

## СОПРЯЖЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЗНАКОВ ЖЕНСКОЙ ГЕНЕРАТИВНОЙ СИСТЕМЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) В УСЛОВИЯХ МАГНЕЗИТОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

П.Е. Мохначев✉, С.Г. Махнева, С.Л. Менщиков, Н.А. Поспелова

ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», Россия, 620144, г. Екатеринбург,  
ул. 8 Марта, д. 202а

mohnachev74@mail.ru

Проведено исследование сопряженной изменчивости признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях аэротехногенного загрязнения. Выявлены признаки с устойчивой связью и изменяющихся под воздействием аэротехногенного загрязнения. Установлено что, взаимосвязь признаков, характеризующих размеры и массу шишек, жестко генетически детерминирована и не нарушается в условиях сильного уровня загрязнения. Семенная продуктивность древостоев сосны вне зависимости от условий произрастания более тесно связана с показателями выживаемости семян в гаметофитный период, чем в период эмбрионального развития. Показано, что в условиях сильного загрязнения связь выживаемости семян в 1-й вегетационный и эмбриональный периоды отрицательная, что может свидетельствовать об эффективной элиминации аномальных гаметофитов и освобождение древостоя от них в условиях загрязнения. Кроме того, условия сильного загрязнения «способствовали» выработки стратегии деревьев по формированию мелких семян с высокими посевными показателями и качества, развиваемых из них проростков — только в данных условиях произрастания при снижении массы семян достоверно увеличиваются показатели энергии прорастания и всхожести и морфометрические показатели проростков.

**Ключевые слова:** сопряженная изменчивость, генеративная система, качество семян, сосна обыкновенная, аэротехногенное загрязнение

**Ссылка для цитирования:** Мохначев П.Е., Махнева С.Г., Менщиков С.Л., Поспелова Н.А. Сопряженная изменчивость признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях магнетитового загрязнения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2024. Т. 28. № 3. С. 37–47.

DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-37-47

Изучение изменчивости количественных и функциональных признаков в природных популяциях — одно из основных направлений популяционно-биологических исследований. Фундаментальную основу адаптации животных и растений составляют исходная гетерогенность и функциональная разнокачественность особей в популяции [1–3]. У живых организмов уровень изменчивости количественных и функциональных признаков тесно связан с условиями обитания [2, 4] и поэтому он может быть использован для оценки этих условий. Структура взаимосвязей многих количественных признаков отражает внутренние механизмы организма, которые лежат в основе его устойчивого развития [5–8]. Внешние факторы, в том числе аэротехногенное загрязнение, обуславливают изменение сложившихся взаимосвязей. Воздействие аэрополлютантов на репродуктивную систему живых организмов может привести к изменению структуры взаимосвязей всего комплекса количественных и функциональных признаков [4, 9–17].

### Цель работы

Цель работы — раскрыть структуру связей репродуктивных признаков сосновых насаждений в зависимости от загрязнения выбросами магнетитового производства.

### Материалы и методы

Женскую генеративную систему сосны обыкновенной исследовали на опытных участках (ОУ), расположенных в зоне сильного магнетитового загрязнения (ОУ-2) и в фоновых (контрольных) условиях (ОУ-К). Опытные участки представлены лесными культурами сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), лиственницы Сукачева (*Larix Sukaczewii* Dyl.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth), созданными в 1980–1983 гг. рядовой посадкой в области загрязнения окружающей среды аэропромвыбросами с комбината «Магнетит» (рис. 1) и в фоновых условиях. Лесные культуры закладывались двухлетними отборными саженцами, выращенными в лесном питомнике на базе Саткинского лесхоза из семян местного происхождения [18, 19]. Культуры закладывали научные сотрудники Уральской лесной опытной станции Всесоюзного научно-исследовательского



Рис. 1. Комбинат «Мagneзит»  
Fig. 1. «Magnezit» integrated plant



Рис. 2. Культуры сосны обыкновенной в фоновых условиях  
Fig. 2. Scots pine in background conditions

института лесного хозяйства и механизации (в настоящее время — отдел Лесоведения Ботанического сада УрО РАН) С.Л. Меншиков и Т.Б. Сродных под руководством Н.А. Луганского и Г.Г. Терехова для изучения пригодности почв и возможности лесовосстановления в градиенте магнетитового загрязнения. На данных опытных участках на протяжении уже более 40 лет проводятся комплексные исследования влияния

магнетитового загрязнения на компоненты лесных насаждений [20–24].

**Характеристика опытных участков.** Опытный участок в фоновых условиях ОУ-К расположен с заветренной стороны в юго-западном направлении в 25 км от источника выбросов вне зоны загрязнения на средней части склона западной экспозиции при крутизне склона 3°: тип почвы — горная серая лесная среднеоподзоленная



Рис. 3. Культуры сосны обыкновенной в зоне сильного загрязнения  
Fig. 3. Scots pine in the zone of heavy pollution

среднесуглинистая; тип леса — сосняк ягодниковый [18, 19]. На момент исследования культуры сосны обыкновенной представляли собой сомкнутый древостой (рис. 2), возрастом 35 лет.

Опытный участок ОУ-2 характеризуется высокой степенью загрязнения, расположен на расстоянии 1 км в северо-восточном направлении от источника поллютантов на склоне южной экспозиции в его средней части при крутизне склона 8...10°: тип почвы ОУ-2 — горная серая лесная сильнооподзоленная, легкосуглинистая, каменистая; тип леса — сосняк ягодниковый. На момент исследования сосна обыкновенная произрастала небольшими куртинами (рис. 3). Возраст деревьев 35 лет.

Современный уровень загрязнения ОУ-2 обусловлен высокими значениями рН, повышенным содержанием взвешенных веществ, некоторых макроэлементов и тяжелых металлов, в частности, в снеговой воде и почве, по сравнению с ОУ-К [25–28] (табл. 1).

