

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЯДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ ЕЛИ В ПОВРЕЖДЕННЫХ КОРЕЕДОМ-ТИПОГРАФОМ ДРЕВОСТОЯХ ПОДМОСКОВЬЯ

А.В. Лебедев, Д.Ю. Гостева✉

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»  
(РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева), Россия, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

d.gosteva@rgau-msha.ru

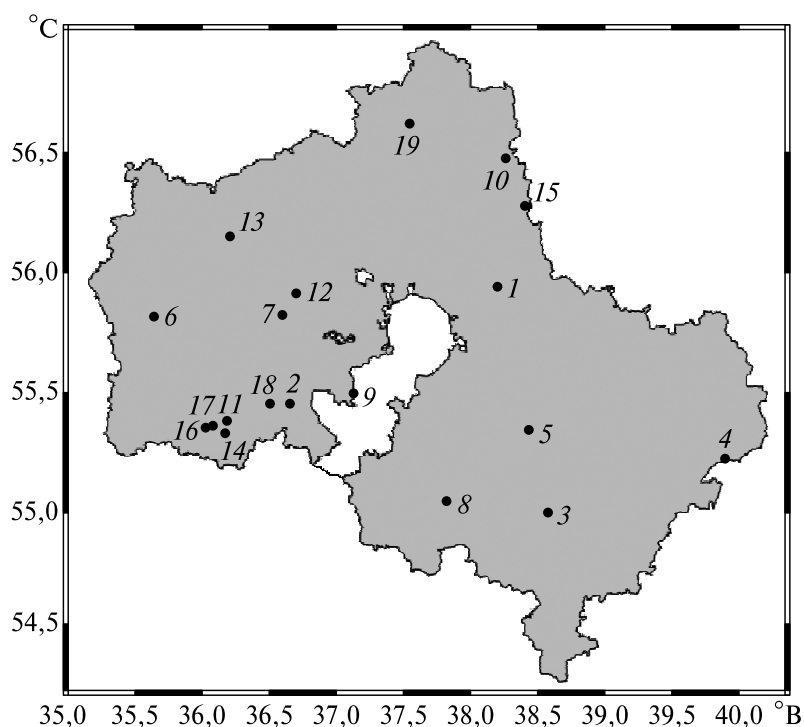
Представлены данные 19 пробных площадей, заложенных в еловых насаждениях Московской области. Применено трехпараметрическое уравнение Вейбулла и моментный метод восстановления параметров для построения модели распределения деревьев ели (*Picea abies*) по толщине в древостоях, поврежденных короедом-типографом (*Ips typographus*). При анализе использованы методы описательной статистики (расчет центральных моментов распределения) и регрессионный анализ. Выявлена согласованность между описательными статистиками рядов распределения деревьев по толщине для всего древостоя и для сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев, что указывает на возможность их совместного использования для построения обобщенной модели. В качестве входных таксационных переменных модели определены среднеквадратический диаметр и средняя категория состояния. На их основании показано предсказание распределения по толщине общего количества деревьев (1–5 категории состояния) и отдельно сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев (3–5 категории состояния). Установлено, что распределение деревьев 3–5 категорий состояния отражает структуру патологического отпада, что позволяет оценивать объемы санитарно-оздоровительных мероприятий (выборочные и сплошные санитарные рубки) в еловых древостоях.

**Ключевые слова:** распределение деревьев по толщине, распределение Вейбулла, средняя категория состояния, еловые древостои, короед-типограф, Московская область

**Ссылка для цитирования:** Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Моделирование рядов распределения деревьев ели в поврежденных короедом-типографом древостоях Подмоскovie // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 3. С. 5–16. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-3-5-16

Усыхание еловых лесов в различных частях ареала имеет определенную цикличность, а непосредственной причиной этого явления выступают вспышки массового размножения короеда-типографа в спелых и перестойных насаждениях [1, 2]. В качестве причин усыхания еловых лесов выделяют также создание лесных культур в непригодных условиях произрастания, упрощенную структуру искусственных лесов, климатические изменения [3–6]. Насаждения с господством ели в Московской области на протяжении 2000–2020 гг. занимают от 20 до 25 % лесопокрытой площади [7, 8] и имеют большое экологическое и ресурсное значение [9]. Еловые леса Подмоскovie нуждаются в мероприятиях по повышению биологической устойчивости и улучшению санитарного состояния [10], а проводимые в регионе в последнее время санитарно-оздоровительные мероприятия сводятся главным образом к сплошным санитарным рубкам [11].

Изучению структуры еловых древостоев Московской области посвящены многие исследования [8, 12–14], в которых рассматриваются закономерности распределения растущих деревьев по толщине, приводятся основные типы форм кривых распределения и показана их связь с устойчивостью ельников. Структура отмирающей части еловых древостоев пока изучена недостаточно. Особенности распределения деревьев отпада в еловых древостоях по естественным ступеням толщины были выявлены В.А. Вагиным [15]. В условиях накопления спелых и перестойных еловых насаждений на землях лесного фонда Московской области и периодических вспышек усыхания ельников актуальность приобретает изучение таксационной структуры древостоев, поврежденных короедом-типографом, что имеет важное значение при назначении санитарно-оздоровительных мероприятий (выборочных и сплошных санитарных рубок).



**Рис. 1.** Расположение пробных площадей на территории Московской области (номера пробных площадей соответствуют приведенным в табл. 1)

**Fig. 1.** Location of trial plots in the Moscow region (trial plot numbers correspond to table 1)

## Цель работы

Цель работы — разработка модели распределения деревьев ели (*Picea abies* (L.) Н.Карст.) по толщине в поврежденных короедом-типографом (*Ips typographus* Linnaeus) лесных насаждениях Подмосковья.

## Материалы и методы

В исследовании использованы данные 19 пробных площадей, заложенных в хвойных насаждениях Московской области (рис. 1), еловые древостои которых характеризуются средними категориями состояния от ослабленных до погибших. Пробные площади прямоугольной конфигурации (0,25...0,5 га) закладывались на участках с повреждениями ели короедом-типографом. На них был проведен сплошной перебор деревьев по отдельным ступеням толщины и породам с определением категорий санитарного состояния по критериям, обозначенным в Постановлении Правительства Российской Федерации от 09 декабря 2020 года № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах». После перебора у модельных деревьев измеряли диаметр стволов и высоту, определяли возраст с помощью возрастного бурава. Такса-

ционные показатели древостоев определяли в соответствии с общепринятыми в лесной таксации методами: запас — по объемным таблицам, относительную полноту — по таблицам стандартных значений сумм площадей сечений, класс бонитета — по бонитировочным шкалам для групп древесных пород [16].

Составлена сводная таксационная характеристика древостоев (табл. 1). Древостои — смешанные, в основном с преобладанием ели, возраст — от 45 до 120 лет, относительная полнота — от 0,2 до 0,6 ед., преобладающий класс бонитета — I. Запас древесины на 1 га составляет от 104 до 419 м<sup>3</sup>. Типы леса, в которых заложены пробные площади — ельник сложный широколиственный, ельник черничный широколиственный, ельник черничный мелколиственный — являются типичными для произрастания высокопродуктивных ельников в зоне хвойно-широколиственных лесов европейской части России. Древостои пробных площадей, как правило, имеют упрощенную структуру, что указывает на их пониженную биологическую устойчивость [13].

