

УДК 63:58.084.2:58.087:581.4:581.5

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕСНЫХ БИОЦЕНОЗОВ ПО СОСНЕ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

¹Зыков И.Е., ²Федорова Л.В., ³Баранов С.Г., ¹Ежкова В.Г.

¹Государственный гуманитарно-технологический университет, Орехово-Зуево,
e-mail: zikov-oz@yandex.ru;

²Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова,
Москва, e-mail: fedorova-oz@yandex.ru;

³ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых»,
Владимир, e-mail: bar.serg58@gmail.com

Проведен анализ современных методов биоиндикации степени чистоты воздуха по сосне обыкновенной, разработанных С.В. Алексеевым, Т.Я. Ашихминой, А.И. Федоровой и А.Н. Никольской, О.П. Мелеховой и Е.И. Егоровой. Установлена их недостаточная информативность по отдельным морфометрическим характеристикам этого вида. Для более точной оценки состояния окружающей среды использованы совокупности нескольких признаков и ряд новых параметров. Предложена оригинальная методика интегральной балльной оценки степени чистоты воздуха по сосне обыкновенной, разработанная на основе принципа группировки структуры явления и структурных сдвигов, происходящих в нем, выявления связи и зависимости между явлениями. В качестве группировочных признаков использованы: плотность и средняя продолжительность жизни хвои, среднегодовые окружность и длина прироста главного побега, среднегодовое количество боковых побегов. По этим параметрам проведен расчет количества групп, численности совокупности, степени вариации признака. В результате вторичной группировки выявлено 5 групп значений для каждого признака, используя которые можно вычислить средний балл состояния окружающей среды района исследования. Для нахождения среднебалльной оценки нужно найти балл, соответствующий полученному результату по каждому параметру, а затем сложить все полученные баллы и разделить на количество оцениваемых параметров, производя округление по законам нахождения среднего.

Ключевые слова: биоиндикация, сосна обыкновенная, морфометрия, метод группировки признаков, интегральная оценка

PROPOSAL OF AN INTEGRATED ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF FOREST BIOCENOSSES FOR THE COMMON PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.)

¹Zykov I.E., ²Fedorova L.V., ³Baranov S.G., ¹Ezhkova V.G.

¹State University of Humanities and Technology, Orekhovo-Zuyevo, e-mail: zikov-oz@yandex.ru;

²The first Moscow State Medical University named after I.M. Sechenov, Moscow,
e-mail: fedorova-oz@yandex.ru;

³Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir,
e-mail: bar.serg58@gmail.com

The analysis of modern methods of bioindication of the degree of purity of the air for scots pine, developed by S.V. Alekseev, T.Ya. Ashikhmina, A.I. Fedorova and A.N. Nikolskaya, O.P. Melekhova and E.I. Egorova, is carried out. Their insufficient information content on individual morphometric characteristics of this species been established. For a more accurate assessment of the state of the environment, aggregates of several features and a number of new parameters used. An original method of integral point estimation of the degree of purity of the air for the common pine is proposed, developed on the basis of the principle of grouping the structure of the phenomenon and structural shifts occurring in it, identifying the relationship and dependence between the phenomena. The following grouping features used: density and average life expectancy of needles, average annual circumference and length of growth of the main shoot, average annual number of lateral shoots. According to these parameters, the calculation of the number of groups, the number of the population, the degree of variation of the trait carried out. As a result of the secondary grouping, 5 groups of values for each feature were identified, using which the average score of the environmental condition of the study area can be calculated. To find the average score, you need to find the score corresponding to the result obtained for each parameter, and then add up all the points obtained and divide by the number of estimated parameters, rounding according to the laws of finding the average.

Keywords: bioindication, scots pine, morphometry, feature grouping method, integral assessment

Биоиндикация – одно из приоритетных направлений диагностики состояния окружающей среды. Она доступна всем категориям исследователей, поскольку не требует специ-

ального оборудования. Реакция биоиндикаторов – это комплексный ответ на изменения состояния среды обитания, отражающий весь спектр воздействия разнообразных факторов.

Материалы и методы исследования

Широко известны современные методики оценки степени чистоты воздуха по одному из эталонных биоиндикаторных видов средней полосы России – сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Однако большинство из них основывается на ограниченном числе морфологических параметров этого вида [1-3].