На опытных участках была изучена относительная численность семеносящих деревьев, подсчитано количество шишек на них, отобрано и промаркировано 25 семеносящих деревьев, со средней и верхней частей их крон собрано по 50...100 шишек, на некоторых деревьях все имеющиеся шишки, но не менее 20 шт. Отобранные шишки (индивидуально для каждого дерева) тщательно перемешивали и по принципу случайной выборки отбирали по 20...40 шт. для анализа. В каждой шишке исследовали 35 количественных и функциональных признаков (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

### Характеристика загрязнения снеговой воды на опытных участках

#### Characteristics of snow melt pollution in the trial plots

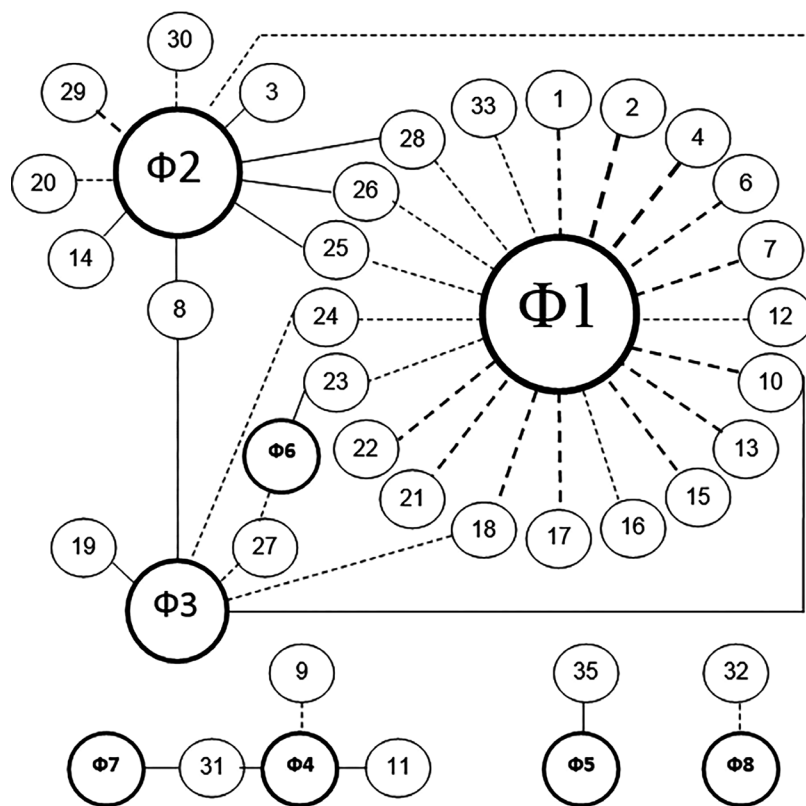
Показатель	ОУ-2	ОУ-К
рН	10,3 ± 0,02	7,4 ± 0,09
Масса взвешенного вещества, г/м <sup>2</sup>	29,51 ± 1,15	0,96 ± 0,15
Элементный состав, мг/м <sup>2</sup>		
Ca <sup>2+</sup>	576,55 ± 62,4	162,29 ± 17,1
Mg <sup>2+</sup>	7202,99 ± 1179,3	208,15 ± 24,5
K <sup>+</sup>	57,01 ± 14,4	4,79 ± 1,4
Na <sup>+</sup>	233,01 ± 37,0	91,74 ± 14,8
Fe	2,41 ± 0,56	2,27 ± 0,72
Mn	0,21 ± 0,07	0,90 ± 0,17
Zn	0,34 ± 0,08	0,80 ± 0,21
Cu	0,27 ± 0,07	0,20 ± 0,05
Ni	0,12 ± 0,02	0,04 ± 0,015

Все линейные признаки элементов шишек измеряли с помощью лабораторного штангенциркуля с точностью до 0,01 см. Индекс формы шишек, семенных чешуй, щитков и крылаток рассчитывали как отношение ширины к длине. Строение поверхности семенной чешуи, или форму апофиза, оценивали по шкале, предложенной С.А. Мамаевым [4].

Для подсчета семян, фертильных и стерильных семенных чешуй каждую шишку разрушали механическим путем. Для этого у шишки высверливали ось и разбирали на чешуи, начиная с базальных.

**Изученные количественные и функциональные признаки  
женской генеративной системы сосны обыкновенной**  
Studied quantitative and functional traits of the Scots pine tree female generative system

Номер признака	Наименование признака	ОУ-2	ОУ-К
1	Длина шишки, мм	3,57 ± 0,12	3,82 ± 0,10
2	Ширина шишки, мм	1,78 ± 0,05	1,90 ± 0,05
3	Форма шишки (2-й / 1-й признаки)	0,51 ± 0,01	0,50 ± 0,01
4	Масса шишки, грамм	4,90 ± 0,31	5,65 ± 0,42
5	Форма апофиза семенных чешуй [4]	3,09 ± 0,19	2,60 ± 0,23
6	Длина семенной чешуи в средней части шишки, мм	1,89 ± 0,05	2,00 ± 0,04
7	Ширина семенной чешуи в средней части шишки, мм	0,80 ± 0,02	0,86 ± 0,03
8	Форма семенной чешуи (7-й / 6-й признак)	0,43 ± 0,01	0,43 ± 0,01
9	Высота щитка в средней части шишки, мм	0,83 ± 0,02	0,85 ± 0,01
10	Ширина щитка в средней части шишки, мм	0,70 ± 0,01	0,69 ± 0,02
11	Форма щитка (10-й / 9-й признаки)	0,85 ± 0,02	0,82 ± 0,02
12	Длина крылатки в средней части шишки, мм	1,20 ± 0,04	1,23 ± 0,04
13	Ширина крылатки в средней части шишки, мм	0,37 ± 0,01	0,40 ± 0,02
14	Форма крылатки (13-й / 12-й признаки)	0,31 ± 0,01	0,33 ± 0,01
15	Число семенных чешуй, шт.	65,35 ± 1,74	64,51 ± 1,95
16	Число стерильных семенных чешуй, шт.	48,64 ± 1,37	46,89 ± 1,38
17	Число семяпочек потенциально фертильных, шт.	33,43 ± 1,09	35,25 ± 1,40
18	Число семяпочек, доживших до начала 2-й вегетации (число опыленных семяпочек) (20-й + 21-й признак), шт.	22,16 ± 1,06	25,37 ± 1,69
19	Число семяпочек, погибших в 1-й вегетационный период (число неопыленных семяпочек) (17-й – 18-й признаки), шт.	11,27 ± 0,45	9,88 ± 0,82
20	Число семяпочек, погибших во 2-й вегетационный период (число неоплодотворенных семяпочек), шт.	4,52 ± 0,87	5,24 ± 0,97
21	Общее число семян (22-й + 23-й признак) (число оплодотворенных семяпочек), шт.	17,64 ± 1,29	20,13 ± 1,67
22	Число полнозернистых семян, шт.	15,14 ± 1,1	16,58 ± 1,46
23	Число пустых семян, шт.	2,49 ± 0,42	3,55 ± 0,45
24	Выживаемость семяпочек в 1-й вегетационный период (18-й / 17-й признаки), %	64,61 ± 1,82	70,69 ± 2,94
25	Выживаемость семяпочек во 2-й вегетационный период (21-й / 18-й признаки), %	78,69 ± 3,8	78,14 ± 3,96
26	Выживаемость семяпочек за весь гаметофитный период (21-й / 17-й признаки), %	51,09 ± 2,96	55,86 ± 3,56
27	Выживаемость семяпочек в эмбриональный период (22-й / 21-й признак) (доля выполненных семян), %	86,56 ± 1,63	81,93 ± 2,07
28	Общая выживаемость семяпочек за гаметофитный и эмбриональный периоды (22-й / 17-й признаки), %	44,58	46,06
29	Масса 1000 шт. семян, г	5,41 ± 0,23	6,31 ± 0,20
30	Энергия прорастания семян, %	87,29 ± 2,48	85,50 ± 2,68
31	Абсолютная всхожесть семян, %	91,74 ± 1,91	90,67 ± 1,67
32	Доля проростков, имеющих семядоли на момент определения всхожести, %	75,84 ± 3,73	64,37 ± 6,35
33	Длина корешка проростков с семядолями, мм	14,44 ± 0,78	15,60 ± 1,08
34	Длина гипокотеля проростков с семядолями, мм	28,49 ± 0,56	31,39 ± 0,79
35	Число семядолей, шт.	5,58 ± 0,07	5,80 ± 0,07