Для построения моделей распределения деревьев по толщине широкое распространение получило трехпараметрическое уравнение Вейбулла, которое характеризуется высокой гибко-

Т а б л и ц а 1

**Таксационная характеристика древостоев пробных площадей**

**Forest stand indicators of trial plots**

Номер пробной площади	Формула состава	Возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр ствола, см	Полнота, ед.	Класс бонитета	Тип леса	Запас древесины, м <sup>3</sup> /га
1	4Е2Е1С2Б1ОС	80	24	24	0,5	1	ЕСЛШ	261
2	5Е2Б2С1ОС	90	26	26	0,5	1	ЕСЛШ	340
3	6Е4Б+ИВД	45	22	30	0,5	1а	ЕСЛШ	283
4	5Е4С1Б	95	26	30	0,5	1	ЕЧРМ	304
5	8С2Е+Б	79	28	24	0,5	1	ЕСЛШ	360
6	5Е3ОС1Б1С	85	26	32	0,5	1	ЕЧРШ	306
7	6ЕЗБ1ОС	95	30	30	0,2	1	ЕЧРШ	146
8	8Е1С1Б+Е	85	26	32	0,6	1	ЕСЛШ	379
9	5Е5Б	59	25	26	0,6	1а	ЕСЛШ	401
10	6Е3ОС1Б+ОЛС	95	28	30	0,5	1	ЕСЛШ	325
11	5Е2ОС2Б1С	100	28	34	0,6	1	ЕЧРШ	402
12	5Е3ОС2Б	110	28	26	0,4	1	ЕСЛШ	340
13	8Е1Б1ОС+ОЛС	95	27	38	0,6	1	ЕЧРШ	380
14	8Е1Б1ОС	80	26	29	0,6	1	ЕЧРШ	380
15	6Е1С3Б+ОС	80	27	28	0,6	1	ЕСЛШ	369
16	8Е1Б1ОС	120	31	36	0,5	1	ЕЧРШ	419
17	6Е3ОС1Б	85	27	24	0,6	1	ЕЧРШ	372
18	7Е2Б1ОС	85	27	24	0,2	1	ЕСЛШ	104
19	4Е2Е2Б2ОС+С	95	29	34	0,4	1	ЕСЛШ	309

*Примечание.* Е — ель, С — сосна, Б — береза, ОС — осина, ИВД — ива древовидная, ОЛС — ольха серая, ЕСЛШ — ельник сложный широколиственный, ЕЧРШ — ельник черничный широколиственный, ЕЧРМ — ельник черничный мелколиственный.

стью прогнозируемых кривых, а его параметры имеют биологическую интерпретацию [17–21].

Функция распределения (1) и плотности вероятности (2) записываются в следующем виде:

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x-a}{b} \right)^c \right]; \quad x \geq 0; b, c > 0, \quad (1)$$

$$f(x) = \left( \frac{c}{b} \right) \left( \frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{x-a}{b} \right)^c \right];$$

$$x \geq 0; b, c > 0, \quad (2)$$

где  $x$  — диаметр на высоте груди, см;

$a$  — параметр смещения;

$b$  — параметр масштаба;

$c$  — параметр формы.

Известно большое количество методов для оценки параметров распределения Вейбулла: максимального правдоподобия, наименьших квадратов, моментов, восстановления параметров и др. [21–24]. При моделировании распределения деревьев по толщине часто применяется моментный метод восстановления параметров, который обеспечивает равенство фактического и прогнозируемого по модели

таксационного диаметра стволов древостоя [23, 25, 26]. С помощью этого метода при известном среднеквадратическом диаметре стволов древостоя вычисление параметров рядов распределения осуществляется по следующему алгоритму:

1) оценка размаха варьирования диаметров стволов деревьев в древостое:

$$d_{\min} = (b_0 + b_1) \times QMD, \quad (3)$$

$$d_{\max} = (b_0 + b_1) \times QMD, \quad (4)$$

где  $d_{\min}$  — минимальный диаметр ствола, соответствующий параметру  $a$  трехпараметрической функции Вейбулла, см;

$d_{\max}$  — максимальный диаметр ствола, см;

$b_0$  и  $b_1$  — эмпирические коэффициенты;

2) оценка первого и второго моментов рядов распределения деревьев по толщине:

$$m_1 = (b_0 + b_1) \times QMD; \quad (5)$$

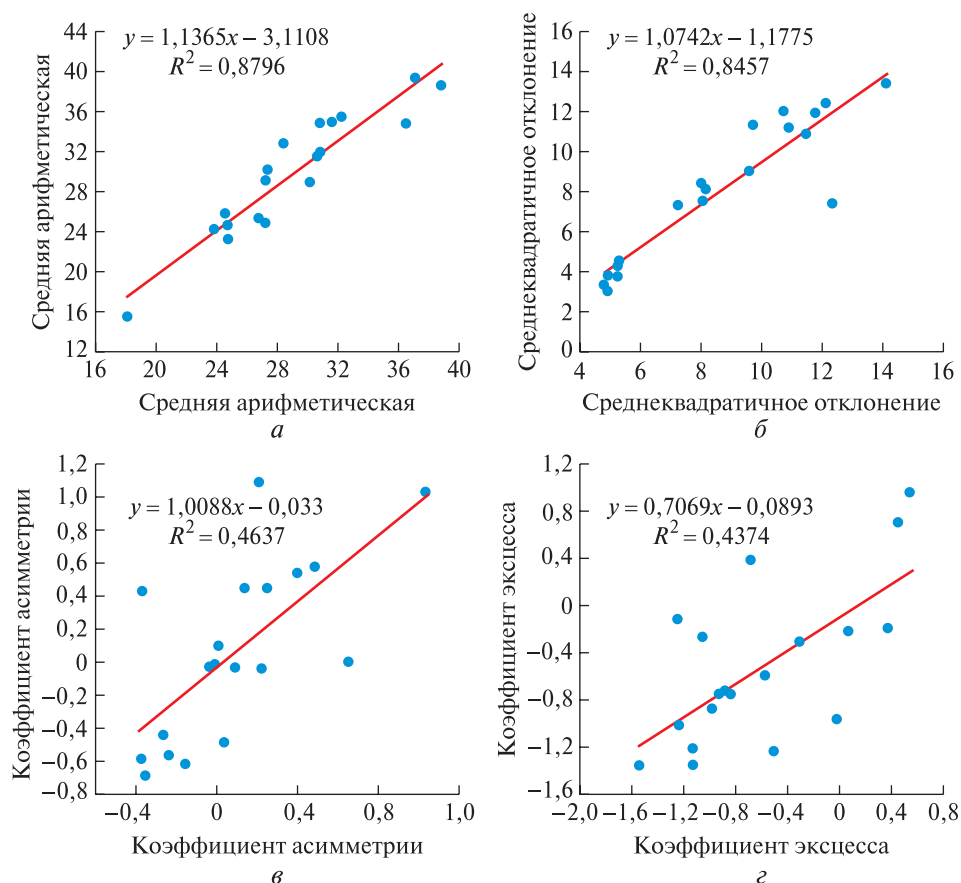
$$m_2 = QMD^2 - m_1^2, \quad (6)$$

где  $m_1$  — первый центральный момент, см;

