. St. Petersburg: Nedra, 2006, 198 p.
- [29] Makhniova S., Kuzmina N., Menshchikov S. Quality of scots pine pollen depending on the aerotechnogenic pollution level with emissions from Reftinskiy GRES power plant. *J. of Geoscience and Environment Protection*, 2017, v. 5, no. 4, pp. 99–117. DOI: 10.4236/gep.2017.54009
- [30] Bessonova V.P. *Sostoyaniye pyl'tsy kak pokazatel' zagryazneniya sredy tyazhelyimi metallami* [The state of pollen as an indicator of environmental pollution with heavy metals]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 1994, no. 4, pp. 45–50.
- [31] Kochubey O.V. *Palinoindikatsiya kachestva okruzhayushchey sredy v mestakh provedeniya podzemnykh yadernykh vzryvov na Evropeyskoy territorii Rossii* [Palinoindication of the quality of the environment in the places of underground nuclear explosions in the European territory of Russia]. Dis. Cand. Sci. (Geogr.). S.-Pb., 2015, 21 p.

- [32] Reshetova S.A., Sumarokova I.E. *Pyl'tsa rasteniy urbanizirovannykh territoriy kak bioindikator usloviy tekhnogennogo zagryazneniya (Zabaykal'e)* [Pollen of plants in urban areas as a bioindicator of industrial pollution (Transbaikalia)]. *Geosfernye issledovaniya* [Geosphere Research], 2019, no. 4, pp. 15–23. DOI: 10.17223/25421379/13/2
- [33] Udachin V.N., Williamson B.J., Purvis O.W., Spiro B., Dubbin W., Herrington R.J., Mikhailova I. Assessment of environmental impacts of active smelter operations and abandoned mines in Karabash, Ural Mountains of Russia. *Sust. Devel.*, 2003, v. 11, pp. 1–10. DOI:10.1002/sd.211
- [34] Tatsiy Yu.G. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka zagryazneniya okruzhayushchey sredy v zone deystviya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [Ecological and geochemical evaluation of environmental pollution within the operating area of the Karabash copper-smelting plant]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie* [Tyumen State University Herald], 2012, no. 12, pp. 81–86.
- [35] Sinyavskiy I.V., Knyazeva T.G. *Tyazhelye metally v sisteme «pochva — rastenie — chelovek» v promyshlennykh gorodakh gornolesnoy zony Yuzhnogo Urala* [Heavy metals in the «soil — plant — human» system in industrial cities of the mountain-forest zone of the Southern Urals]. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii* [Agro-food policy in Russia], 2016, no. 4(52), pp. 59–62.
- [36] Linnik V.G., Khoroshavin V.Yu., Pologrudova O.A. *Degradatsiya prirodnykh landshaftov i khimicheskoe zagryaznenie v blizhney zone vliyaniya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [Degradation of natural landscapes and chemical pollution in the near zone of influence of the Karabash Copper Smelter]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie* [Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology], 2013, no. 4, pp. 105–114.

Authors' information

Makhniova Svetlana Georgievna — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Senior Researcher of the FGBUN Botanical Garden, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor of the Department of Mathematical and Natural Science Disciplines of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Russian State Professional Pedagogical University», makhniovasg@mail.ru

Menshchikov Sergey Leonidovich — Dr. Sci. (Agriculture), Head Laboratory of Ecology of Technogenic Plant Communities, FGBUN Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, m.sergei1951@yandex.ru

Received 19.10.2020.

Accepted for publication 02.11.2020.