**Рис. 4.** Факторная структура признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной в фоновых условиях (здесь и далее, номер признаков см. табл. 2): — положительная связь; ---- отрицательная связь; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; ----  $0,9 > r > 0,7$ ; -----  $r > 0,9$

**Fig. 4.** Factor structure of Scots pine female generative system traits under background conditions (hereinafter, trait number see Table 2): — positive relationship; ---- negative relationship; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; ----  $0,9 > r > 0,7$ ; -----  $r > 0,9$

Начало фертильного яруса фиксировали по появлению семенных чешуй с признаками развития семяпочек на первом и втором году: пустые и полные семена, недоразвитые семена (отделяющиеся или неотделяющиеся от семенной чешуи) размером более 1 мм. Удвоенное число фертильных семенных чешуй соответствовало исходному числу потенциально фертильных семяпочек [29–31]. По сумме пустых и полных семян определяли число оплодотворенных семяпочек. Число пустых семян соответствовало числу семяпочек, погибших в эмбриональный период развития. Число мелких недоразвитых семян свидетельствовало о количестве семяпочек, погибших на протяжении второго года развития [29, 31].

Абсолютную всхожесть и энергию прорастания семян определяли в трехкратной повторности согласно ГОСТ 13056.6–97 [32].

Корреляционные матрицы изученных признаков женской генеративной системы сосны, произрастающей в условиях разного уровня магнезитового загрязнения и фоновых условий, были обработаны методом факторного анализа с ис-

пользованием пакета программ Statistica 6.0 [33]. При проведении анализа во внимание принимали факторы с собственными значениями больше 1,0. При изучении состава факторов (далее Ф с порядковым номером фактора в зависимости от величины вклада в изменчивость признаков) обсуждали признаки, корреляции которых с соответствующим фактором по модулю превышали 0,5.

## Результаты и обсуждение

В условиях фона 1-й фактор (Ф1) вносит существенно больший вклад в изменчивость признаков (34,89%) (рис. 4). В его составе положительно сопряжены между собой и отрицательно с фактором такие признаки, как размеры и масса шишек (признаки 1, 2 и 4), размеры семенных чешуй и крылаток (признаки 6, 7 и 12, 13), число стерильных и общее число семенных чешуй (признаки 15, 16), число фертильных и опыленных семяпочек (признаки 17, 18), общее число семян (признак 21), число выполненных и пустых семян (признаки 22, 23), выживаемость семяпочек в 1-й, 2-й и весь гаметофитный период (признаки 24–26),

итоговая выживаемость семян (признак 28), длина корешка проростка (признак 33). Таким образом, в данных условиях произрастания размеры и масса шишек (признаки 1, 2 и 4) взаимосвязаны с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7) и их количеством (признаки 15, 16).

Размеры крылаток (признаки 12, 13) связаны с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7). Достоверная корреляция между потенциально фертильными (признак 17), опыленными (признак 18) и оплодотворенными (признак 21) семяпочками, числом выполненных семян (признаки 22) позволяет заключить, что потенциальные возможности шишек к формированию семян в фоновых условиях (ОУ-К) реализуются в полной мере. Выход семян (признаки 21, 22) прямо пропорционально связан с размерами шишек. Однако масса семян (признак 29) и показатели качества семян (ПКС) (признаки 30, 31) не зависят от количества семян в шишках (признаки 21, 22) и размеров шишек (признаки 1, 2 и 4). Общая выживаемость семяпочек (признак 28) и выход семян (признаки 21, 22) определяются в большей степени выживаемостью семяпочек на стадии гамет (признаки 24–26), чем на стадии эмбрионов (признак 27). Аналогичная система связей частично продублирована в Ф2 и дополнена признаками, характеризующими массу семян (признак 29) и их энергию прорастания (признак 30): чем интенсивнее отбор на стадии гамет, тем крупнее семена и выше энергия прорастания. Выживаемость семяпочек в эмбриональный период развития (признак 27) имеет малое количество связей с остальными признаками женской генеративной системы, может зависеть от выживаемости семяпочек в 1-й вегетационный период (Ф3) и определять длину гипокотыля проростка (Ф6). Всхожесть семян (признак 31) также достаточно обособлена от других признаков и взаимосвязана с энергией прорастания (Ф4) или варьирует независимо (Ф7). Признак, характеризующий число семядолей (признак 35), достоверно не связан ни с одним из изученных признаков (Ф5). В целом высокодостоверные связи между показателями, характеризующими развитие проростков и массу семян и их ПКС, не выявлены, поскольку данные признаки с высокими значениями факторных нагрузок (ФН) входят в состав разных факторов, что позволяет предположить несбалансированность постэмбрионального периода развития семени.