$m_2$  — второй центральный момент, см<sup>2</sup>;

$QMD$  — среднеквадратический диаметр, см;

$b_0$  и  $b_1$  — эмпирические коэффициенты;



**Рис. 2.** Зависимость между центральными моментами рядов распределения сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев ели (вертикальная ось) от центральных моментов рядов распределения деревьев елового древостоя (горизонтальная ось): *a* — средняя арифметическая; *b* — среднеквадратическое отклонение; *v* — коэффициент асимметрии; *z* — коэффициент эксцесса

**Fig. 2.** Relationship between the central moments of distributions of severely weakened, dying and dead spruce trees (vertical axis) and the central moments of distributions of spruce stand trees (horizontal axis): *a* — arithmetic mean; *b* — standard deviation; *v* — skewness coefficient; *z* — excess coefficient

3) итеративный поиск параметра *c* трехпараметрической функции Вейбулла из уравнения

$$\frac{(m_1 - a)^2}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right)} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right) \right] - m_2 = 0, \quad (7)$$

где  $m_1$  — первый центральный момент, см;  
 $m_2$  — второй центральный момент, см<sup>2</sup>;  
*a* — параметр смещения;  
*c* — параметр формы;  
 $\Gamma(\cdot)$  — гамма-функция;

4) вычисление параметра *b* трехпараметрической функции Вейбулла

$$b = \frac{m_1 - a}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right)}, \quad (8)$$

где *b* — параметр масштаба;  
*a* — параметр смещения;  
*c* — параметр формы;  
 $m_1$  — первый центральный момент, см;  
 $\Gamma(\cdot)$  — гамма-функция.

Для моделирования рядов распределения деревьев ели в поврежденных короедом-типографом древостоях отдельно были рассчитаны вспомогательные регрессионные уравнения для определения параметров функции Вейбулла всего древостоя и отдельно для деревьев 3–5 категорий санитарного состояния — сильно ослабленных, усыхающих и погибших. Качество прогнозов по модели оценивалось с помощью таких метрик, как среднеквадратическая ошибка (*MSE*), квадратный корень из среднеквадратической ошибки (*RMSE*), средняя абсолютная ошибка (*MAE*), среднее смещение

Т а б л и ц а 2

**Уравнения связи для моделирования рядов распределения деревьев ели по толщине**  
**Equations for modeling the distribution of spruce trees by thickness**

Параметр	Оценка	<i>t</i> -статистика	<i>p</i> -значение	Коэффициент детерминации <i>R</i> <sup>2</sup>	<i>F</i> -статистика	<i>p</i> -значение
$D = (b_0 + b_1) \times QMD$						
<i>b</i> <sub>0</sub>	-0,1456	-0,13	0,89	0,976	692,5	< 0,001
<i>b</i> <sub>1</sub>	0,9594	26,32	< 0,001			
$D_{\min} = (b_0 + b_1) \times QMD$						
<i>b</i> <sub>0</sub>	3,8127	0,59	0,56	0,107	2,0	0,17
<i>b</i> <sub>1</sub>	0,3005	1,43	0,17			
$D_{\max} = (b_0 + b_1) \times QMD$						
<i>b</i> <sub>0</sub>	8,8129	0,78	0,45	0,442	13,5	0,002
<i>b</i> <sub>1</sub>	1,3478	3,67	< 0,001			
$QMD_{345} = (b_0 + b_1) \times QMD$						
<i>b</i> <sub>0</sub>	-4,0566	-1,44	0,17	0,904	160,9	< 0,001
<i>b</i> <sub>1</sub>	1,1566	12,68	< 0,001			
$D_{345} = (b_0 + b_1) \times QMD_{345}$						
<i>b</i> <sub>0</sub>	0,0159	0,02	0,99	0,984	1046,1	< 0,001
<i>b</i> <sub>1</sub>	0,9598	32,34	< 0,001			
$\ln(P) = (b_0 + b_1) \times \ln(CKC - 1)$						
<i>b</i> <sub>0</sub>	3,4147	27,66	< 0,001	0,643	30,6	< 0,001
<i>b</i> <sub>1</sub>	0,8295	5,53	< 0,001			

*Примечание.* *QMD* — средний квадратический диаметр елового древостоя, см; *QMD*<sub>345</sub> — средний квадратический диаметр сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев, см; *D* — средний арифметический диаметр елового древостоя, см; *D*<sub>345</sub> — средний арифметический диаметр сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев, см; *D*<sub>min</sub> — минимальный диаметр деревьев в древостое, см; *D*<sub>max</sub> — максимальный диаметр деревьев в древостое, см; *CKC* — средняя категория санитарного состояния елового древостоя; *P* — доля сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев от общего количества деревьев елового древостоя, %; *b*<sub>0</sub> и *b*<sub>1</sub> — эмпирические коэффициенты.

ние ошибок (*MBE*) [27, 28], рассчитанных для значений частот, выраженных в процентах, по 4-сантиметровым ступеням толщины. В ходе анализа данных применяли методы описательной статистики (расчет центральных моментов распределения), регрессионный анализ. Статистические выводы сделаны при *p* = 0,05.

**Результаты и обсуждение**

Описательные статистики (центральные моменты) рядов распределения деревьев ели по толщине для всего древостоя и для сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев имеют тесную связь (рис. 2). Наиболее сильно связаны средние арифметические (первый центральный момент) и средние квадратические (второй центральный момент) значения. Линейная зависимость между ними характеризуется высокими коэффициентами детерминации (*R*<sup>2</sup> > 0,8). Меньшая согласованность прослеживается между показателями, отражающими форму ряда распределения: коэффициентами асимме-

три (третий центральный момент) и эксцесса (четвертый центральный момент). Для первых из них линейный тренд имеет *R*<sup>2</sup> = 0,46, а для вторых — *R*<sup>2</sup> = 0,44.

Все уравнения регрессии (см. рис. 2) являются статистически значимыми при *p* < 0,05. Угловые коэффициенты линейных уравнений (*p* < 0,05) показывают, что средний арифметический диаметр части елового древостоя 3–5 категорий санитарного состояния в среднем выше в 1,13 раза по сравнению со средним арифметическим диаметром, рассчитанным для всех деревьев 1–5 категорий, а по форме ряды их распределения (деревья 3–5 категорий) имеют значения эксцесса в 0,7 раза меньше. Выявленная согласованность между отдельными описательными статистиками рядов распределения деревьев ели по толщине для всего древостоя и для сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев указывает на возможность их совместного использования для построения обобщенной модели на основании трехпараметрической функции Вейбулла.

