

ФЕНОТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ПАЛИНОИНДИКАЦИИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ СООБЩЕСТВ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ РФ

GENETIC VARIABILITY OF SCOTS PINE IN BIOINDICATION OF THE STATE OF FOREST COMMUNITIES IN THE NON- CHERNOZEM REGION OF THE RUSSIAN FEDERATION

**I. Moskalenko
E. Nozdracheva
M. Avramenko
A. Gayvoronskaya**

Summary. Identification of the phenetics and viability of *Pinus sylvestris* in forest communities depending on the distance to a large industrial facility made it possible to prove that, as a massive and very sensitive test object, is very advisable to use in a biological monitoring system in the area of man-made objects. It has been established that with distance from the object, viability (the total number of germinated pollen grains) and the number of normally germinated pollen grains with one unbranched tube increase. The number of sprouted pollen grains with various development anomalies decreases. It can be considered that anthropogenic and technogenic factors have an important impact on the state of the male generative sphere of the model object in the study area. The pollen of the *Pinus sylvestris* is able to respond to an increase in the intensity of the impact of stressful anthropogenic and technogenic factors by reducing viability and increasing the yield of anomalies in the development of pollen grains. The results obtained indicate the relative stability of male pine reproduction in the area of the object in 2018–2020.

Keywords: pollen grains, phenetic characters, bioindication, Scots pine, Non-Black Earth Region of the Russian Federation.

Москаленко Игорь Владимирович

кандидат биологических наук, старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет
имени академика И.Г. Петровского»
moskalenkigor@yandex.ru

Ноздрачева Елена Владимировна

кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Брянский государственный университет имени
академика И.Г. Петровского»
nozdr-eva@mail.ru

Авраменко Марина Васильевна

кандидат биологических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Брянский государственный университет имени
академика И.Г. Петровского»
avramenko_marina84@mail.ru

Гайворонская Анжелика Алексеевна

Аспирант, ФГБОУ ВО «Брянский государственный
университет имени академика И.Г. Петровского»
gayvoronskaja.anzhelika@yandex.ru

Аннотация. Выявление особенности фенетики и жизнеспособности пыльцы *Pinus sylvestris* в лесных сообществах в зависимости от расстояния до крупного промышленного объекта позволило доказать, что пыльцу как массовый и весьма чувствительный тест-объект весьма целесообразно использовать в системе биологического мониторинга в районе техногенных объектов. Установлено, что с расстоянием от объекта возрастает жизнеспособность (общее количество проросших пыльцевых зёрен) и число нормально проросших пыльцевых зёрен с одной неразветвленной трубкой. Уменьшается число проросших пыльцевых зёрен с различными аномалиями развития. Можно считать, что важное воздействие на состояние мужской генеративной сферы модельного объекта в исследуемом районе оказывают антропогенные и техногенные факторы. Пыльца *Pinus sylvestris* способна реагировать на повышение интенсивности воздействия стрессовых антропогенных и техногенных факторов снижением жизнеспособности и увеличением выхода аномалий в развитии пыльцевых зёрен. Полученные результаты свидетельствуют об относительной стабильности мужской репродукции сосны в районе объекта в 2018–2020 гг.

Ключевые слова: пыльцевые зёрна, фенетические признаки, биоиндикация, сосна обыкновенная, Нечерноземье РФ.

Фенетическая изменчивость пыльцы популяций сосны обыкновенной в лесных биоценозах определяется абиотическими факторами среды, в том числе и сочетанными антропогенными. Морфологические нарушения структуры и жизнеспособности пыльцевых зёрен (ПЗ) по данным литературы обусловлены в значительной степени загрязнением, в меньшей —

климатическими условиями местообитаний [2, 3, 5–8]. Формирование качественной пыльцы обеспечивает репродукцию особей популяции, длительность репродукционных циклов, как следствие — поддержание целостности сосняков и сложных дубрав в Нечерноземье РФ. Естественный полиморфизм пыльцевых зёрен модельного растения позволил разработать приём оценки со-

стояния среды и лесных экосистем на основе разнообразия фенетики и фертильности пыльцы, который широко стал использоваться для диагностики среды в биомониторинге [1, 4, 7, 8]. При значительной антропогенной нагрузке в староосвоенном регионе Брянской области решалась цель исследования — описание фенетических признаков и жизнеспособности пыльцевых зёрен сосны обыкновенной для индикации лесных биоценозов.