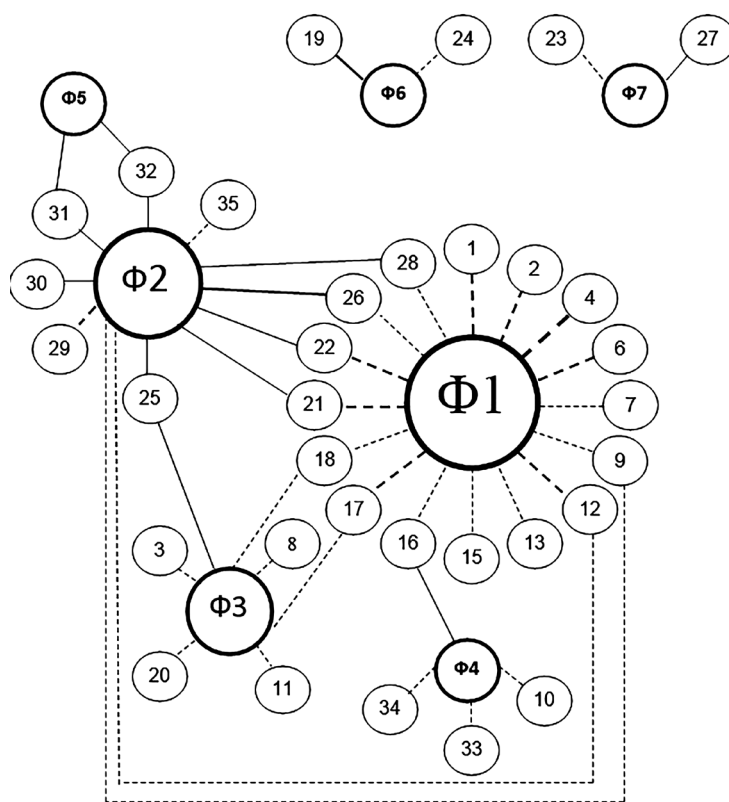
В условиях сильного загрязнения (ОУ-2) в составе Ф1 (28,99 % общей дисперсии) положительно сопряжены между собой и отрицательно с Ф1 такие признаки, как размеры и масса шишек (признаки 1, 2 и 4), размеры семенных чешуй, щитков и крылаток (признаки 6, 7, 9, 10, 12, 13), число стерильных и общее число семенных

чешуй (признаки 15, 16), а также число фертильных и опыленных семяпочек (признаки 17, 18), общее число семян (признак 21), число выполненных семян (признак 22), выживаемость семяпочек за весь гаметофитный период (признак 26), итоговая выживаемость семяпочек (признак 28) (рис. 5).

В условиях сильного загрязнения (ОУ-2), так же, как и в фоновых условиях (ОУ-К), размеры шишек и их масса (признаки 1, 2 и 4) взаимосвязаны и с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7), и с их количеством (признаки 15, 16).

Размеры крылаток (признаки 12, 13) связаны с размерами семенных чешуй (признаки 6, 7). Число опыленных, оплодотворенных (общее число семян), а также число выполненных семян связано с числом фертильных семяпочек, т. е. потенциальные возможности деревьев по формированию семян в данных условиях реализуются в полной мере.

Показатель, характеризующий число фертильных семяпочек, входит в состав двух факторов (Ф1 и Ф3) и в обоих с числом опыленных семяпочек коррелирует прямопропорционально, т. е. все деревья ОУ имеют однонаправленную связь данных показателей. Однако при увеличении числа опыленных семяпочек может увеличиваться как число оплодотворенных (выживаемость во 2-й вегетационный период увеличивается) (Ф1), так и неоплодотворенных семяпочек (выживаемость во 2-й вегетационный период уменьшается) (Ф3). Связь опыленных и оплодотворенных семяпочек более прочная (Ф1), вероятно, у большинства деревьев семяпочки, успешно прошедшие процесс опыления, в большинстве своем будут оплодотворены. Однако в обоих случаях результат отбора неопределенный — нет связи с качеством семян. Для части показателей, характеризующих число семян и выживаемость семяпочек состав Ф1 и Ф2 дублируется. Система связей не противоречит указанной выше, однако набор показателей дополняется показателями, характеризующими массу семян и их качество. Таким образом, в зоне сильного загрязнения отрицательная связь между семенной продуктивностью (числом полнозернистых семян и общим числом семян) и массой семян выходит на достоверно значимый уровень (Ф2). Это можно объяснить недостатком питательных веществ для деревьев, поскольку в данных условиях произрастания они сильно ослаблены, крона имеет высокую степень дефолиации, срок жизни хвои сокращен [34, 35]. Семена малой массы (она может составлять 2,38 г/1000 шт., что в 2,65 раза меньше чем средняя на участке ОУ-К) имеют высокие ПКС и формируют в лабораторных условиях к 15-му дню развитые проростки с высокой долей «семядольных» растений и малым числом семядолей. Связь показателей массы семян с числом семян и ПКС не повторяется в составе других факторов, что позволяет предположить



**Рис. 5.** Факторная структура признаков женской генеративной системы сосны обыкновенной в условиях сильного загрязнения: — положительная связь; --- отрицательная связь; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; -----  $0,9 > r > 0,7$ ; - - - - -  $r > 0,9$

**Fig. 5.** Factor structure of Scots pine female generative system traits in conditions of heavy pollution: — positive relationship; --- negative relationship; ----  $0,7 > r > 0,5$ ; -----  $0,9 > r > 0,7$ ; - - - - -  $r > 0,9$

однаправленную реакцию деревьев по данным показателям на условия произрастания. Длина сформированных проростков варьирует, однако соотношение длины корешка и гипокотиля прогнозируемо: чем больше длина корешка, тем больше длина гипокотиля, что следует из положительной корреляции этих показателей в составе Ф4. Вне зависимости от массы семени, имеющие высокие ПКС, формируют проростки большей длины, чем семена с малыми значениями ПКС (Ф5).