**Метрики качества прогнозирования рядов распределения (%)  
деревьев ели по ступеням толщины**

**Quality metrics of forecasting the distribution (in %) of spruce trees by thickness grades**

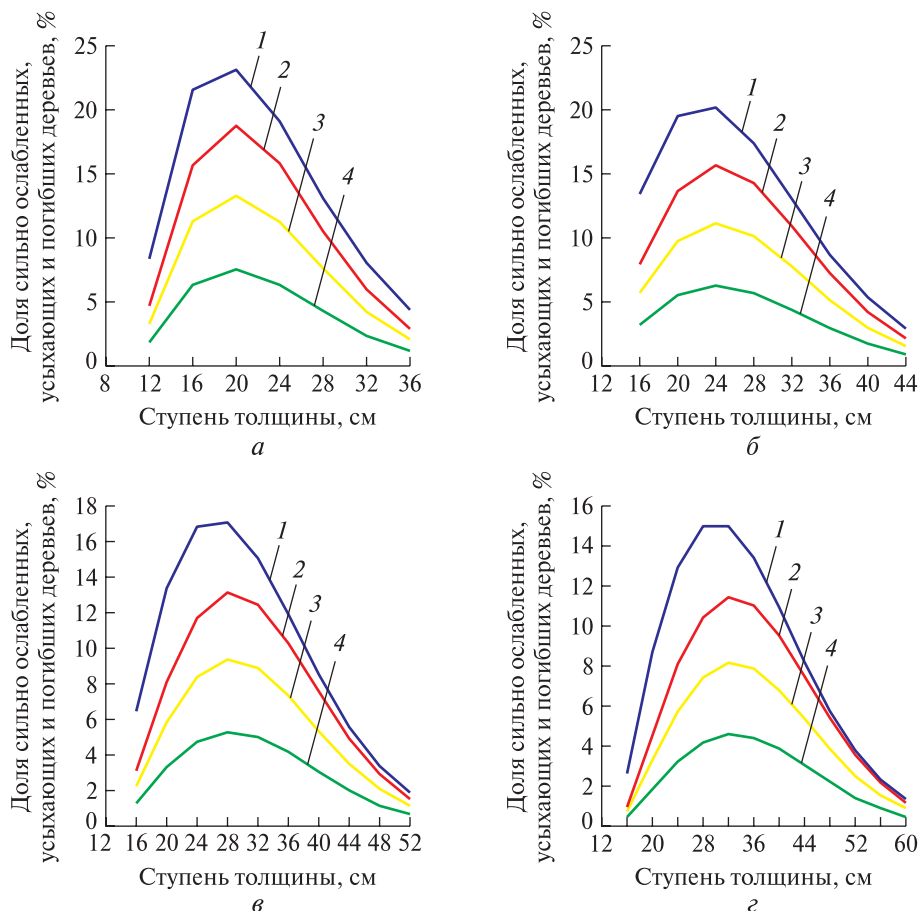
Номер пробной площади	Еловый древостой (1–5 категории состояния)				Сильно ослабленные, усыхающие и погибшие деревья (3–5 категории состояния)			
	<i>MSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>MBE</i>	<i>MSE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MAE</i>	<i>MBE</i>
1	75,91	8,71	6,01	0,00	77,26	8,79	6,74	0,00
2	105,39	10,27	7,36	0,00	24,10	4,91	3,79	0,00
3	92,25	9,60	7,83	0,00	251,75	15,87	12,48	0,00
4	69,51	8,34	7,44	0,00	123,32	11,10	9,32	0,00
5	65,46	8,09	5,79	0,00	148,58	12,19	9,81	0,00
6	44,42	6,66	5,46	0,00	141,55	11,90	9,49	0,00
7	27,09	5,20	3,96	0,00	28,49	5,34	4,33	0,00
8	160,85	12,68	11,25	0,00	190,26	13,79	12,82	0,00
9	74,40	8,63	7,19	0,00	183,31	13,54	10,21	0,00
10	88,35	9,40	8,19	0,00	257,98	16,06	11,29	0,00
11	64,51	8,03	6,58	0,00	74,70	8,64	7,72	0,00
12	23,10	4,81	4,10	0,00	49,76	7,05	5,88	0,00
13	22,81	4,78	3,87	0,00	14,72	3,84	3,25	0,00
14	28,93	5,38	4,61	0,00	36,59	6,05	5,13	0,00
15	112,83	10,62	8,98	0,00	336,05	18,33	14,95	0,00
16	19,02	4,36	3,22	0,00	18,08	4,25	3,06	0,00
17	62,09	7,88	6,94	0,00	84,74	9,21	8,12	0,00
18	21,22	4,61	3,64	0,00	18,94	4,35	3,71	0,00
19	76,35	8,74	7,46	0,00	252,52	15,89	12,97	0,00
Итого:	58,99	7,68	5,94	0,00	100,99	10,05	7,34	0,00

Результаты оценки уравнений связи, используемых для вычисления параметров трехпараметрической функции Вейбулла, отражены в табл. 2. Первые три уравнения позволяют рассчитывать средний арифметический ( $D$ ), минимальный ( $D_{\min}$ ) и максимальный ( $D_{\max}$ ) диаметры стволов еловых древостоев при известном среднеквадратическом диаметре ( $QMD$ ). Четвертое уравнение отражает связь между среднеквадратическим диаметром стволов сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев ( $QMD_{345}$ ) ели от среднеквадратического диаметра ( $QMD$ ) елового древостоя. Пятое уравнение показывает зависимость среднего арифметического диаметра стволов сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев ( $D_{345}$ ) от среднеквадратического ( $QMD_{345}$ ). Последнее уравнение предназначено для определения доли (%) ослабленных, усыхающих и погибших деревьев относительно общего количества деревьев, формирующих еловый древостой, в зависимости от его средней категории состояния (в диапазоне от 2 до 5). Представленные уравнения (см. табл. 2) позволяют оценивать первый ( $m_1$ ) и второй ( $m_2$ ) моменты рядов распределения в уравнениях (5) и (6),

а также находить параметры трехпараметрической функции Вейбулла ( $a$ ,  $b$  и  $c$ ) в уравнениях (3), (7) и (8).

Получены результаты оценки качества прогнозирования рядов распределения деревьев ели по ступеням толщины с использованием трехпараметрической функции Вейбулла, параметры которой вычислены по уравнениям связи со среднеквадратическим диаметром (табл. 3). Предсказанные по модели кривые распределения деревьев по ступеням толщины (4 см) для елового древостоя (1–5 категорий состояния) показывают лучшее соответствие исходным данным, чем для части древостоя, сформированной сильно ослабленными, усыхающими и погибшими деревьями (3–5 категории состояния). В среднем по всем пробным площадям получены следующие значения метрик качества для всего елового древостоя:  $MSE = 58,99$ ;  $RMSE = 7,68$ ;  $MAE = 5,94$  и  $MBE = 0,00$ ; а для деревьев 3–5 категорий состояния:  $MSE = 100,99$ ;  $RMSE = 10,05$ ;  $MAE = 7,34$  и  $MBE = 0,00$ .