Исследования проводились палинологическим методом с йодкрахмальной пробой: стерильные ПЗ не окрашиваются, фертильные — окрашиваются. Сбор материалов — по 10 микростробил с каждого дерева проводили в период массового вылета пыльцы за трёхлетний период (2018–2020 гг.). Микропрепараты изучались в проходящем свете под микроскопом, проводилась фотофиксация. Оценивали морфологию (фенетику) ПЗ: форма, число воздушных мешков, пыльцевые трубки, их число и форма. Проращивали ПЗ в растворе сахарозы [4, 6].

Результаты палинологии приведены ниже. За период 2018–2020 гг. в санитарно защитной зоне и за её пределами ЗАО «Мальцовский портландцемент» (г. Фокино, Брянский район) проанализирован 141 образец пыльцы сосны, из которых лишь в 13 образцах (9,2 %) жизнеспособность пыльцы была меньше 50 %, что свидетельствует о достаточно высоком качестве пыльцы сосны. В то же время, во всех 30 образцах пыльцы из фоновой зоны (Снежетьское лесничество) количество проросшей пыльцы за исследуемый период превышало 50 %, что объясняется, вероятно, неблагоприятным влиянием климатических факторов в момент формирования пыльцевых зёрен (мужских стробил).

Анализ жизнеспособности пыльцы сосны обыкновенной на территории СЗЗ и на расстоянии в 0,5 км, 1 км и 1,5 км объекта, привносящего наибольшее количество загрязняющих веществ воздух всех крупных населённых пунктов северо-запада и центра области, показал, что качество пыльцы в значительной степени связано с удаленностью от основного источника промышленного загрязнения атмосферы в регионе — г. Фокино и ЗАО «Мальцовский портландцемент» (МП) (объекта) (таблица 1). По средним данным за трёхлетний период выявлена закономерность повышения жизнеспособности пыльцы с увеличением расстояния от источника загрязнения — самого крупного в области.

Значительные показатели жизнеспособности пыльцы (ЖПЦ) определены для фоновой зоны в пределах Снежетьского участкового лесничества (89,8±1,04 %); наименьшее число проросших пыльцевых зёрен (73,9±3,97 %) отмечено в 0,5 км от СЗЗ на реперных точках, расположенных в непосредственной близости от объекта и его СЗЗ. Причем лучшие показатели жизнеспособности пыльцы на территории СЗЗ объекта наблю-

Таблица 1.
Характеристики жизнеспособности пыльцевых зёрен сосны лесной в СЗЗ и на расстоянии от промпредприятия

Период	Показатели жизнеспособности пыльцы, %			Уровень достоверности критерия существенности различий по сравнению с контролем, %
	$M \pm m_x$	σ	C	
СЗЗ				
Среднее за 2018–2020 гг.	78,1±2,76	13,50	17,3	99,9
2018 г.	88,0±2,83 $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 95\%$	8,00	9,1	–
1,5 км от СЗЗ				
Среднее за 2018–2020 гг.	78,4±2,25	22,40	28,6	95,0
2020 г.	89,8±2,20 $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 99,9\%$	12,62	14,1	–
1,0 км от СЗЗ				
Среднее за 2018–2020 гг.	74,2±2,14	18,60	24,2	95,0
2020 г.	89,8±2,20 $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 95,0\%$	11,51	13,2	–
0,5 км от СЗЗ				
Среднее за 2018–2020 гг.	73,9±3,97	16,83	22,8	95,0
2020 г.	84,1±4,14 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	10,14	12,1	–
Фоновые точки				
Среднее за 2018–2020 гг.	89,8±1,04	5,68	6,3	Контроль
2020 г.	90,0±3,05 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	9,64	10,7	Контроль

дались на площадках в 1,5 км от СЗЗ (78,4±2,25 %). Однако во всех зонах района расположения объекта ЖПЦ в период наблюдений была достоверно ниже фоновой зоны ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 95,0\%$).