В данных условиях произрастания выживаемость семяпочек в 1-й вегетационный период не связана с какими-либо параметрами женской генеративной системы и находится в составе Ф6, с которым связана отрицательно. Выживаемость семяпочек в эмбриональный период также обособлена от других признаков и находится в составе Ф7.

### Выводы

1. Взаимосвязь признаков, характеризующих размеры и массу шишек сосны, жестко генетически детерминирована, так как не нарушается в условиях высокого уровня загрязнения.

2. Семенная продуктивность древостоев сосны находится в более тесной взаимосвязи с показателями выживаемости семяпочек в гаметофитный период, чем в период эмбрионального развития. В фоновых условиях выживаемость семяпочек в 1-й вегетационный и эмбриональный периоды сопряжены положительно, а в условиях загрязнения связь данных признаков отрицательная, что позволяет предположить существование эффективной элиминации аномальных гаметофитов и освобождение древостоя от них в условиях загрязнения.

3. Взаимосвязь между семенной продуктивностью и массой семян сосны отрицательная в условиях высокого загрязнения вследствие сильного ослабления деревьев и малой доступности элементов питания при высоком значении рН почвы, вызванном загрязнением магнетитовой пылью.

4. Структура связи показателей массы семян и их посевных качеств изменяется. Связь массы семян с энергией прорастания и всхожестью в фоновых условиях положительная, а в условиях сильного загрязнения — достоверно значимая отрицательная связь.

5. Структура связей между морфометрическими показателями и показателями массы и качества семян у проростков семян, сформированных в условиях загрязнения, изменяется. Длина корешка и гипокотила проростков семян, сформированных в фоновых условиях, не связано с их энергией прорастания, всхожестью и массой, а в условиях высокого загрязнения положительно связана с основными показателями качества и отрицательно — с их массой.

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

## Список литературы

- [1] Четвериков С.С. О некоторых моментах эволюционного процесса с точки зрения современной генетики // Журнал экспериментальной биологии, 1926. Сер. А. Т. 2. № 4. С. 3–54.
- [2] Безель В.С., Позолотина В.Н., Бельский Е.А., Жуйкова Т.В. Изменчивость популяционных параметров: адаптация к токсическим факторам среды // Экология, 2001. № 6. С. 447–453.
- [3] Жуйкова Т.В., Безель В.С. Адаптация растительных систем к химическому стрессу: популяционный аспект // Вестник Удмуртского университета, 2009. Вып. 1. С. 31–41.
- [4] Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 284 с.
- [5] Берг Р.Л. Экологическая интерпретация корреляционных плеяд // Вестник Ленинградского ун-та. Сер. Биология, 1959. Вып. 2. № 9. С. 142–152.
- [6] Яблоков А.В. Популяционная биология. М.: Высшая школа, 1978. 303 с.
- [7] Животовский Л.А. Интеграция полигенных систем в популяциях. Проблемы анализа комплекса признаков. М.: Наука, 1984. 183 с.
- [8] Батыгин Н.Ф. Онтогенез высших растений. М.: Агропромиздат, 1986. 100 с.
- [9] Анিকেев Д.Р. Сопряженная изменчивость и наследуемость признаков женской генеративной сферы сосны обыкновенной в условиях промышленного загрязнения // Лесоведение, 2000. № 4. С. 56–62.
- [10] Анিকেев Д.Р., Бабушкина Л.Г., Зуева Г.В. Состояние репродуктивной системы сосны обыкновенной при аэротехногенном загрязнении. Екатеринбург: Изд-во УГЛТА, 2000. 81 с.
- [11] Махнева С.Г., Бабушкина Л.Г., Зуева Г.В. Состояние мужской генеративной сферы сосны обыкновенной при техногенном загрязнении среды. Екатеринбург: Изд-во УГЛТА, 2003. 154 с.
- [12] Тихонова И.В. Морфологические признаки пыльцы в связи с состоянием деревьев сосны в сухой степи // Лесоведение, 2005. № 1. С. 63–69.
- [13] Тихонова И.В. Сопряженная изменчивость признаков генеративных органов сосны двух островных боров на юге средней Сибири // Хвойные бореальной зоны, 2007. № 4–5. С. 414–418.
- [14] Кузнецова Н.Ф., Машкина О.С. Реакция на стресс и ее последствие у сосны обыкновенной в онтогенезе и при смене поколений // Хвойные бореальной зоны, 2011. Т. 28. № 1–2. С. 83–90.
- [15] Ибрагимова Э.Э. Практические и методические подходы к использованию высших растений для оценки состояния окружающей среды // Человек — Природа — Общество: Теория и практика безопасности жизнедеятельности, экологии и валеологии, 2017. № 3 (10). С. 44–52.
- [16] Романова Л.И. Влияние техногенного загрязнения г. Красноярска на вегетативные органы естественных древостоев сосны обыкновенной // Хвойные бореальной зоны, 2018. Т. 36. № 5. С. 417–421.
- [17] Солдатова В.Ю., Самсонова А.П. Влияние урбосреды на изменчивость пыльцевых зерен березы повислой (*Betula pendula* Roth) (на примере г. Якутска) // Самарский научный вестник, 2019. Т. 8. № 3 (28). С. 80–84.
- [18] Менщиков С.Л. Исследование экологических особенностей роста и обоснование агротехники создания культур хвойных пород в условиях магnezитовых запылений: дис. канд. с.-х. наук: 06.03.01. Свердловск, 1985. 210 с.
- [19] Сродных Т.Б. Обоснование агротехники создания культур березы бородавчатой в условиях магnezитовых запылений на Южном Урале: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 06.03.02. Свердловск, 1986. 20 с.
- [20] Мохначев П.Е., Махнева С.Г., Потапенко А.М., Бартыш А.А., Клеткин А.А. Основные показатели качества семян сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), сформированных в условиях аэропромвыбросов разного химического состава // Леса России и хозяйство в них, 2023. № 3 (86). С. 65–73.
- [21] Завьялов К.Е., Менщиков С.Л., Мохначев П.Е., Кузьмина Н.А. Влияние аэротехногенных выбросов магnezитового производства на надземную фитомассу *Betula pendula* Roth в зависимости от плодородия почвы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 104–111. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-104-111
- [22] Makhniova S., Mokhnachev P.E., Ayan S. Seed germination and seedling growth of scots pine in technogenically polluted soils as container media // Environmental Monitoring and Assessment, 2019, t. 191, no. 2, p. 113.
- [23] Mohnachev P.E., Makhniova S.G., Menshchikov S.L., Zavyalov K.E. Quality of scots pine seeds formed under the conditions of aerotechnogenic emissions of large industrial centers of the Urals // AIP Conference Proceedings. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 030026.
- [24] Zavyalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E. Application of ameliorants for reclamation of technogenic-disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production // AIP Conference Proceedings. 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for Creating Drugs and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics Inc., 2021, p. 040024.
- [25] Менщиков С.Л., Кузьмина Н.А., Мохначев П.Е. Воздействие атмосферных выбросов магnezитового производства на почвы и снеговой покров // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2012. № 5(37). С. 221–223.
- [26] Кузьмина Н.А., Менщиков С.Л. Влияние аэротехногенных выбросов магnezитового производства на химический состав снеговой воды и почвы в динамике // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2015. № 6 (56). С. 192–196.
- [27] Кузьмина Н.А., Менщиков С.Л., Махнева С.Г., Завьялов К.Е., Мохначев П.Е. Уровень загрязнения снега и почвы в зонах поражения лесной растительности под воздействием выбросов магnezитового производства // Леса России и хозяйство в них, 2016. № 4(59). С. 49–55.
- [28] Kuzmina N., Menshchikov S.L., Mohnachev P., Zavyalov K.E., Petrova I.V., Ozel H.B., Aricak B. Change of aluminum concentrations in specific plants by species, organ, washing, and traffic density // BioResources, 2023, t. 18, no. 1, pp. 803–792.