На модели (рис. 3) представлены кривые распределения сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев ели (3–5 категории состояния) для различных средних диаметров



**Рис. 3.** Прогнозируемые моделью ряды распределения деревьев по ступеням толщины (через 4 см) сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев при разных средних диаметрах стволов еловых древостоев и средней категории санитарного состояния: 1 — СКС = 5; 2 — СКС = 4; 3 — СКС = 3, 4 — СКС = 2; а —  $QMD = 24$  см, б —  $QMD = 28$  см; в —  $QMD = 32$  см; г —  $QMD = 36$  см

**Fig. 3.** Model-predicted tree distribution series by thickness grades (4 cm apart) of severely weakened, drying out, and dead trees with different average trunk diameters of spruce stands and average sanitary condition category: 1 — СКС = 5; 2 — СКС = 4; 3 — СКС = 3, 4 — СКС = 2; а —  $QMD = 24$  cm; б —  $QMD = 28$  cm; в —  $QMD = 32$  cm; г —  $QMD = 36$  cm

стволов ( $QMD$  от 24 до 36 см) елового древостоя и средних категорий состояния (СКС от 2 до 5). С увеличением среднего таксационного диаметра стволов древостоя происходят смещение вершины кривой распределения в более толстые ступени толщины и повышение размаха варьирования (диапазона ступеней толщины от самых тонких до самых толстых стволов деревьев), что подтверждает результаты многочисленных предыдущих исследований для разных лесобразующих пород и лесорастительных условий [17, 29–33].

При средней категории санитарного состояния (СКС) = 5 все деревья елового древостоя (100 %) относятся к категориям сильно ослабленных, усыхающих и погибших, при СКС = 4 — 76 %, при СКС = 3 — 54 % и

при СКС = 2 — 30 % деревьев. При уменьшении средней категории состояния наблюдается смещение вершины кривой распределения деревьев 3–5 категорий в сторону более толстых ступеней толщины по сравнению с кривой распределения для всего елового древостоя (см. рис. 3). В целом распределение сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев по ступеням толщины отражает структуру патологического отпада в еловых древостоях, обусловленного потерей их устойчивости в связи с развитием очагов короеда-типографа.

Разработанная в исследовании новая модель позволяет прогнозировать ряды распределения по толщине деревьев в еловых древостоях, характеризующихся упрощенной структурой. В отличие от ранее разработанных справочных

таблиц и моделей для ели [15, 16] она отображает структуру патологического отпада с зависимости от средней категории санитарного состояния. В литературе были приведены результаты дешифрирования очагов распространения короёда-типографа и выявления состояния хвойных насаждений по спутниковым снимкам [34–37]. Ожидается, что сочетание разработанной модели с результатами дешифрирования космических снимков по очагам короёда-типографа и средней категории санитарного состояния и данными таксационных описаний для лесотаксационных выделов позволит характеризовать структуру рядов распределения по ступеням толщины сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев (3–5 категории состояния) в еловых древостоях Московской области, а также предварительно оценивать объём санитарно-оздоровительных мероприятий (выборочных и сплошных санитарных рубок).

## Выводы

С использованием трехпараметрической функции распределения Вейбулла и моментного метода восстановления параметров получена модель для прогнозирования частоты встречаемости деревьев в поврежденных короёдом-типографом еловых древостоях Московской области, входными таксационными переменными для которой являются среднеквадратический диаметр и средняя категория состояния. На их основании выполняется предсказание распределения по толщине общего количества деревьев от здоровых до погибших (1–5 категории состояния) и отдельно сильно ослабленных, усыхающих и погибших деревьев (3–5 категории состояния). Распределение по толщине деревьев 3–5 категорий состояния показывает структуру патологического отпада, что позволяет оценивать объёмы санитарно-оздоровительных мероприятий (выборочные и сплошные санитарные рубки) в еловых древостоях.

## Список литературы

- [1] Мозолевская Е.Г., Липаткин В.А. Результаты лесопатологического обследования усыхающих ельников в Приокско-Террасном биосферном государственном заповеднике в 2011 г. // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник, 2012. № 3. С. 16–20.
- [2] Гниненко Ю.И., Хегай И.В. Динамика усыхания еловых лесов в Московском регионе // Лесохозяйственная информация, 2018. № 2. С. 65–74. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07
- [3] Алябьев А.Ф. Усыхание ельников Подмоскovie // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник, 2013. № 6. С. 159–165.
- [4] Захаров В.П., Коротков С.А. Динамика лесов восточного Подмоскovie и их использование: Материалы Междунар. науч. конф. молодых ученых и специалистов, посвященной 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича. Сб. статей. М.: Изд-во РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2024. С. 144–149.
- [5] Крылов А.М. Пространственно-временные закономерности массового усыхания еловых насаждений Московской области. Ставрополь: Логос, 2018. 170 с.
- [6] Барсукова Т.Л., Гомолко А.А., Игнатьев Я.К., Лукин В.В., Мощный В.В., Пугачевский А.В., Старикова Л.И. Биологическая устойчивость еловых лесов различного происхождения (на примере Горещкого лесхоза) // Ботаника. Исследования, 2024. № 54. С. 151–159.
- [7] Черненко Т.В., Морозова О.В., Пузаченко М.Ю., Попов С.Ю., Беляева Н.Г. Состав и структура еловых лесов юго-западного Подмоскovie // Лесоведение, 2015. № 5. С. 323–338.
- [8] Коротков С.А. Смена состава древостоев и устойчивость защитных лесов центральной части Русской равнины. М.: АНО «Доблесть эпох», 2023. 168 с.
- [9] Малахова Е.Г., Лямцев Н.И. Распространение и структура очагов усыхания еловых лесов Подмоскovie в 2010–2012 годах // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2014. № 207. С. 193–201.
- [10] Маслов А.Д., Комарова И.А., Котов А.С. Динамика размножения короёда-типографа в Центральной России в 2010–2013 гг. и прогноз на 2014 г. // Лесохозяйственная информация, 2014. № 1. С. 38–46.
- [11] Желдак В.И., Малахова Е.Г., Прока И.Ю. Совершенствование лесоводственных мер содержания и использования еловых лесов, повышения их устойчивости и снижения отрицательных последствий патологии // Лесотехнический журнал, 2015. Т. 5. № 2(18). С. 44–65. DOI: 10.12737/111979
- [12] Коротков С.А., Киселева В.В., Стоноженко Л.В., Истомин Н.А., Юдакова А.С. Структура, устойчивость и тенденции естественного возобновления ельников в национальном парке «Лосиный остров» // Леса Евразии – Брянский лес: Материалы XI Междунар. конф. молодых ученых, посвященной 80-летию Брянской государственной инженерно-технологической академии и профессору В.П. Тимофееву / под ред. В.Г. Санаева, 2011. С. 61–63.
- [13] Стоноженко Л.В., Коротков С.А., Киселева В.В. Тенденции естественного возобновления в хвойно-широколиственных лесах (на примере Щелковского учебно-опытного лесхоза, национальных парков «Лосиный остров» и «Угра») // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2017. Т. 5. № 1 (27). С. 116–119.
- [14] Коротков С.А. Формирование ельников Московской области под воздействием эколого-экономических факторов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы Третьей междунар. науч.-техн. конф. / под ред. В.М. Гедь, 2018. С. 162–165.
- [15] Вагин В.А. Моделирование роста еловых древостоев и проектирование проходных рубок: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Москва, 1993, 24 с.
- [16] Загреев В.В., Сухих В.И., Швиденко А.З., Гусев Н.Н., Мошкалева А.Г. Общесоюзные нормативы для таксации лесов. М.: Колос, 1992. 495 с.
- [17] Лебедев А.В. Обобщенная модель распределения диаметров деревьев в сосновых древостоях // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 4. С. 53–62. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-53-62