Главными критериями оценки степени загрязнения воздуха по методике С.В. Алексеева [1] является состояние хвои и ее возраст. В состоянии хвои автором выделено три класса повреждения и четыре класса усыхания. Каждому классу повреждения хвои соответствует шкала степени чистоты воздуха. Однако наши исследования показывают, что даже в достаточно чистых районах на одном дереве часто обнаруживается хвоя всех классов повреждения и усыхания. К тому же максимальный возраст хвои в 4 года может сочетаться со всеми тремя классами повреждения. Поэтому из методики С.В. Алексеева неясно, к какой степени загрязнения должна быть отнесена совокупность всех классов повреждения. Выделение классов усыхания вообще не имеет смысла, поскольку они не используются в определении состояния воздуха.

Т.Я. Ашихмина [2] представляет серию методик оценки степени чистоты воздуха, каждая из которых основана на каком-то одном параметре состояния вегетативных или генеративных органов сосны обыкновенной. Первая из них основана на изучении состояния хвои, которая собирается с боковых побегов средней части кроны 15-20-летних сосен и распределяется по трем группам: неповрежденная, поврежденная и усыхающая. Интерпретация результатов базируется на сравнительном анализе динамики состояния хвои за несколько лет. При впервые проводящемся таком анализе трактовка результатов бывает затруднена вследствие отсутствия градации степени повреждения хвои. Однако идея выделения трех групп в состоянии хвои представляется более надежным вариантом биоиндикации по сравнению с экспресс-анализом С.В. Алексеева [1].

Вторая методика Т.Я. Ашихминой [2] основана на обследовании длины и диаметра шишек сосны, которые в загрязненном воздухе могут снижаться на 15-20%, наряду с уменьшением их количества.

Третья методика предполагает определение загрязнения атмосферы по состоянию прироста центрального побега последнего года жизни. В условиях загрязнения, по мнению Т.Я. Ашихминой, он может снижаться на 20-60%. Этот параметр видится нам более лабильным и противоречивым, поскольку в загрязненных местообитаниях мы не раз наблюдали не снижение прироста, а его увеличение вследствие компенсаторного эффекта на уменьшение общей фотосинтезирующей поверхности хвоинок в результате их повреждения или усыхания. Таким образом, прирост, вероятно, следует учитывать не отдельно, а в совокупности с распределением хвои по классам повреждения [4].

Продолжительность жизни хвои оценивается Т.Я. Ашихминой как самостоятельный параметр, хотя С.В. Алексеев рассматривал его в совокупности с характером ее повреждений. Т.Я. Ашихмина вводит формулу для вычисления индекса продолжительности жизни хвои, который зависит от количества осмотренных деревьев и класса повреждения хвоинок.

А.И. Федорова и А.Н. Никольская [5] предлагают интегральную оценку состояния воздуха по комплексу признаков хвои, прироста побегов и почек. Хвою они обследуют на предмет продолжительности жизни, повреждения, а также учитывают ее длину, ширину и массу. Авторы вводят еще один параметр – количество хвоинок на 10 см побега. Считается, что из-за ухудшения роста побегов укороченные побеги сосны более сближены, и на 10 см побега их должно быть больше. К сожалению, не совсем ясно, каким образом учитывать хвоинки на этих 10 см, ведь в прямой ряд они не выстраиваются. Возможно, авторы имеют в виду количество хвоинок на всю площадь побега, имеющего длину 10 см. Чтобы оптимизировать этот аспект, мы вводим такой параметр, как плотность хвои (P) [4], которая равна отношению количества хвоинок (X) к площади поверхности побега (S), т.е. к произведению его длины на длину окружности ($P = X / S$).

Методика А.И. Федоровой и А.Н. Никольской предполагает изучение побегов: длину прироста каждого года жизни, его толщину и ветвление, а также измерение длины и толщины почек. На основании полученных результатов выводится средняя величина по каждому показателю.

Все биометрические данные изучения хвои, побегов и почек выражаются в баллах от 1 до 5, где самый высокий балл соответствует чистой зоне. Однако какой балл какому цифровому значению соответствует, авторами методики не указано. Все параметры снимаются с предварительно срезанных одновозрастных побегов, расположенных на высоте 2 м в той части кроны, которая обращена к зонам загрязнения воздуха. Таким образом, не предполагается обследование одних и тех же побегов, что явно ведет к росту варибельности результатов.