В 2020 г. сложились более благоприятные погодные условия для формирования пыльцы в исследуемом регионе. Несмотря на бесснежный период в зимний период во всех зонах района расположения объекта выявлена более высокая ЖПЦ по сравнению со средними

данными за период 2018–2019 гг. Однако достоверное повышение количества проросших ПЗ отмечено лишь в СЗЗ ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 95\%$) и 1,5 км от СЗЗ ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P = 95,0\%$), где и были зафиксированы лучшие показатели жизнеспособности пыльцы ($89,8 \pm 2,20\%$). Наименьшая ЖПц вновь наблюдалась в периферической части СЗЗ ($84,1 \pm 4,14\%$), самая высокая ЖПц отмечена в фоновой зоне ($90,0 \pm 3,05\%$). Однако снижение исследуемого показателя на территории СЗЗ и на определённых по схеме закладки опыта экспериментальных исследованиях по объекту было статистически не достоверным по сравнению с фоновой зоной.

В период 2018–2020 гг. в популяциях сосны на территории СЗЗ и прилегающих территориях объекта наблюдалась значительная вариабельность ЖПц: высокий уровень изменчивости по шкале С.А. Мамаева отмечался в 0,5 км от СЗЗ ($C=28,6\%$) и периферической части СЗЗ ($C=22,8\%$), средний уровень — в СЗЗ ($C=17,3\%$). В то же время, в фоновой зоне зафиксирован очень низкий уровень изменчивости жизнеспособности Пц по шкале С.А. Мамаева ($C=6,3\%$). В 2020 г. во всех зонах района расположения промышленного объекта снизилась вариабельность ЖПц по сравнению со средними данными за период 2018–2019 гг., однако ранжирование коэффициента изменчивости сохранилось: средний уровень изменчивости по шкале С.А. Мамаева зафиксирован в 0,5 км от СЗЗ ($C=14,1\%$) и периферической части СЗЗ ($C=12,1\%$), низкий уровень — в 1,5 км от СЗЗ ($C=9,1\%$). В фоновой зоне, наоборот, несколько возросла вариабельность ЖПц по сравнению с периодом 2018–2019 гг.: отмечен низкий уровень изменчивости ($C=10,7\%$), т.е. даже выше, чем в СЗЗ.

Под действием негативных экологических факторов в популяциях растений обычно снижается количество нормально проросших пыльцевых зёрен (ПЗн) (с одной неразветвленной трубкой) и возрастает число аномально проросших ПЗн, что по данным ранее проведённых исследований является показателем воздействия экологических факторов на генотип организмов, усиливающих его нестабильность и повышающих отбор наиболее устойчивых генотипических наборов. В целом в популяциях модельного растения семейства хвойные на территории СЗЗ прилегающих к ней зон промышленного объекта наблюдается увеличение числа нормально проросших ПЗн и, наоборот, снижения количества ПЗн с аномалиями развития исследованных препаратов с увеличением расстояния от г. Фокино и промышленного объекта (таблица 2).

По средним данным за период 2018–2020 гг. ярко выражена тенденция увеличения количества нормально проросших ПЗн с возрастанием расстояния до г. Фокино. Наибольшее количество нормально проросших ПЗн отмечено в фоновой зоне ($85,3 \pm 1,12\%$), наименьшее

($68,1 \pm 3,74\%$) — в периферической части природозащитной зоны в непосредственной близости от г. Фокино и промпредприятия.