- [18] Chen Y., Wu B., Min Z. Stand Diameter Distribution Modeling and Prediction Based on Maximum Entropy Principle // *Forests*, 2019, v. 10(10), article number 859. DOI: 10.3390/f10100859
- [19] Schütz J.P., Rosset C. Performances of different methods of estimating the diameter distribution based on simple stand structure variables in monospecific regular temperate European forests // *Annals of Forest Science*, 2020, v. 77, article number 47. DOI: 10.1007/s13595-020-00951-3
- [20] Sandoval S., Cancino J., Acuña E., Rubilar R. Predicting parameters of Weibull probability density function for diametric distributions in *A. melanoxylon*, *E. camaldulensis*, and *E. nitens* bioenergy plantation // *Dendrobiology*, 2021, v. 86, pp. 8–18. DOI: 10.12657/denbio.086.002
- [21] Bončina Z., Trifković V., Rosset C., Klopčič M. Evaluation of estimation methods for fitting the three-parameter Weibull distribution to European beech forests // *iForest*, 2022, v. 15, pp. 484–490. DOI: 10.3832/ifor4145-015
- [22] Lei Y. Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) // *J. of Forest Science*, 2008, v. 54(12), pp. 566–571.
- [23] Stankova T.V., Zlatanov T.M. Modeling diameter distribution of Austrian black pine (*Pinus nigra* Arn.) plantations: a comparison of the Weibull frequency distribution function and percentile-based projection methods // *European J. of Forest Research*, 2010, v. 129, pp. 1169–1179. DOI: 10.1007/s10342-010-0407-y
- [24] Diamantopoulou M.J., Özçelik R., Crecente-Campo F., Eler U. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods // *Biosystems Engineering*, 2015, v. 133, pp. 33–45. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.02.013
- [25] Gorgoso J.J., Rojo A., Camara-Obregon A., Dieguez-Aranda U. A comparison of estimation methods for fitting Weibull, Johnson's SB and beta functions to *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* and *Pinus sylvestris* stands in northwest Spain // *Forest Systems*, 2012, no. 21(3), pp. 446–459. DOI: 10.5424/fs/2014233-04939
- [26] Ciceu A., Pitar D., Badea O. Modeling the Diameter Distribution of Mixed Uneven-Aged Stands in the South Western Carpathians in Romania // *Forests*, 2021, v. 12, article id 958. DOI: 10.3390/f12070958
- [27] Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Кузьмичев В.В. Оценка статистических моделей распределения деревьев по диаметру в культурах сосны // *Лесохозяйственная информация*, 2022. № 1. С. 50–61. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.03
- [28] Ogana F.N., Gorgoso-Varela J.J. Comparison of estimation methods for fitting Weibull distribution to the natural stand of Oluwa Forest Reserve, Ondo State, Nigeria // *J. of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 2015, v. 7, no. 2, pp. 81–90.
- [29] Кутявин И.Н., Манов А.В., Осипов А.Ф., Бобкова К.С. Долговременная динамика состава, строения и состояния древостоев северотаежных сосняков на Европейском Северо-Востоке России // *Сибирский лесной журнал*, 2023. № 2. С. 17–25. DOI: 10.15372/SJFS20230202
- [30] Богданов А.П., Третьяков С.В., Коптев С.В., Ярославцев С.В., Давыдов А.В. Закономерности строения и динамика старовозрастных лиственнично-сосновых древостоев по результатам стационарных исследований в Архангельской области // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*, 2024. № 3. С. 20–29. DOI: 10.17076/eco1751
- [31] Nord-Larsen T., Cao Q.V. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark // *Forest Ecology and Management*, 2006, v. 231, iss. 1–3, pp. 218–225. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.05.054
- [32] Schmidt L.N., do Amaral Machado S., Pelissari A.L., da Silva G.F. Dynamics of Eucalyptus Diameter Distribution in the State of Minas Gerais // *Floresta e Ambiente*, 2019, v. 26(2), e20170156. DOI: 10.1590/2179-8087.015617
- [33] Sghaier T., Cañellas I., Calama R., Sánchez-González M. Modelling diameter distribution of *Tetraclinis articulata* in Tunisia using normal and Weibull distributions with parameters depending on stand variables // *iForest*, 2016, v. 9, pp. 702–709. DOI: 10.3832/ifor1688-008
- [34] Полевой А.В., Хумала А.Э., Щербаков А.Н., Налдеев Д.Ф. Подходы к определению степени повреждения ельников в результате вспышки массового размножения короеда-типографа с помощью дистанционных методов // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2009. № 187. С. 240–248.
- [35] Миртова И.А., Ершов Д.В., Мягкова Д.А. Использование спутниковых данных для оценки повреждения лесов короедом-типографом на примере Московской области // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2013. № 6. С. 77–82.
- [36] Кравцов С.Л., Ильючик М.А., Голубцов Д.В., Козел А.Л., Пушкин А.А., Савко И.Л., Романович К.А. Прогнозный мониторинг развития очагов короеда-типографа в насаждениях ели с использованием спутниковых и наземных данных // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*, 2022. № 1(252). С. 65–72. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-252-1-65-72
- [37] Алексеев А.С., Черниковский Д.М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2024. № 2(398). С. 11–28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28

## Сведения об авторах

**Лебедев Александр Вячеславович** — д-р с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева), alebedev@rgau-msha.ru

**Гостева Дарья Юрьевна** — аспирант, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева), d.gosteva@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 06.05. 2025.

Одобрено после рецензирования 21.11.2025.

Принята к публикации 26.03.2026.

## MODELING SPRUCE TREES DISTRIBUTION SERIES IN ENGRAVER-BEETLE-DAMAGED FOREST STANDS IN MOSCOW REGION

**A.V. Lebedev, D.Yu. Gosteva**

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya st., 127550, Moscow, Russia

d.gosteva@rgau-msha.ru

Data from 19 trial plots of the spruce stands in the Moscow region are presented. A three-parameter Weibull equation and the method of moments for parameter recovery were applied to create a model of the diameter distribution of Norway spruce (*Picea abies*) trees in stands damaged by the European spruce bark beetle (*Ips typographus*). The analysis employed descriptive statistics methods (calculation of midpoint distribution) and regression analysis. Consistency was revealed between the descriptive statistics of diameter distribution series for the entire stand and for severely weakened, dying, and dead trees, indicating the feasibility of their combined use for creating a generalized model. The input taxational variables for the model are the root mean square diameter and the average condition category. Based on these, the prediction of the diameter distribution of the total number of trees (condition categories 1–5) and separately for severely weakened, dying, and dead trees (condition categories 3–5) is demonstrated. It was established that the distribution of trees in condition categories 3–5 reflects the structure of pathological dieback, which allows for the estimation of sanitary and forest health measures (selective and clear sanitary felling) in spruce stands.