Работа О.П. Мелеховой и Е.И. Егоровой [3] описывает метаморфозы сосны в условиях радиоактивного загрязнения и воздействия оксида серы (IV). Примечательно, что под воздействием радиации у сосны может наблюдаться как торможение роста в виде гибели почек, хвои и побегов, так и обратная реакция – увеличение прироста в течение вегетационного периода, многопочечность. Эти явления отмечены нами в ходе многолетних наблюдений в зонах техногенного загрязнения.

Анализ перечисленных методик позволяет констатировать, что в отдельности морфологические характеристики сосны обыкновенной недостаточно информативны. Совокупность параметров, а также введение новых позволяет дать более точную оценку состояния окружающей среды с помощью этого индикаторного вида.

Результаты исследования и их обсуждение

Сбор и первичная обработка полевого материала

1. Выбрать точку исследования, на территории которой можно найти сосны 10-15-летнего возраста высотой 1-1,5 м.

2. Описать местоположение выбранной точки исследования, особо обратив внимание на антропогенную нагрузку, ориента-

цию объектов-загрязнителей окружающей среды по сторонам света, направление господствующих ветров и т.д.

3. В точке исследования выбрать 5 сосен нужного возраста и высоты, растущих друг от друга на расстоянии 5-10 м.

3.1. Определить возраст каждого дерева по количеству мутовок главного побега плюс 2 (в первые 2 года жизни рост боковых побегов не происходит). Данные занести в таблицу 1.

3.2. Определить продолжительность жизни хвои [1; 5; 6]. Для этого обследовать приросты главного побега, начиная с прироста последнего года. На каком количестве приростов последних лет, начиная с верхнего, сохранилась хвоя, столько лет она и прожила. Продолжительность жизни хвои может быть выражена не только целым, но и дробным числом, если на последнем охвоенном участке ствола сохранилась только часть хвои [1; 7].

3.3. Изучить ежегодный прирост [2; 8; 9] главного побега каждого дерева в длину и толщину, особенности ветвления. Для этого у каждой сосны измерить длину прироста главного побега от его верхушки до боковых побегов, окружность побега в точке ветвления, подсчитать количество боковых побегов. Начинать лучше сверху, с прироста последнего года, продвигаясь к основанию ствола. Провести измерения только главного побега, формирующего ствол дерева. Данные занести в таблицу 1.

3.4. С каждой сосны собрать всю хвою с прироста главного побега предпоследнего года жизни в отдельный пакет с указанием № пробной площадки, ее местоположения, № сосны, Ф.И.О. сборщика, даты сбора материала.

Изучение повреждений и усыханий хвои производят в лабораторных условиях с использованием бинокля не позднее чем через неделю после сбора основного материала.

Таблица 1

Результаты измерения побегов сосны № 1...5 на пробной площадке (местоположение)

№ п/п прироста главного побега, начиная с последнего сверху	Длина прироста главного побега (см)	Длина окружности прироста главного побега (см)	Число боковых побегов в мутовках (шт.)
1			
2 и т.д.			
Среднее			

*Камеральная обработка
полевого материала*

1. Собранный хвою с предпоследнего прироста главного побега изучают у каждой сосны отдельно. Предварительно разложив ее на столе, подсчитывают количество пар хвоинок, то есть укороченных побегов. В условиях сильного загрязнения воздуха особенности роста укороченных побегов часто нарушаются: хвоинки могут расти пучками по 3, 4, 5 в пазухах чешуевидных листьев. Такие укороченные побеги необходимо учитывать отдельно. Данные изучения укороченных побегов внести в таблицу 2.

2. Разделить хвоинки по одной и, используя бинокляр, разложить по классам повреждения и усыхания. При анализе нужно помнить, что окраска кончика хвоинки всегда более светлая.

Классы повреждения и усыхания:

1 класс – хвоя без повреждений и усыханий;

2 класс – хвоя поврежденная: с микро- и макронекрозами;

3 класс – усыхающая хвоя (кончик хвоинки, половина хвоинки, полностью сухая хвоинка);

4 класс – повреждения хвои насекомыми: погрызы, проколы и т.д.