- [29] Романовский М.Г., Хромова Л.В. Образование семян при самоопылении сосны обыкновенной // Лесоведение, 1992. № 5. С. 3–9.
- [30] Абатурова М.П., Духарев В.А., Рябконов С.М. Значение состояния семяпочки для опыления сосны обыкновенной // Лесоведение, 1997. № 1. С. 64–69.
- [31] Романовский М.Г. Формирование урожая семян сосны в норме и при мутагенном загрязнении. М.: Наука, 1997. 112 с.
- [32] ГОСТ-13056.6–97. Семена деревьев и кустарников. Методы определения всхожести. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. 27 с.
- [33] Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.
- [34] Завьялов К.Е., Менщиков С.Л., Мохначев П.Е., Кузьмина Н.А. Оценка повреждения опытных культур (*Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth, *Larix Sukaczewii* D.) в условиях загрязнения комбинатом «Магnezит» на Южном Урале // Леса России и хозяйство в них, 2016. № 4 (59). С. 35–41.
- [35] Zavyalov K., Menshikov S., Mohnachev P., Kuzmina N., Potapenko A., Ayan S. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Sukachyov's larch (*Larix Sukaczewii* Dylis), and silver birch (*Betula pendula* Roth.) to magnesite dust in Satkinsky industrial hub // Forestry Ideas, 2018, t. 24, no. 1, p. 23–36.

## Сведения об авторах

**Мохначев Павел Евгеньевич** — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., заведующий лабораторией экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», mohnachev74@mail.ru

**Махнева Светлана Георгиевна** — канд. биол. наук, ст. науч. сотр. лаборатории экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», makhniovasg@mail.ru

**Менщиков Сергей Леонидович** — д-р с.-х. наук, вед. науч. сотр. лаборатории экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения Российской академии наук», m.sergei1951@yandex.ru

**Поспелова Надежда Александровна** — науч. сотр. лаборатории экологии техногенных растительных сообществ, ФГБУН «Ботанический сад Уральского отделения РАН», yarkaya05@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2022.

Одобрено после рецензирования 08.02.2023.

Принята к публикации 15.04.2024.

## COVARIATION OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) FEMALE GENERATIVE SYSTEM SIGNS UNDER MAGNESITE POLLUTION

**P.E. Mokhnachev<sup>✉</sup>, S.G. Makhneva, S.L. Menshchikov, N.A. Pospelova**

Botanical Garden of the Ural Branch of the RAS, 202a, 8 Marta st., 620144, Yekaterinburg, Russia

mohnachev74@mail.ru

The study of the covariation of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) female generative system signs in conditions of aerotechnogenic pollution was carried out. Traits with a stable relationship and changing under the influence of aerotechnogenic pollution have been identified. It was found that the relationship of traits characterizing the size and cones weight is strictly genetically determined and is not violated under conditions of high pollution level. Seed productivity of pine stands, regardless of growing conditions, is more closely related to seedpod survival rates in the gametophytic period than in the period of embryonic development. It has been shown that in conditions of severe pollution, the association of ovule survival in the 1st vegetative and embryonic periods is negative, which may indicate the effective elimination of abnormal gametophytes and the liberation of the stand from them in conditions of pollution. In addition, conditions of heavy pollution «contributed» the development of tree strategy for the formation of small seeds with high sowing rates and the quality of seedlings developed from them — only in these growing conditions, with a decrease in seed weight, germination energy and germination and morphometric parameters of seedlings are significantly increased.

**Keywords:** conjugate variability, generative system, seed quality, Scots pine, aerotechnogenic pollution

**Suggested citation:** Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Menshchikov S.L., Pospelova N.A. *Sopryazhennaya izmenchivost' priznakov zhenskoy generativnoy sistemy sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v usloviyakh magnezitovogo zagryazneniya* [Covariation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) female generative system signs under magnesite pollution]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2024, vol. 28, no. 3, pp. 37–47.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2024-3-37-47