**Keywords:** distribution of trees by thickness, Weibull distribution, average condition category, spruce stands, engraver-beetle, Moscow region

**Suggested citation:** Lebedev A.V., Gosteva D.Yu. *Modelirovanie ryadov raspredeleniya derev'ev eli v povrezhdennykh koroedom-tipografom drevostoyakh Podmoskov'ya* [Modeling spruce trees distribution series in engraver-beetle-damaged forest stands in Moscow region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 3, pp. 5–16. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-3-5-16

## References

- [1] Mozolevskaya E.G., Lipatkin V.A. *Rezul'taty lesopatologicheskogo obsledovaniya usykhayushchikh el'nikov v Prioksko-Terrasnom biosfernom gosudarstvennom zapovednike v 2011 g.* [Results of forest pathology survey of drying spruce forests in the Prioksko-Terrasny Biosphere State Reserve in 2011]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2012, no. 3, pp. 16–20.
- [2] Gninenko Yu.I., Khagay I.V. *Dinamika usykhaniya elovykh lesov v Moskovskom regione* [Dynamics of shrinking spruce forests in the Moscow region]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2018, no. 2, pp. 65–74. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07
- [3] Alyab'ev A.F. *Usykhaniye el'nikov Podmoskov'ya* [The Dieback of Spruce Forests in the Moscow Region]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoy vestnik* [Forestry Bulletin], 2013, no. 6, pp. 159–165.
- [4] Zakharov V.P., Korotkov S.A. *Dinamika lesov vostochnogo Podmoskov'ya i ikh ispol'zovanie* [Dynamics of forests in the eastern Moscow region and their use]. *Mater. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya A.Ya. Milovicha. Sbornik statey* [Proc. of the International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists dedicated to the 150th Anniversary of the Birth of A.Ya. Milovich. Collection of articles]. Moscow: Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2024, pp. 144–149.

- [5] Krylov A.M. *Prostranstvenno-vremennyye zakonmernosti massovogo usykhaniya elovykh nasazhdeniy Moskovskoy oblasti* [Spatio-temporal patterns of mass drying of spruce stands in the Moscow region]. Stavropol: Logos, 2018, 170 p.
- [6] Barsukova T.L., Gomolko A.A., Ignat'ev Ya.K., Lukin V.V., Motsnyy V.V., Pugachevskiy A.V., Starikova L.I. *Biologicheskaya ustoychivost' elovykh lesov razlichnogo proiskhozhdeniya (na primere Goretskogo leskhoza)* [Biological stability of spruce forests of diverse origin (case study: Goretsky forestry)]. *Botanika. Issledovaniya* [Botany. Research], 2024, no. 54, pp. 151–159.
- [7] Chernen'kova T.V., Morozova O.V., Puzachenko M.Yu., Popov S.Yu., Belyaeva N.G. *Sostav i struktura elovykh lesov yugo-zapadnogo Podmoskov'ya* [Composition and structure of spruce forests of the southwestern part of Moscow region]. *Lesovedenie* [Lesovedenie], 2015, no. 5, pp. 323–338.
- [8] Korotkov S.A. *Smena sostava drevostoev i ustoychivost' zashchitnykh lesov tsentral'noy chasti Russkoy ravniny* [Change in the composition of tree stands and the stability of protective forests in the central part of the Russian Plain]. Moscow: ANO «Doblest' epokh», 2023, 168 p.
- [9] Malakhova E.G., Lyamtsev N.I. *Rasprostraneniye i struktura ochagov usykhaniya elovykh lesov Podmoskov'ya v 2010–2012 godakh* [Extent and structure of Moscow region spruce forest dieback in 2010–2012]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii], 2014, no. 207, pp. 193–201.
- [10] Maslov A.D., Komarova I.A., Kotov A.S. *Dinamika razmnozheniya koroeda-tipografa v tsentral'noy Rossii v 2010–2013 gg. i prognoz na 2014 g.* [The dynamics of reproduction of bark beetles in Central Russia in 2010–2013. And the forecast for 2014]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2014, no. 1, pp. 38–46.
- [11] Zheldak V.I., Malakhova E.G., Proka I.Yu. *Sovershenstvovaniye lesovodstvennykh mer sodержaniya i ispol'zovaniya elovykh lesov, povysheniya ikh ustoychivosti i snizheniya otritsatel'nykh posledstviy patologii* [Perfection of silvicultural measures, the content and use of spruce forests, improving their sustainability and reducing the negative effects of the pathology]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering J.], 2015, v. 5, no. 2(18), pp. 44–65. DOI: 10.12737/111979
- [12] Korotkov S.A., Kiseleva V.V., Stonozhenko L.V., Istomin N.A., Yudakova A.S. *Struktura, ustoychivost' i tendentsii estestvennogo vozobnovleniya el'nikov v natsional'nom parke «Losinyy ostrov»* [Structure, stability and trends of natural regeneration of spruce forests in the Losiny Ostrov National Park]. *Lesa Evrazii – Bryanskiy les: mater. XI Mezhdunarodnoy konferentsii molodykh uchennykh, posvyashchennoy 80-letiyu Bryanskoy gosudarstvennoy inzhenerno-tekhnologicheskoy akademii i professoru V.P. Timofeevu* [Forests of Eurasia – Bryansk Forest: Proc. of the XI International Conference of Young Scientists dedicated to the 80th anniversary of the Bryansk State Engineering and Technological Academy and Professor V.P. Timofeev]. Ed. V.G. Sanaev, 2011, pp. 61–63.
- [13] Stonozhenko L.V., Korotkov S.A., Kiseleva V.V. *Tendentsii estestvennogo vozobnovleniya v khvoynno-shirokolistvennykh lesakh (na primere Shchelkovskogo uchebno-opytного leskhoza, natsional'nykh parkov «Losinyy ostrov» i «Ugra»)* [Natural regeneration trends in coniferous-broadleaf forests (using the Shchelkovsky educational and experimental forestry enterprise, and the Losiny Ostrov and Ugra national parks as examples)]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current research trends in the 21st century: theory and practice], 2017, v. 5, no. 1 (27), pp. 116–119.
- [14] Korotkov S.A. *Formirovaniye el'nikov Moskovskoy oblasti pod vozdeystviem ekologo-ekonomicheskikh faktorov* [Formation of spruce forests in the Moscow region under the influence of ecological and economic factors]. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovaniye: mater. Tret'ey mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forests of Russia: policy, industry, science, education: materials of the third international scientific and technical conference]. Ed. V.M. Gedyo, 2018, pp. 162–165.
- [15] Vagin V.A. *Modelirovaniye rosta elovykh drevostoev i proektirovaniye prokhodnykh rubok* [Modeling the growth of spruce stands and designing thinnings]. *Dis. Cand Sci. (Agr.)*. Moscow, 1993, 24 p.
- [16] Zagreev V.V., Sukhikh V.I., Shvidenko A.Z., Gusev N.N., Moshkalev A.G. *Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov* [All-Union standards for forest taxation]. Moscow: Kolos, 1992, 495 p.
- [17] Lebedev A.V. *Obobshchennaya model' raspredeleniya diametrov derev'ev v sosnovykh drevostoyakh* [Generalized model of pine trees diameter distribution]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 53–62. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-53-62
- [18] Chen Y., Wu B., Min Z. *Stand Diameter Distribution Modeling and Prediction Based on Maximum Entropy Principle*. *Forests*, 2019, v. 10(10), article number 859. DOI: 10.3390/f10100859
- [19] Schütz J.P., Rosset C. *Performances of different methods of estimating the diameter distribution based on simple stand structure variables in monospecific regular temperate European forests*. *Annals of Forest Science*, 2020, v. 77, article number 47. DOI: 10.1007/s13595-020-00951-3
- [20] Sandoval S., Cancino J., Acuña E., Rubilar R. *Predicting parameters of Weibull probability density function for diametric distributions in A. melanoxylon, E. camaldulensis, and E. nitens bioenergy plantation*. *Dendrobiology*, 2021, v. 86, pp. 8–18. DOI: 10.12657/denbio.086.002
- [21] Bončina Z., Trifković V., Rosset C., Klopčič M. *Evaluation of estimation methods for fitting the three-parameter Weibull distribution to European beech forests*. *iForest*, 2022, v. 15, pp. 484–490. DOI: 10.3832/ifor4145-015
- [22] Lei Y. *Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (Pinus tabulaeformis)*. *J. of Forest Science*, 2008, v. 54(12), pp. 566–571.
- [23] Stankova T.V., Zlatanov T.M. *Modeling diameter distribution of Austrian black pine (Pinus nigra Arn.) plantations: a comparison of the Weibull frequency distribution function and percentile-based projection methods*. *European J. of Forest Research*, 2010, v. 129, pp. 1169–1179. DOI: 10.1007/s10342-010-0407-y
- [24] Diamantopoulou M.J., Özçelik R., Crecente-Campo F., Eler U. *Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods*. *Biosystems Engineering*, 2015, v. 133, pp. 33–45. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.02.013