3. Вычислить средние биометрические параметры. Для нахождения среднегодовой длины окружности (4 столбец таблицы 3) суммировать длины окружностей всех побегов (3 столбец таблицы 1) данной сосны и разделить на количество побегов. Аналогичным образом найти среднегодовые длины приростов и среднее количество боковых побегов. По полученным по каждой сосне данным вывести средние значения для точки исследования. Для этого средние результаты (столбцы 2, 3, 4 таблицы 1) одной сосны сложить со средними результатами соответствующих столбцов других сосен и разделить на количество исследованных деревьев. Полученные средние значения занести в таблицу 3.

4. Найти плотность (ρ_0) хвои по формуле:

$$\rho_0 = N / a \times b,$$

где ρ_0 – плотность, N – количество хвоинок на предпоследнем приросте главного побега (шт.), a – длина предпоследнего прироста главного побега (см), b – длина окружности предпоследнего прироста главного побега (см). Данные занести в таблицу 4.

Таблица 2

Результаты исследования хвои по классам повреждения и усыхания на пробной площадке (местоположение)

№ сосны	Общее количество хвоинок	По 2 хвоинки в укороченном побеге		По 3 и более хвоинки в укороченном побеге		1 класс (без повреждений)		2 класс (повреждения)		3 класс (усыхания)		4 класс (повреждения насекомыми)	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1													
2 и т.д.													
Среднее													

Таблица 3

Средние результаты измерения побегов на пробной площадке (местоположение)

№ сосны	Возраст сосен (лет)	Продолжительность жизни хвои (лет)	Среднегодовая окружность прироста главного побега (см)	Среднегодовая длина прироста главного побега (см)	Среднегодовое количество боковых побегов (шт.)
1					
2 и т.д.					
Среднее					

Таблица 4

Плотность хвои на предпоследнем приросте главного побега, шт./см²

№ сосны	Длина прироста (см)	Длина окружности (см)	Площадь поверхности (см ²)	Общее количество хвоинок (шт.)	Плотность хвои (шт./см ²)
1					
2 и т.д.					
Среднее					

Результаты исследования и их обсуждение

Ниже представлен алгоритм разработки интегральной методики оценки степени чистоты воздуха по метрическим характеристикам вегетативных органов сосны обыкновенной, апробированной авторами в течение пяти лет на 20 пробных площадках восточного Подмосковья (г. Орехово-Зуево и Орехово-Зуевского района). Для получения балльной оценки мерные параметры обработаны с помощью методов математической статистики.

Полученные результаты в каждой точке исследования обобщены и систематизированы путем подсчета общих итогов по совокупности единиц наблюдения (сводки) и сгруппированы. Примененный метод группировки направлен на изучение структуры явления и структурных сдвигов, происходящих в нем, выявление связи и зависимости между явлениями [10; 11].

Проведение сводки и группировки предполагает:

- 1) выбор группировочного признака;
- 2) определение порядка формирования групп;
- 3) разработку статистических показателей для характеристики групп и выборки в целом;
- 4) разработку макетов статистических таблиц для представления результатов сводки.

В качестве группировочных признаков использованы:

- 1) плотность хвои;
- 2) средняя продолжительность жизни хвои;
- 3) среднегодовая окружность прироста главного побега;
- 4) среднегодовая длина прироста главного побега;
- 5) среднегодовое количество боковых побегов.

После определения основания группировки решен вопрос о количестве групп, численности совокупности, степени вариации признака.

Число групп определено по формуле Стерджесса:

$$n \approx 1 + \log_2 N, \text{ или } n \approx 1 + 3,322 \cdot \lg N,$$

где n – число групп, N – число единиц совокупности.

В совокупности обследовано 100 деревьев: по 5 на 20 пробных площадках.

$$n \approx 1 + \log_2 100 = 1 + 6,64 = 7,64,$$

$$n \approx 1 + 3,322 \cdot \lg 100 = 1 + 6,644 = 7,644$$

$$n = 8$$

После установления числа групп определен интервал группировки (размах выборки R) как разность между верхней и нижней границами интервала: $R = x_{max} - x_{min}$

$$R_1 = 3,8; R_2 = 1,9; R_3 = 9,2;$$

$$R_4 = 92,7; R_5 = 20,5; R_6 = 1,8$$

и величина интервала группировки: $h = R / n$

$$h_1 = h_1 = 0,5; h_2 = 0,2; h_3 = 1,2;$$

$$h_4 = 12; h_5 = 2,6; h_6 = 0,2.$$

Далее обозначены границы групп с равными интервалами (табл. 5).