## References

- [1] Chetverikov S.S. *O nekotorykh momentakh evolyutsionnogo protsessa s tochki zreniya sovremennoy genetiki* [On some aspects of the evolutionary process from the point of view of modern genetics]. Zhurnal eksperimental'noy biologii [Journal of Experimental Biology], 1926, ser. A., v. 2, no. 4, pp. 3–54.
- [2] Bezel' V.S., Pozolotina V.N., Bel'skiy E.A., Zhuykova T.V. *Izmenchivost' populyatsionnykh parametrov: adaptatsiya k toksicheskim faktoram sredy* [Variation in Population Parameters: Adaptation to Toxic Environmental Factors]. Ekologiya [Russian Journal of Ecology], 2001, v. 32, no. 6, pp. 413–419.
- [3] Zhuykova T.V., Bezel' V.S. *Adaptatsiya rastitel'nykh sistem k khimicheskomu stressu: populyatsionnyy aspekt* [Adaptation of plant systems to chemical stress: population aspect]. Vestnik Udmurtskogo universiteta [Bulletin of the Udmurt University], 2009, v. 1, pp. 31–41.
- [4] Mamaev S.A. *Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy* [Forms of intraspecific variability of woody plants]. Moscow: Nauka, 1973, 284 p.
- [5] Berg R.L. *Ekologicheskaya interpretatsiya korrelyatsionnykh pleyad* [Ecological interpretation of correlation pleiades]. Vestnik Leningradskogo Universiteta. Ser. Biologiya [Bulletin of Leningrad University. Ser. Biology], 1959, v. 2, no. 9, pp. 142–152.
- [6] Yablokov A.V. *Populyatsionnaya biologiya* [Population biology]. Moscow: Higher School [Graduate School], 1978, 303 p.
- [7] Zhivotovskiy L.A. *Integratsiya poligennykh sistem v populyatsiyakh. Problemy analiza kompleksa priznakov* [Integration of polygenic systems in populations]. Problemy analiza kompleksa priznakov [Problems of the analysis of a complex of signs]. Moscow: Nauka, 1984, 183 p.
- [8] Batygin N.F. *Ontogenez vysshikh rasteniy* [Ontogeny of higher plants]. Moscow: Agropromizdat, 1986, 100 p.
- [9] Anikeev D.R. *Sopryazhennaya izmenchivost' i nasleduemost' priznakov zhenskoj generativnoy sfery sosny obyknovennoy v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya* [Conjugate variability and heritability of signs of the female generative sphere of Scots pine in conditions of industrial pollution]. Lesovedenie [Forestry], 2000, no. 4, pp. 56–62.
- [10] Anikeev D.R., Babushkina L.G., Zueva G.V. *Sostoyanie reproduktivnoy sistemy sosny obyknovennoy pri aerotekhnogenom zagryaznenii* [The state of the reproductive system of Scotch pine under aerotechnogenic pollution]. Ekaterinburg: Ural Stat Forest Engineering University, 2000, 81 p.
- [11] Makhneva S.G., Babushkina L.G., Zueva G.V. *Sostoyanie muzhskoy generativnoy sfery sosny obyknovennoy pri tekhnogenom zagryaznenii sredy* [The state of the male generative sphere of Scotch pine under technogenic pollution of the environment]. Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2003, 154 p.
- [12] Tikhonova I.V. *Morfologicheskie priznaki pyl'tsy v svyazi s sostoyaniem derev'ev sosny v sukhoy stepi* [Morphological features of pollen in connection with the state of pine trees in the dry steppe]. Lesovedenie [Forestry], 2005, no. 1, pp. 63–69.
- [13] Tikhonova I.V. *Sopryazhennaya izmenchivost' priznakov generativnykh organov sosny dvukh ostrovnykh borov na yuge sredney Sibiri* [Conjugate variability of signs of generative organs of pine of two island forests in the south of Central Siberia]. Khvoynye boreal'noy zony [Coniferous boreal zones], 2007, no. 4–5, pp. 414–418.
- [14] Kuznetsova N.F., Mashkina O.S. *Reaktsiya na stress i ee posledeystvie u sosny obyknovennoy v ontogeneze i pri smene pokoleniy* [Stress response and its aftereffect in Scots pine in ontogenesis and during generational change]. Khvoynye boreal'noy zony [Coniferous boreal zones], 2011, v. 28, no. 1–2, pp. 83–90.
- [15] Ibragimova E.E. *Prakticheskie i metodicheskie podkhody k ispol'zovaniyu vysshikh rasteniy dlya otsenki sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Practical and methodological approaches to the use of higher plants to assess the state of the environment]. Chelovek — Priroda — Obshchestvo: Teoriya i praktika bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti, ekologii i valeologii [Man — Nature — Society: Theory and practice of life safety, ecology and valeology], 2017, no. 3 (10), pp. 44–52.
- [16] Romanova L.I. *Vliyaniye tekhnogenogo zagryazneniya g. Krasnoyarska na vegetativnyye organy estestvennykh drevostoev sosny obyknovennoy* [The influence of technogenic pollution of Krasnoyarsk on the vegetative organs of natural stands of Scots pine]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2018, t. 36, no. 5, pp. 417–421.
- [17] Soldatova V.Yu., Samsonova A.P. *Vliyaniye urbosredy na izmenchivost' pyl'tsevnykh zeren berezy povisloy (Betula pendula Roth) (na primere g. Yakutsk)* [The influence of the urban environment on the variability of pollen grains of the hanging birch (*Betula pendula* Roth) (on the example of Yakutsk)]. Samarskiy nauchnyy vestnik [Samara Scientific Bulletin], 2019, v. 8, no. 3 (28), pp. 80–84.
- [18] Menshchikov S.L. *Issledovanie ekologicheskikh osobennostey rosta i obosnovanie agrotekhniki sozdaniya kul'tur khvoynnykh porod v usloviyakh magnezitovykh zapyleniy* [Research of ecological features of growth and substantiation of agrotechnics of creation of cultures of coniferous breeds in the conditions of magnesite dusting]. Dis. Cand. Sci (Agric.), 06.03.01. Sverdlovsk, 1985, 210 p.
- [19] Srodnykh T.B. *Obosnovanie agrotekhniki sozdaniya kul'tur berezy borodavchatoy v usloviyakh magnezitovykh zapyleniy na Yuzhnom Urale* [Substantiation of agricultural technology for the creation of cultures of warty birch in conditions of magnesite dusting in the Southern Urals]. Dis. Cand. Sci. (Biol.), 06.03.02. Sverdlovsk, 1986, 20 p.
- [20] Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Potapenko A.M., Bartyshev A.A., Kletkin A.A. *Osnovnye pokazateli kachestva semyan sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.), sformirovannykh v usloviyakh aeropromvybrosov raznogo khimicheskogo sostava* [The main quality indicators of Scots pine seeds (*Pinus sylvestris* L.) formed under conditions of aeroprom emissions of different chemical composition]. Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh [Forests of Russia and their economy], 2023, no. 3 (86), pp. 65–73.
- [21] Zav'yalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E., Kuz'mina N.A. *Vliyaniye aerotekhnogennykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na nadzemnyuyu fitomassu Betula pendula Roth v zavisimosti ot plodorodiya pochvy* [Magnesite production aerotechnogenic emissions impact on the elevated phytomass *Betula pendula* Roth depending on soil fertility]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 104–111. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-104-111
- [22] Makhneva S., Mokhnachev P.E., Ayan S. *Seed germination and growth of scots pine seedlings in technogenically polluted soils as container media. Environmental monitoring and assessment*, 2019, v. 191, no. 2, p. 113.
- [23] Mokhnachev P.E., Makhneva S.G., Menshchikov S.L., Zav'yalov K.E. *The quality of scots pine seeds formed under conditions of aerotechnogenic emissions from large industrial centers of the Urals // Materials of the AIP conference. The 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for the Creation of Medicines and Functional Materials, MOSM 2020. American Institute of Physics, Inc., 2021, no. 030026.*