- [25] Gorgoso J.J., Rojo A., Camara-Obregon A., Dieguez-Aranda U. A comparison of estimation methods for fitting Weibull, Johnson's SB and beta functions to *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* and *Pinus sylvestris* stands in northwest Spain. *Forest Systems*, 2012, no. 21(3), pp. 446–459. DOI: 10.5424/fs/2014233-04939
- [26] Ciceu A., Pitar D., Badea O. Modeling the Diameter Distribution of Mixed Uneven-Aged Stands in the South Western Carpathians in Romania. *Forests*, 2021, v. 12, article id 958. DOI: 10.3390/f12070958
- [27] Dubenok N.N., Lebedev A.V., Kuz'michev V.V. *Otsenka statisticheskikh modeley raspredeleniya derev'ev po diametru v kul'turakh sosny* [Estimation of statistical models of distribution of diameters of trees in pine plantations]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya* [Forestry Information], 2022, no. 1, pp. 50–61. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.1.03
- [28] Ogana F.N., Gorgoso-Varela J.J. Comparison of estimation methods for fitting Weibull distribution to the natural stand of Oluwa Forest Reserve, Ondo State, Nigeria. *J. of Research in Forestry, Wildlife and Environment*, 2015, v. 7, no. 2, pp. 81–90.
- [29] Kutuyavin I.N., Manov A.V., Osipov A.F., Bobkova K.S. *Dolgovremennaya dinamika sostava, stroeniya i sostoyaniya drevostoev severotaezhnykh sosnyakov na Evropeyskom Severo-Vostoke Rossii* [Long-term dynamics of the composition, structure and state of tree stands of northern taiga pine forests in the European North-East of Russia]. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian Journal of Forest Science], 2023, no. 2, pp. 17–25. DOI: 10.15372/SJFS20230202
- [30] Bogdanov A.P., Tret'yakov S.V., Koptev S.V., Yaroslavl'tsev S.V., Davydov A.V. *Zakonomernosti stroeniya i dinamika starovozrastnykh listvennichno-sosnyvykh drevostoev po rezul'tatam statsionarnykh issledovaniy v Arkhangel'skoy oblasti* [Patterns in the structure and dynamics of old-growth larch-pine stands: results of stationary research in the Arkhangelsk region]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Transactions of the Karelian Research Centre RAS], 2024, no. 3, pp. 20–29. DOI: 10.17076/eco1751
- [31] Nord-Larsen T., Cao Q.V. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark // *Forest Ecology and Management*, 2006, v. 231, iss. 1–3, pp. 218–225. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.05.054
- [32] Schmidt L.N., do Amaral Machado S., Pelissari A.L., da Silva G.F. Dynamics of Eucalyptus Diameter Distribution in the State of Minas Gerais // *Floresta e Ambiente*, 2019, v. 26(2), e20170156. DOI: 10.1590/2179-8087.015617
- [33] Sghaier T., Cañellas I., Calama R., Sánchez-González M. Modelling diameter distribution of *Tetraclinis articulata* in Tunisia using normal and Weibull distributions with parameters depending on stand variables // *iForest*, 2016, v. 9, pp. 702–709. DOI: 10.3832/ifor1688-008
- [34] Polevoy A.V., Khumala A.E., Shcherbakov A.N., Naldeen D.F. *Podkhody k opredeleniyu stepeni povrezhdeniya el'nikov v rezul'tate vspyshki massovogo razmnozheniya koroeda-tipografa s pomoshch'yu distantsionnykh metodov* [Approaches to determining the extent of damage to spruce forests as a result of an outbreak of bark beetle using remote sensing methods]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2009, no. 187, pp. 240–248.
- [35] Mirtova I.A., Ershov D.V., Myagkova D.A. *Ispol'zovanie sputnikovyykh dannykh dlya otsenki povrezhdeniya lesov koroedom-tipografom na primere Moskovskoy oblasti* [Using satellite data to assess forest damage by bark beetle: Moscow region as an example]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos'emka* [Izvestia Vuzov. Geodesy And Aerophotosurveying], 2013, no. 6, pp. 77–82
- [36] Kravtsov S.L., Il'yuchik M.A., Golubtsov D.V., Kozel A.L., Pushkin A.A., Savko I.L., Romanovich K.A. *Prognoznyy monitoring razvitiya ochagov koroeda-tipografa v nasazhdeniyakh eli s ispol'zovaniem sputnikovyykh i nazemnykh dannykh* [Forecast monitoring of the spread of the bark beetle-typographer in spruce planting with using satellite and ground data]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Issue 1, Forestry, Nature Management, Processing of Renewable Resources], 2022, no. 1(252), pp. 65–72. DOI: 10.52065/2519-402X-2022-252-1-65-72
- [37] Alekseev A.S., Chernikhovskiy D.M. *Iz'yavlenie povrezhdeniy khvoynnykh nasazhdeniy na osnove kompleksnogo analiza rezul'tatov distantsionnogo zondirovaniya Zemli i nazemnykh obsledovaniy* [Identification of damage to coniferous stands based on comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground surveyS]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Russian Forestry J.*, 2024, no. 2(398), pp. 11–28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28

## Authors' information

**Lebedev Aleksandr Vyacheslavovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru)

**Gosteva Dar'ya Yur'yevna** — pg. of the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, [d.gosteva@rgau-msha.ru](mailto:d.gosteva@rgau-msha.ru)

Received 06.05.2025.

Approved after review 21.11.2025.

Accepted for publication 26.03.2026.

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