После выбора интервалов группировки определены частоты – количество n_i элементов выборки, попавших в i -интервал (элемент, совпавший с правой границей интервала, относится к последующему интервалу). Получен статистический ряд: в верхней строке содержатся середины интервалов группировки, а в нижней – частоты n_i (табл. 6).

Аналитические группировки вносят погрешность в дальнейшие вычисления (погрешность растет с увеличением числа интервалов), т.к. связаны с потерей части информации, заключенной в выборке. Однако они позволяют установить связь и определить направление между результативным и факторным признаком.

Таблица 5

Группировка полевого материала
по основным метрическим параметрам сосны обыкновенной

Признак	Группа							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	до 1,1	1,1–1,6	1,6–2,1	2,1–2,6	2,6–3,1	3,1–3,6	3,6–4,1	4,1 и более
2	до 1,6	1,6–1,8	1,8–2,0	2,0–2,2	2,2–2,4	2,4–2,6	2,6–2,8	2,8 и более
3	до 41,8	41,8–53,8	53,8–65,8	65,8–77,8	77,8–89,8	89,8–101,8	101,8–113,8	113,8 и более
4	до 11,4	11,4–14,0	14,0–16,6	16,6–19,2	19,2–21,8	21,8–24,4	24,4–27,0	27,0 и более
5	до 2,8	2,8–3,0	3,0–3,2	3,2–3,4	3,4–3,6	3,6–3,8	3,8–4,0	4,0 и более

Таблица 6

Таблица частот и середин интервалов группированной выборки

Признак 1	0,85	1,35	1,85	2,35	2,85	3,35	3,85	4,35
	5	5	5	1	0	0	1	3
Признак 2	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,9
	0	1	3	6	3	6	0	1
Признак 3	35,8	47,8	59,8	71,8	83,8	95,8	107,8	119,8
	2	3	2	2	4	3	3	1
Признак 4	10,1	12,7	15,3	17,9	20,5	23,1	25,7	28,3
	1	0	2	5	2	2	2	6
Признак 5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7	3,9	4,1
	0	0	2	1	5	1	3	8

Таблица 7

Таблица частот и середин интервалов вторичной группированной выборки

Признак 1	0,6	1,6	2,6	3,6	4,6
	5	10	1	1	3
Признак 2	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0
	0	4	9	6	1
Признак 3	29,8	53,8	77,8	101,8	125,8
	2	5	6	6	1
Признак 4	8,8	14,0	19,2	24,4	29,6
	1	2	7	4	6
Признак 5	2,6	3,0	3,4	3,8	4,2

В действительности на изменение величины результативного признака оказывает влияние множество факторов, действующих в разных направлениях. Для изучения таких многофакторных связей используют вторичные и многомерные группировки.

Проведена вторичная группировка на основе ранее построенной группировки путем объединения первоначальных интервалов. Построен статистический ряд, в верхней строке которого отмечены середины интервалов вторичной группировки, а в нижней – частоты n_i (табл. 7).

Таблица 8

Балльная оценка состояния окружающей среды по метрическим параметрам сосны обыкновенной

Параметры Баллы	Плотность хвой (шт./см ²)	Средняя продолжительность жизни хвой (лет)	Среднегодовая окружность прироста главного побега (см)	Среднегодовая длина прироста главного побега (см)	Среднегодовое количество боковых побегов (шт.)
1 – относительная норма	до 1,1	более 2,8	более 11,4	более 27,0	более 4,0
2 – слабое загрязнение, фоновое состояние	1,1-2,1	2,4-2,8	9,0-11,4	21,8–27,0	3,6-4,0
3 – среднее загрязнение	2,1-3,1	2,0-2,4	6,6-9,0	16,6–21,8	3,2-3,6
4 – сильное загрязнение	3,1-4,1	1,6-2,0	4,2-6,6	11,4–16,6	2,8-3,2
5 – очень сильное загрязнение, тревога	более 4,1	до 1,6	до 4,2	до 11,4	до 2,8

В результате вторичной группировки выявлено 5 групп значений для каждого признака, представленных в итоговой таблице 8, используя которые можно вычислить средний балл состояния окружающей среды района исследования. Для нахождения среднебалльной оценки нужно найти балл, соответствующий полученному результату по каждому параметру, а затем сложить все полученные баллы и разделить на количество оцениваемых параметров, производя округление по законам нахождения среднего [10; 11].

Например, в точке N получены значения плотности хвой – 0,9 шт./см² (балл 1), средней продолжительности жизни хвой – 2 года (балл 3), среднегодовой окружности прироста главного побега – 9,5 см (балл 2), среднегодовой длины прироста главного побега – 21,1 см (балл 3); среднегодового количества боковых побегов – 3,7 шт. (балл 2). Сумма баллов составляет 1+3+2+3+2=11. Среднее арифметическое 11/5 равно 2,2. Округляя, получаем интегральный балл 2, что соответствует фоновому состоянию окружающей среды района исследования.

Следует отметить, что чем выше плотность хвой, тем больше количество брахибластов на удлинённых побегах. Их рост стимулирован повреждением фотосинтетического аппарата сосны обыкновенной, т.е. компенсаторным эффектом, поэтому наименьшие значения признака свидетельствуют о лучшем состоянии окружающей среды

(до 1,1) – 1 балл – условная норма. Последовательность значений в остальных группах признаков обратная, поскольку снижение интенсивности нарастания и ветвления побегов свидетельствует об ухудшении состояния окружающей среды.

Заключение

Предложенная методика не претендует на исчерпывающую полноту. Это лишь попытка интегральной балльной оценки экологического состояния лесных биоценозов по метрическим параметрам сосны обыкновенной. Возможно, в других регионах страны [12-14] будут получены иные результаты, и им будет дана иная интерпретация.

Список литературы

1. Алексеев С.В., Груздева Н.В., Муравьев А.Г., Гушина Э.В. Практикум по экологии: учебное пособие / под ред. С.В. Алексеева. М.: АО МДС, 1996. 189 с.
2. Ашихмина Т.Я. Экологический мониторинг. М.: Академический проект, 2005. 416 с.
3. Мелехова О.П., Егорова Е.И. Биологический контроль окружающей среды: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: ИЦ Академия, 2007. 288 с.
4. Зыков И.Е., Федорова Л.В. Современные технологии биоиндикации: методические рекомендации по организации и проведению научно-исследовательской работы в школе и ВУЗе. Орехово-Зуево: РИО ГГТУ, 2016. 40 с.
5. Федорова А.И., Никольская А.Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Гуманитарный издательский центр ВЛАДОС, 2001. 288 с.
6. Лебедев В.Г. Анализ изменчивости количественных признаков хвой сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в связи с дифференциацией популяций: дис. ... канд. биол. наук. Киров, 2014. 146 с.

7. Шаяхметова Р.И., Егорова Н.Н. Анатомические особенности хвои сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Нижневартовского района, Хмао-Югра // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2016. № 6 (140). С. 72-77.
8. Данчева А.В., Залесов С.В. Использование комплексного оценочного показателя при оценке состояния сосняков государственного лесного природного резервата «Семей Орманы» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 215. С. 41–54. DOI: 10.21266/2079-4304.2016.215.41-54.
9. Вахнина И.Л., Ларин В.С., Пак Л.Н. Влияние эколого-генетических факторов на морфометрические параметры и динамику годичного прироста древесины в испытательных культурах *Pinus sylvestris* L // Успехи современного естествознания. 2020. № 1. С. 5-11.
10. Общая теория статистики: учебник / под ред. М.Г. Назарова. М.: Омега-Л, 2018. 320 с.
11. Лысенко С.Н. Дмитриева И.А. Общая теория статистики: учебное пособие. М.: Вузовский учебник, 2019. 216 с.
12. Данчева А.В., Залесов С.В. Взаимосвязь параметров ассимиляционного аппарата деревьев с коэффициентом напряженности роста в сосняках Барнаульского ГНПП // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2017. № 3. С. 4-12. DOI 10.21178/2079-6080.2017.3.4.
13. Захаров А.Б. Дендроиндикация загрязненности окружающей среды урбанизированных территорий на примере искусственных популяций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) Балахнинской низменности: дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2014. 140 с.
14. Скрипальщикова Л.Н. Морфолого-анатомические особенности хвои сосны обыкновенной под влиянием промышленных выбросов города Красноярска // Сибирский лесной журнал. 2016. № 3. С. 46-56.