На исследуемой территории в зависимости от расстояния от действующего предприятия наиболее высокие значения показателя зафиксированы в 1,5 км от СЗЗ ($73,7 \pm 2,61\%$). При этом во всех зонах расположения объекта количество нормально проросших ПЗн в 2018–2020 гг. было достоверно ниже фоновой зоны ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P=95,0\%$). В 2020 г. во всех зонах расположения от объекта загрязнения отмечено возрастание количества нормально проросших ПЗн по сравнению со средними данными за период 2018–2020 гг., однако, статистически достоверное увеличение показателя зафиксировано лишь в 0,5 км от предприятия ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P=95,0\%$), где наблюдалось наибольшее количество нормально проросших ПЗн ($84,8 \pm 2,14\%$) на территории границы СЗЗ и природозащитных зон. Наименьшее количество нормально проросших ПЗн, как и по средним данным, отмечено в периферической части СЗЗ ($78,4 \pm 4,15\%$), наибольшее — в фоновой зоне ($87,5 \pm 3,14\%$). Однако, в 2020 г. снижение количества нормально проросших ПЗн на территории СЗЗ и других частей природозащитных зон было статистически несущественным по сравнению с фоновой зоной.

Таким образом в 2020 г. по сравнению со средними данными изменилось ранжирование палинологических показателей (ЖПц и количества нормально проросших ПЗ) — в СЗЗ зафиксировано более низкие значения, чем на расстоянии 0,5 км от границы предприятия. Возможно, это связано с увеличением интенсивности воздействия антропогенных факторов на лесные экосистемы в СЗЗ.

Анализ изменчивости количества нормально проросших ПЗ модельного объекта выявил аналогичные тенденции, как по показателям ЖПц. Отмечен высокий уровень изменчивости по шкале С.А. Мамаева средних данных за период 2018–2020 гг. в 0,5 км от СЗЗ ($C=32,0\%$) и периферической части природозащитной зоны ($C=25,9\%$), средний уровень — наблюдался на границе СЗЗ ($C=19,7\%$), низкий — в фоновой зоне ($C=7,5\%$). В 2020 г. средний уровень изменчивости количества нормально проросших ПЗ зафиксирован в 0,5 км от СЗЗ ($C=15,1\%$), в фоновой зоне ($C=12,2\%$) и СЗЗ ($C=8,4\%$).

По средним данным за период 2018–2020 гг. количество аномально проросших ПЗ у сосны в СЗЗ и на установленных расстояниях от неё значительно превышал фоновый уровень ($3,5 \pm 0,47\%$). Высота вариабельности показателей, исследуемых в работе, высока лишь в 0,5 км от СЗЗ ($5,2 \pm 0,54\%$) различия статистически достоверны ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при $P=95,0\%$). Причем, число аномально проросших ПЗ в СЗЗ и природозащитной зоне на расстоянии от промпредприятия закономерно возрастает

Таблица 2.

Показатели числа нормально и аномально проросших ПЗ сосны лесной в СЗЗ и прилегающих территориях по промышленному объекту

Период	Количество проросших пыльцевых зерен, %							
	Нормальные (с одной неразветвленной пыльцевой трубкой)				Аномальные (с одной разветвленной и двумя пыльцевыми трубками)			
	$M \pm m_x$	σ	C	Уровень достоверности $t_{\text{факт}}$, %	$M \pm m_x$	σ	C	Уровень достоверности $t_{\text{факт}}$, %
СЗЗ								
Среднее за 2018–2020 гг.	73,5±2,90	14,18	19,3	99,9	4,5±0,73	3,60	79,6	–
2020 г.	81,1±2,52 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	7,12	8,8	–	6,9±1,08 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	3,06	44,4	95,0
1,5 км от СЗЗ								
Среднее за 2018–2020 гг.	73,3±2,28	22,73	31,0	99,9	5,1±0,52	5,16	101,7	95,0
2020 г.	84,8±2,14 $t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при P = 99,9%	12,29	14,5	–	4,9±0,76 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	4,36	88,5	–
1,0 км от СЗЗ								
Среднее за 2018–2020 гг.	67,0±4,24	17,98	26,8	95,0	5,9±1,89	7,34	112,8	–
2020 г.	77,6±4,28 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	10,43	13,5	–	5,5±1,35 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	3,67	49,5	95,0
0,5 км от СЗЗ								
Среднее за 2018–2020 гг.	67,0±4,24	17,98	26,8	95,0	6,9±1,75	7,43	107,8	–
2020 г.	77,6±4,28 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	10,43	13,5	–	6,5±1,31 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	3,22	49,5	95,0
Эталонные условия (контрольные условия)								
Среднее за 2018–2020 гг.	86,5±1,12	6,11	7,1	Контроль	3,3±0,48	2,61	80,3	Контроль
2020 г.	87,3±3,11 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	9,84	11,3	Контроль	2,7±0,84 $t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$	2,67	97,2	Контроль

с увеличением расстояния от г. Фокино и предприятия: наименьшее значение показателя зафиксировано в СЗЗ (4,2±0,72 %), наибольшее (6,8±1,76 %) — на точках сбора в периферической части, наиболее близко расположенных от предприятия и города. В 2020 г. произошли кардинальные изменения в динамике числа аномально проросших ПЗ по зонам загрязнения. Если в фоновой зоне и периферической части от объекта оно незначительно снизилось по сравнению со средними данными за период 2018–2020 гг., то в СЗЗ, наоборот, возросло — в 1,5 раза. Однако, во всех зонах района расположения ЗАО МП различия статистически недостоверны по сравнению с фоновой зоной ($t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$).

Наибольшее число аномально проросших пыльцевых зерен (6,7±1,77 %) зафиксировано на границе объекта,

что превысило значение показателя в периферической части природозащитных территорий в окрестностях г. Фокино (6,5±1,32 %), причем, в этих зонах различия показателей статистически достоверны ($t_{\text{факт}} > t_{\text{табл}}$ при P=95,0 %) по сравнению с фоновой зоной, где отмечено наименьшее количество аномалий развития пыльцевых трубок (2,5±0,81 %).

Во всех зонах число аномально проросших ПЗ характеризуется очень высоким уровнем изменчивости по шкале С.А. Мамаева. Однако, в 2020 г. наблюдаются существенные отклонения в динамике коэффициента изменчивости по сравнению со средними данными за период 2018–2020 гг. Так в 2018–2020 гг. варибельность количества аномально проросших ПЗ на расстоянии 0,5 км от промобъекта (C=102,7 %), периферической

части от объекта (C=107,8 %) была выше, чем в фоновой зоне (C=81,3 %) и СЗЗ (C=78,7 %). В 2018 г. во всех зонах от ЗАО МП она стала меньше, чем в фоновой зоне, причем, наименьшая изменчивость признака зафиксирована на границе СЗЗ (C=43,5 %) и в периферической части (48,49 %), где отмечалось наибольшее количество аномалий развития пыльцевых трубок (ПТр). Уменьшение вариабельности признака может свидетельствовать о мощном воздействии какого-либо односторонне направленного фактора.

В исследованных популяциях сосны лесной обнаружены разнообразные типы аномалий развития ПТр (таблица 3). Количество ПЗн с различными аномалиями развития ПТр во всех популяциях характеризуется очень высоким уровнем индивидуальной (внутрипопуляционной) изменчивости (по шкале С.А. Мамаева $C > 40$ %). В целом просматривается общая тенденция увеличения количества ПЗн с различными типами аномалий развития ПТр с приближением к городской черте.

По средним данным за период 2018–2020 гг. на границе промобъекта и на различном расстоянии от него общее количество проросших ПЗн с двумя трубками значительно превышал (от 3,459 % на границе предприятия до 3,978 % в периферийной части) фоновую зону (1,159 %), причем наблюдается обратная зависимость показателя от расстояния до города. Среднемноголетнее количество проросших ПЗн с одной разветвленной трубкой также стабильно уменьшается по мере удаления от города (1,058 % на границе ССЗ — 2,819 % в периферической части), однако в фоновой зоне (2,079 %) величина показателя ниже, чем в периферической части. В ССЗ и других зонах природозащитной территории преобладают проросшие ПЗн с простыми типами нарушения развития ПТр, причем их число уменьшается по мере удаления от объекта: количество ПЗ с одной трубкой с 2-мя разветвлениями — от 2,651 % в периферической части от объекта (выше, чем в фоновой зоне — 2,078 %) до 0,969 % на границе с ССЗ, число ПЗн с 2-мя ПТр — от 3,977 % в периферической части до 3,409 % на границе ССЗ, что ниже чем в фоновой зоне — 1,159 %.

Таблица 3.

Оценка числа пыльцевых зерен модельного объекта с аномалиями развития пыльцевых трубок в пределах изучаемой территории

Период	Число проросших ПЗ с аномалиями развития ПТр, % (в числителе — от общего числа учтённых ПЗ, в знаменателе — от общего числа аномально проросших ПЗ)						
	всего аномальных	с одной разветвленной пыльцевой трубкой			с двумя пыльцевыми трубками		
		итого	с 2-мя разветвлениями (простые)	с 3-мя и более разветвлениями (сложные)	итого	без разветвлений	с разветвлениями
ССЗ							
Среднее за 2018–2020 гг.	<u>4,519</u> 100	<u>1,058</u> 23,4	<u>0,976</u> 21,6	<u>0,083</u> 1,8	<u>3,461</u> 76,6	<u>3,413</u> 75,5	<u>0,048</u> 1,1
2020 г.	<u>6,885</u> 100	<u>3,109</u> 45,2	<u>2,630</u> 38,2	<u>0,479</u> 7,0	<u>3,776</u> 54,8	<u>3,574</u> 51,9	<u>0,202</u> 2,9
1,5 км от ССЗ объекта							
Среднее за 2018–2020 гг.	<u>5,067</u> 100	<u>1,359</u> 26,8	<u>1,190</u> 23,5	<u>0,169</u> 3,3	<u>3,709</u> 73,2	<u>3,677</u> 72,6	<u>0,032</u> 0,6
2020 г.	<u>4,929</u> 100	<u>2,307</u> 46,8	<u>1,930</u> 39,2	<u>0,377</u> 7,6	<u>2,622</u> 53,2	<u>2,532</u> 51,4	<u>0,089</u> 1,8
1,0 км от ССЗ объекта							
Среднее за 2018–2020 гг.	<u>6,889</u> 100	<u>2,905</u> 42,2	<u>2,648</u> 38,4	<u>0,257</u> 3,7	<u>3,984</u> 57,8	<u>3,854</u> 55,9	<u>0,130</u> 1,9
2020 г.	<u>6,506</u> 100	<u>3,830</u> 58,9	<u>3,544</u> 54,5	<u>0,286</u> 4,4	<u>2,676</u> 41,1	<u>2,676</u> 41,1	–
Эталонные экосистемы							
Среднее за 2018–2020 гг.	<u>3,252</u> 100	<u>2,084</u> 64,1	<u>2,084</u> 64,1	–	<u>1,168</u> 35,9	<u>1,161</u> 35,7	<u>0,007</u> 0,2
2020 г.	<u>2,748</u> 100	<u>0,124</u> 4,5	<u>0,124</u> 4,5	–	<u>2,624</u> 95,5	<u>2,624</u> 95,5	–

На границе ССЗ и в других частях природоохранной территории среднемноголетнее число проросших ПТр со сложными типами аномалий развития оказалось значительно выше, чем в фоновой зоне. Число проросших ПЗн с одной разветвленной трубкой с 3-мя и более разветвлениями стабильно уменьшается по мере удаления от объекта (0,249 % в периферической части — 0,081 % на границе СЗЗ, при полном отсутствии подобных нарушений в фоновой зоне). Во всех частях природозащитной зоны выявлена более высокая доля ПЗн с двумя проросшими трубками (57,7 % в периферической части — 76,7 % в ССЗ), причем, она возрастает с увеличением расстояния от объекта. В фоновой зоне, наоборот, среди аномально проросших ПЗн преобладают ПЗн с одной разветвленной трубкой (64,2 %). Доля ПЗн со сложными типами аномалий развития трубок (с одной сильно разветвленной трубкой и 2-мя разветвленными трубками) в целом незначительна, однако, она снижается с увеличением расстояния до объекта: в фоновой зоне — 0,2 %, СЗЗ — 2,8 %, 1 км от ССЗ — 3,8 %, периферической части — 5,5 %.

В 2020 г. после аномально бесснежной и высокотемпературной зимы произошли некоторые изменения в структуре аномалий развития ПТр в зонах расположения объекта и природозащитных зон. Число проросших ПЗн с одной разветвленной трубкой значительно увеличилось во всех зонах по сравнению со средними данными за период 2018–2020 гг., а количество проросших ПЗн с двумя трубками — лишь на границе. В фоновой зоне наблюдается противоположная тенденция: увеличилось число проросших ПЗн с двумя трубками и снизилось число проросших ПЗн с одной разветвленной трубкой. Количество проросших пыльцевых зерен с одной разветвленной трубкой в 2020 г. во всех зонах расположения ЗАО МП превышает фоновую зону (0,123 %): максималь-

ное значение вновь зафиксировано в периферической части объекта (3,820 %), в СЗЗ (3,108 %) по сравнению с периодом 2018–2020 гг. превысило показатель 1 км от ССЗ (2,911 %). Количество проросших ПЗн с двумя трубками лишь на границе СЗЗ (3,769 %) выше, чем в фоновой зоне (2,624 %). В 1 км от ССЗ (2,618 %) и периферической части (2,667 %) они практически находятся на одном уровне с фоновой зоной.

Во всех зонах расположения промпредприятия среди аномалий развития ПТр преобладают ПЗн с простыми типами нарушений (рисунок). На территории объекта в 2020 г. по сравнению со средними данными за период 2018–2020 гг. увеличилось число проросших ПЗн с одной трубкой с 2-мя разветвлениями, наибольшее их количество зафиксировано в периферической части (3,532 %), что значительно выше, чем в фоновой зоне (0,124 %). В СЗЗ (2,630 %) и 0,5 км (1,930 %) данный показатель также превышал показатели фоновой зоны.

В 2020 г. количество проросших ПЗн с двумя неразветвленными трубками увеличилось по сравнению со средними данными за период 2018–2020 гг. лишь на границе и фоновой зоне, причем, в ССЗ (3,567 %) оно значительно превысило фон (2,630 %).

В фоновой зоне в 2020 г. не были выявлены сложные нарушения развития ПТр. Однако в связи с очень высоким уровнем изменчивости признаков, различия между показателями по количеству проросших ПЗн статистически недостоверны ($t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$).

Корреляционный анализ связи среднепопуляционного количества проросших ПЗн сосны лесной с расстоянием до объекта загрязнения и влияния на воздух (таблица 1) подтверждает ранее сделанные выводы



а) Проросшее ПЗн с одной ПТр с двумя разветвлениями



б) Проросшее ПЗ с двумя ПТр

Рис. 1. Простые типы аномалий развития ПТр

по средним данным за период 2018–2020 гг. Отмечается положительная тенденция ($t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$) связи жизнеспособности пыльцы ($r=+0,412$) и количества ПЗн с одной неразветвленной трубкой ($r=+0,491$) с расстоянием до промобъекта и отрицательная — у общего числа аномальных ПЗн ($r= -0,303$) и проросших ПЗн с двумя ПТр ($r = -0,444$), а также количества проросших ПЗн с двумя неразветвленными ($r = -0,437$) и разветвленными ($r = -0,204$) трубками. Данные показатели можно использовать в качестве индикаторов состояния мужской генеративной сферы сосны в системе ЭМ в условиях длительного промышленного загрязнения ОС.

В 2020 г. наблюдаются значительные отклонения в направленности и тесноте связи у многих показателей по сравнению со средними данными за период 2018–2020 гг. Отмечается положительная тенденция ($t_{\text{факт}} < t_{\text{табл}}$) связи с меньшей теснотой у жизнеспособности пыльцы ($r = +0,206$) и количества ПЗн с одной неразветвленной трубкой ($r = +0,343$) с расстоянием до объекта загрязнения и отрицательная с меньшей теснотой — у общего числа аномальных ПЗн ($r = -0,250$).

Таким образом, в исследованных популяциях сосны лесной на территории природозащитного объекта с уве-

личением расстояния до ЗАО Мальцовский портландцемент наблюдаются следующие тенденции: возрастают жизнеспособность (общее количество проросших ПЗн) и число нормально проросших ПЗн с одной неразветвленной трубкой; уменьшается число проросших ПЗн с различными аномалиями развития ПТр (с одной разветвленной и двумя ПТр). Можно считать, что важное воздействие на состояние мужской генеративной сферы модельного объекта в исследуемом районе оказывают антропогенные и техногенные факторы.

Пыльца модельного объекта способна реагировать на повышение интенсивности воздействия стрессовых антропогенных и техногенных факторов снижением жизнеспособности и увеличением выхода аномалий в развитии ПТр. Полученные результаты свидетельствуют об относительной стабильности мужской репродукции сосны в районе объекта в 2018–2020 гг. Пыльцу сосны лесной как массовый и весьма чувствительный тест-объект весьма целесообразно использовать в системе биологического мониторинга в районе техногенных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василевская Н.В., Петрова Н.В. Морфологическая изменчивость пыльцы *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного города (на примере Мончегорска) // Учёные записки Петрозаводского гос. университета. 2014. № 4. — С. 7–12.
2. Зуева Г.В., Махнева С.Г. Фертильность пыльцы сосны обыкновенной // Леса Урала и хозяйство в них. — Екатеринбург. УИЛТИ, 1993. Вып. 16. — С. 225–237.
3. Калашник Н.А. Аномалии пыльцы у сосны обыкновенной в различных экологических условиях // Бюл. Бот. Сада Саратовского гос.ун-та. 2012. № 10. — С. 46–52.
4. Мамаев С.А. Морфологическая изменчивость пыльцы *Pinus sylvestris*, произрастающей на Урале / Ботанический журнал. 1965. № 50 (5). — С. 680–685.
5. Мельникова Т.А. Аномальная пыльца рода *Pinus* как индикатор палеоклиматических флуктуаций в голоцене // Вестник ДВО РАН. 2004. № 3. — С. 178–182.
6. Третьякова И.Н., Носкова Н.Е. Пыльца сосны обыкновенной в условиях экологического стресса // Экология. 2004. № 1. — С. 26–33.
7. Benca J.P., Duijnsteer I.A.P., Looij C.V. UV-B-induced forest sterility: Implications of ozone shield failure in Earth's largest extinction // Science Advances. 2018. V. 4. P. 1–10.
8. Mollaeva M.Z., Tembotova F.A. The Pollen Quality and Anomalies of the Scots Pine in the Central Caucasus // Biology Bulletin. 2022. Vol. 49. № 3. Pp. 169–174.

© Москаленко Игорь Владимирович (moskalenkigor@yandex.ru); Нозрачева Елена Владимировна (nozdz-ev@mail.ru); Авраменко Марина Васильевна (avramenko_marina84@mail.ru); Гайворонская Анжелика Алексеевна (gaivoronskaja.anzhelika@yandex.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»