- [24] Zavyalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E. The use of meliorants for the reclamation of technogenically disturbed lands by aerotechnogenic emissions of magnesite production. Proceedings of the AIP conference. The 4th International Conference on Modern Synthetic Methodologies for the creation of drugs and functional materials, MOSM 2020, American Institute of Physics, 2021, no. 040024.
- [25] Menshchikov S.L., Kuz'mina N.A., Mokhnachev P.E. *Vozdeystvie atmosferykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na pochvy i snegovoy pokrov* [Impact of atmospheric emissions from magnesite production on soils and snow cover]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of the Orenburg State Agrarian University], 2012, no. 5(37), pp. 221–223.
- [26] Kuz'mina N.A., Menshchikov S.L. *Vliyanie aerotekhnogenykh vybrosov magnezitovogo proizvodstva na khimicheskiy sostav snegovoy vody i pochvy v dinamike* [Influence of aerotechnogenic emissions of magnesite production on the chemical composition of snow water and soil in dynamics]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of the Orenburg State Agrarian University], 2015, no. 6 (56), pp. 192–196.
- [27] Kuz'mina N.A., Menshchikov S.L., Makhneva S.G., Zav'yalov K.E., Mokhnachev P.E. *Uroven' zagryazneniya snega i pochvy v zonakh porazheniya lesnoy rastitel'nosti pod vozdeystviem vybrosov magnezitovogo proizvodstva* [The level of pollution of snow and soil in the areas affected by forest vegetation under the influence of emissions from magnesite production]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Urals and agriculture in them], 2016, no. 4(59), pp. 49–55.
- [28] Kuzmina N., Menshchikov S.L., Mohnachev P., Zavyalov K.E., Petrova I.V., Ozel H.B., Aricak B. Change of aluminum concentrations in specific plants by species, organ, washing, and traffic density. *BioResources*, 2023, t. 18, no. 1, pp. 803–792.
- [29] Romanovskiy M.G., Khromova L.V. *Obrazovanie semyan pri samoopylenii sosny obyknovnoy* [Seed formation during self-pollination of Scotch pine]. *Lesovedenie*, 1992, no. 5, pp. 3–9.
- [30] Abaturova M.P., Dukharev V.A., Ryabokon' S.M. *Znachenie sostoyaniya semyapochki dlya opyleniya sosny obyknovnoy* [The value of the state of the ovule for pollination of Scotch pine]. *Lesovedenie*, 1997, no. 1, pp. 64–69.
- [31] Romanovskiy M.G. *Formirovaniye urozhaya semyan sosny v norme i pri mutagenom zagryaznenii* [Formation of pine seed yield in normal conditions and with mutagenic contamination]. Moscow: Nauka, 1997, 112 p.
- [32] GOST-13056.6–97. *Semena derev'ev i kustarnikov. Metody opredeleniya vskhozhnosti* [Seeds of trees and shrubs. Germination methods]. Minsk: Mezhgosudarstvennyy sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 1998, 27 p.
- [33] Khalafyan A.A. *Statistika 6. Statisticheskiy analiz dannykh* [Statistical data analysis]. Moscow, 2007, 512 p.
- [34] Zav'yalov K.E., Menshchikov S.L., Mokhnachev P.E., Kuz'mina N.A. *Otsenka povrezhdeniya opytnykh kul'tur (Pinus sylvestris L., Betula pendula Roth, Larix Sukaczewii D.) v usloviyakh zagryazneniya kombinatom «Magnezit» na Yuzhnom Urale* [Assessment of damage to experimental crops (*Pinus sylvestris* L., *Betula pendula* Roth, *Larix Sukaczewii* D.) under conditions of pollution by the Magnezit plant in the South Urals]. *Les Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Urals and agriculture in them], 2016, no. 4 (59), pp. 35–41.
- [35] Zavyalov K., Menshchikov S., Mohnachev P., Kuzmina N., Potapenko A., Ayan S. Response of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), Sukachyov's larch (*Larix Sukaczewii* Dylis), and silver birch (*Betula pendula* Roth.) to magnesite dust in Satkinsky industrial hub. *Forestry Ideas*, 2018, t. 24, no. 1, p. 23–36.

*The work was carried out under the state assignment of the Botanical Garden of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.*

## Authors' information

**Mokhnachev Pavel Evgen'evich**✉ — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Head of Laboratory Ecology Laboratory of technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, mohnachev74@mail.ru

**Makhneva Svetlana Georgievna** — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Ecology technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, makhniovasg@mail.ru

**Menshchikov Sergey Leonidovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Leading Researcher, Laboratory of Ecology technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, m.sergei1951@yandex.ru

**Pospelova Nadezhda Aleksandrovna** — Researcher, Laboratory of Ecology technogenic plant communities, Russian Academy of Sciences, Ural Branch: Institute Botanic Garden, yarkaya05@mail.ru

Received 07.11.2022.

Approved after review 08.02.2023.

Accepted for publication 15.04.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest