

# ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТА И ВИДА ФОРОФИТА НА АДЕКВАТНОСТЬ МОДЕЛИ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОЩАДИ ПРОЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ ЛИШАЙНИКАМИ ОТ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

О. Н. Федосеев<sup>1)</sup>, Д. А. Морозов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ул. Германа Титова, 28, 440028, г. Пенза, Российской Федерации, OlegF1962@mail.ru

**Аннотация.** Для получения объективной картины загрязнения атмосферного воздуха необходимы исследования в двух направлениях: инструментального химического анализа и биоиндикации. Используя математическую модель зависимости площади проективного покрытия лишайниками от концентрации в воздухе оксидов азота и серы, а также освещенности и относительной влажности воздуха была разработана функция подгонки, использующая два дополнительных фактора влияния – вида (клен, тополь, вяз) и возраста форофита, оцененного по диаметру ствола. В результате относительная погрешность модели снизилась в среднем на 25,7 %.

**Ключевые слова:** лихеноиндикация; загрязнение атмосферы; математические модели.

## INFLUENCE OF AGE AND TYPE OF PHOROPHYTE ON ADEQUACY OF MODEL OF DEPENDENCE OF AREA OF PROJECTIVE LICHEN COVERAGE ON ENVIRONMENTAL FACTORS

О. Н. Fedoseev<sup>1)</sup>, Д. А. Morozov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Penza State University of Architecture and Construction, Germana Titova str., 440028, Penza, Russian Federation, OlegF1962@mail.ru

**Annotation.** To obtain an objective picture of atmospheric air pollution, research is required in two directions: instrumental chemical analysis and bioindication. Using a mathematical model to describe the dependence of the area of projective lichen cover on the concentration of nitrogen and sulfur oxides in the air, as well as illumination and relative air humidity, a fitting function was developed that uses two additional influencing factors – species (maple, poplar, elm) and the age of the phorophyte, estimated by trunk diameter. As a result, the relative error of the model decreased by an average of 25.7 %.

**Keywords:** lichenoindication; air pollution; mathematical models.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2025-2-255-260>

Использование организмов, реагирующих на загрязнение окружающей среды изменением численности своей популяции, имеет ряд преимуществ. Оно позволяет существенно сократить или даже исключить применение дорогостоящих и трудоемких физико-химических методов анализа. Биоиндикаторы суммируют значимые биологические эффекты, как загрязнений, так и изменения других факторов среды. Это используется при определении скорости происходящих изменений, путей и мест концентрации в экосистемах токсикантов, делать выводы о степени опасности для человека и полезной биоты конкретных веществ или их сочетаний.

Одним из направлений биоиндикационного определения загрязнения атмосферного воздуха служит лихеноиндикация [1]. Для организации математической модели зависимости площади проективного покрытия лишайниками от факторов среды имеет значение не только уровни загрязнения воздуха, но и характер местообитания лишайников. В исследованиях

прошлых лет [2] выяснено, что общее влияние факторов, организованных в исследовании (загрязненности воздуха окислами азота и серы, освещенности и относительной влажности) составило 45 %.

Целью настоящей работы стало выяснение – как влияет на площадь проективного покрытия лишайниками вид и возраст форофита, а также разработка корректирующих компонентов в разработанную нами ранее модель [2].

**Материал и методы.** Для проведения исследований были выбраны ранее использованные площадки, расположенные рядом с интенсивной транспортно-дорожной сетью в ЦПКиО им. Белинского, и в скверах, расположенных рядом с библиотекой им. Лермонтова города Пензы. Исследования проводились в 2022-2024 гг. в три этапа. Измерение загрязненности атмосферы производилось газоанализатором УГ-2, аспиратор НП-3М, зонд пробоотборный ЗП-ГХК-ПВ, индикаторные трубы серии ТИ, тестированные в лаборатории экологического мониторинга ЦГСЭН №59. Диаметр ствола измерялся на высоте 1,3 м. Определение видов лишайников проводились согласно справочнику-определителю [3]. Для определения степени комфортности условий произрастанию лихенофлоры использовали методикой измерения проективного покрытия А.В. Пчёлкина и А.С. Боголюбова [4]. Аппроксимация зависимостей производилась с помощью программы Simple-Formula. Для исследования использовались следующие виды форофита: клен американский, тополь черный, вяз и липа мелколистная.

Математическая модель, используемая для доработки имеет вид:

$$\Pi = \frac{0,42}{C_{SO_2} + C_{NO_x}} + \frac{29,8 \cdot \varphi}{L} - 17,1(C_{SO_2} + C_{NO_x}) - 0,16 \frac{L}{\varphi}, \quad (1)$$

где:  $C_{SO_2}$  – концентрация диоксида серы, мг/м<sup>3</sup>;  $C_{NO_x}$  – концентрация оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – относительная влажность атмосферного воздуха, %;  $L$  – освещенность, Лк [2].

**Результаты и обсуждение.** Для доработки обобщенной модели зависимости площади обрастания лишайниками форофита необходимо воспользоваться методом функции подгонки [5]. Для этого необходимо произвести регрессионный анализ зависимости разницы между теоретическими и эмпирическими значениями проективного покрытия и диаметром ствола.

Корреляционный анализ (табл. 1) показал, что связь между этими факторами очень сильная, что подтверждает принятую нами ранее рабочую гипотезу о том, что ошибку в модели формируют неучтенные факторы, а именно, возраст деревьев и качественные характеристики форофита, его “адгезия” к лишайникам. Все коэффициенты получились выше среднего и достоверны для порога вероятности не ниже 0,95 (кроме липы со слабой репрезентативностью выборки).

**Таблица 1.**  
**Результаты анализа связи разницы теоретических и эмпирических значений**  
**проективного покрытия форофита и диаметра деревьев**

Вид дерева	Коэффициент корреляции $r \pm m_r$	Достоверность по Стьюденту	Стандарты Стьюдента
Клен	<b><math>0,78 \pm 0,12</math></b>	6,7	{2,1-2,8-3,7}
Тополь	<b><math>0,53 \pm 0,18</math></b>	2,9	{2,1-2,8-3,8}
Вяз	<b><math>0,76 \pm 0,12</math></b>	6,1	{2,1-2,8-3,7}
Липа	$0,75 \pm 0,33$	2,3	{2,8-4,6-8,6}

Выделены достоверные значения.

В качестве функции подгонки нами было выбрано отношение теоретической площади покрытия к площади, полученной в натурных исследованиях 2023 и 2024 гг. (коэффициент возраста ( $V$ )).

$$V = \Pi_{\text{т}} / \Pi_{\text{э}}, \quad (2)$$

где:  $V$  – коэффициент возраста;  $\Pi_{\text{т}}$  – теоретическое проективное покрытие форофита, %;  $\Pi_{\text{э}}$  – эмпирическое проективное покрытие форофита, %;

Доказательство зависимости диаметра ствола и возраста дерева не требуется, ибо данный факт в условиях нормальной окружающей среды не подлежит сомнению, а в практическом использовании более удобным показателем как раз является диаметр ствола, а не возраст дерева (отпадает необходимость травмировать дерево для определения его возраста).

Однако в исходном виде связать диаметр ствола форофита с функцией подгонки было бы неверно, так как в исследованиях прошлых лет диаметр форофита имел не нулевое значение. В этой связи в качестве анализируемого фактора влияния нами использованы не абсолютные значения диаметра ствола, а отношение между диаметром ствола в наших исследованиях и средним диаметром ствола в предыдущих исследованиях [2] (30 см). Функция подгонки будет выглядеть следующим образом:

$$V = f(D/30), \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр ствола дерева, см.

Связь значений функции подгонки и параметра  $D/30$  оказалась очень высокой и достоверной (табл. 2).

Таблица 2.

**Результаты полного корреляционного анализа зависимости функции возраста и коэффициента подгонки**

Вид дерева	Корреляция $r \pm mr$	Достоверность, $t$	$t_{\text{st}}$
Клен	$0,73 \pm 0,13$	5,6	{2,1-2,8-3,7}
Тополь	$0,95 \pm 0,06$	16,2	{2,1-2,8-3,8}
Вяз	$0,92 \pm 0,07$	12,5	{2,1-2,8-3,7}
Коэффициент прямолинейной связи $r^2 \pm mr^2$		Достоверность, $F$	$F_{\text{st}}$
Клен	$0,53 \pm 0,10$	5,4	{2,6-3,9-6,0}
Тополь	$0,90 \pm 0,02$	44,9	{2,6-3,9-6,0}
Вяз	$0,85 \pm 0,03$	26,8	{2,6-3,9-6,0}
Критерий криволинейности			$F_{\text{st}}$
Клен	0,23		{2,8-4,2-6,6}
Тополь	2,80		{2,8-4,6-6,6}
Вяз	0,11		{2,8-4,2-6,6}

Полный корреляционный анализ также показал, что исследуемую функцию можно выразить с помощью линейной зависимости (высокие и достоверные показатели прямолинейной связи и недостоверные критерии криволинейности (кроме тополя, у которого критерий криволинейности оказался достоверным для нижнего порога вероятности (0,95). Графическое изображение данной зависимости можно увидеть на рис. 1.

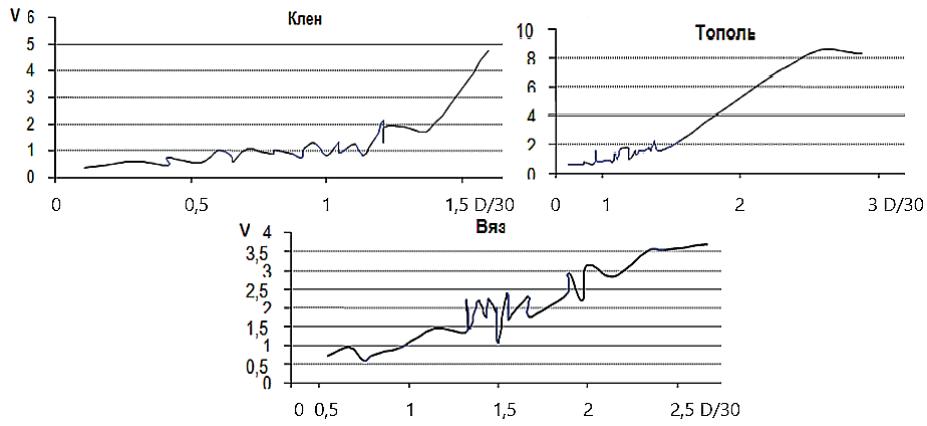


Рис. 1. Зависимости коэффициента подгонки (V) от функции возраста (D/30)

Интересно отметить, что полученные графики сильно напоминают логистические кривые роста популяции, особенно в их нижней экспоненциальной части. И это закономерно, так как показатель  $V$  по своей сути представляет собой относительную плотность популяции лишайников, а переменная  $D/30$  связана с возрастом форофита, а, следовательно, и с возрастом популяции лишайников. В связи с этим правильно было бы вводить поправочный коэффициент с помощью логистического уравнения популяционного роста. Использование в расчете возрастного коэффициента логистического уравнения позволяет применять модель 1 [2] для любого возраста форофита, а не только для тех, которые оказались у нас в выборке. Но это задача будущих исследований, нам же осталось аппроксимировать исследуемые зависимости и ввести возрастной коэффициент в целевую функцию зависимости проективного покрытия от факторов среды.

Результаты аппроксимации представлены в табл. 3.

Таблица 3.

**Параметры линейной зависимости возрастного коэффициента ( $V$ ) от функции ( $D/30$ )  $V=A(D/30)+B$**

Вид дерева	A	B	$\delta$	Макс. отклонение
Клен	1,65	-0,28	0,15	-0,61
Тополь	3,96	-3,25	0,29	1,35
Вяз	1,60	-0,42	0,07	0,44

Зависимость скорости обрастания форофита лишайниками сугубо видоспецифична, однако, можно заметить, что коэффициенты регрессии линейной зависимости (см. табл. 3) у клена и вяза отличаются от коэффициентов тополя гораздо больше, чем друг от друга. Это может быть связано, во-первых с более высокой скоростью роста тополя, по сравнению с кленом и, тем более, с вязом, во-вторых тополи имеют пахучую смолу, имеющую, по-видимому, какое-то действие на скорость их заселения лишайниками. В итоге целевая функция принимает вид:

$$P = \left( \frac{0,42}{C_{SO_2} + C_{NO_x}} + \frac{29,8\phi}{L} - 17,1(C_{SO_2} + C_{NO_x}) - 0,16 \frac{L}{\phi} \right) / V \quad (4)$$

где:  $C_{SO_2}$  – концентрация диоксида серы,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $C_{NO_x}$  – концентрация оксидов азота,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $\phi$  – относительная влажность атмосферного воздуха, %;  $L$  – освещенность,  $\text{Лк}$ ;  $V$  – возрастной коэффициент, равный для клена  $V=0,055D-0,28$ ; тополя  $V=0,132D-3,25$ ; вяза  $V=0,053D-0,42$ ;  $D$  – диаметр деревьев на высоте 1,3 м, см.

Полученная модель использовалась в виде компьютерной программы. Данные по проверке адекватности полученной математической модели представлены на рис. 2.

Разность эмпирического и теоретического рядов регрессий оказалась недостоверной (табл. 4). Критерий разности среднего уровня течения процесса и критерии непараллельности течения процессов во всех случаях низкие и недостоверные. Следовательно, мы не можем сделать заключение о различии данных полевых наблюдений и теоретических, рассчитанных с помощью модели 4.

Таблица 4.

**Результаты сравнительного анализа динамики процессов связи факторов среды и площади проективного покрытия по типу двухфакторного дисперсионного комплекса**

Вид дерева	Критерий различия среднего уровня	$F_{st}$	Критерий непараллельности	$F_{st}$	
Клен	1,8	{4,0-7,2-12,3}	0,5	{2,4-3,4-5,0}	
Тополь	1,5	{4,1-7,4-13,0}	0,5	{2,5-3,8-5,3}	
Вяз	0,2	{4,0-7,2-12,4}	0,1	{2,4-3,4-5,0}	
Влияние факторов среды на результативный признак					
	Сила влияния	Досто-верность, F	$F_{st}$	Сила влияния	
	Теоретические значения			Натурные наблюдения	
Клен	<b>0,31</b>	2,6	{2,6-3,9-6,0}	<b>0,52</b>	5,1
Тополь	<b>0,52</b>	3,9	{2,8-4,2-6,8}	<b>0,66</b>	7,1
Вяз	<b>0,41</b>	3,2	{2,6-4,0-6,1}	<b>0,40</b>	3,1

Влияние места расположения форофита на проективное покрытие во всех случаях достоверно для нижнего порога вероятности безошибочных прогнозов. Для всех видов деревьев влияние условий окружающей среды, организованных в математической модели может составить 34 ÷ 60 % от влияния всей суммы факторов.

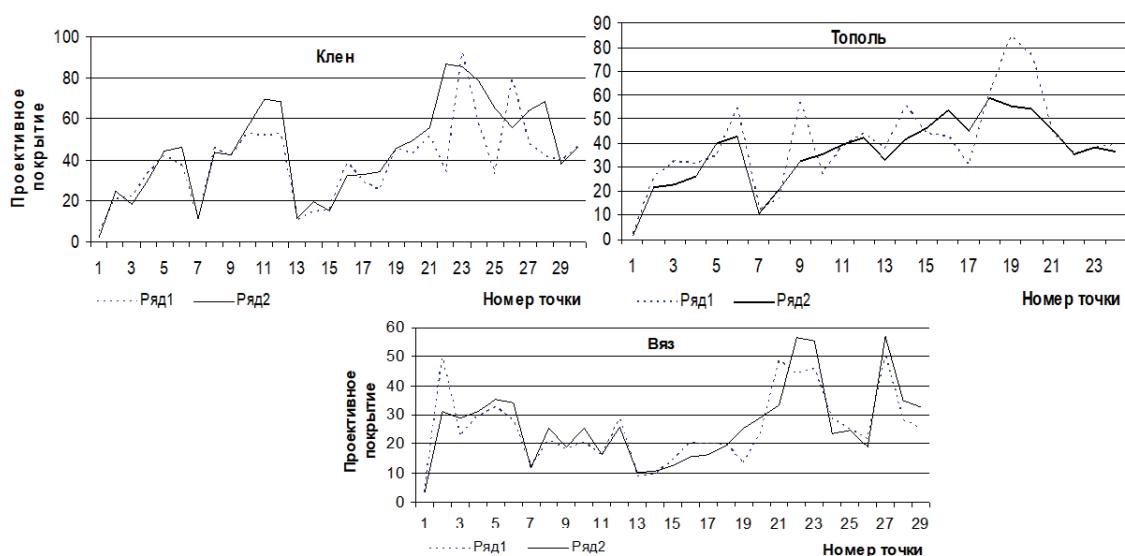


Рис. 2. Сравнение эмпирических данных площади проективного покрытия и данных, полученных с помощью математической модели. Ряд 1 – данные модели, ряд 2 – эмпирические точки

Погрешность математической модели 4 составляет: для клена  $12,7 \pm 5,4\%$ ; для тополя  $10,1 \pm 6,2\%$ ; для вяза  $4,3 \pm 4,8\%$ . Для сравнения приведем погрешности, полученные при использовании для тех же расчетов модели 1 [2], они составляют: для клена  $19,7 \pm 7,3\%$ ; для тополя  $23,6 \pm 8,5\%$ ; для вяза  $60,8 \pm 12,3\%$ . Налицо неоспоримое преимущество введения в модель функции возраста.

**Заключение.** Не существует модели универсальной, а усложнять модели, в смысле введения все новых факторов, влияющих на процесс проективного покрытия форофита лишайниками, можно безгранично. И в каждой практической задаче требования, к ним предъявляемые, и будут определять тип используемых для решения моделей. В данном случае, используя модель 4, можно с достаточно высокой достоверностью прогнозировать загрязнение атмосферы оксидами азота и серы.

### Библиографические ссылки

1. Козинцев С. Н. Модели и методика биоиндикационной оценки геоэкологического состояния атмосферы техногенно нарушенных территорий: дис. канд. геогр. наук: 25.00.36.- ФГБОУ ВПО Воронежский государственный университет. Воронеж. 2013. 137 с
2. Федосеев О. Н., Хурнова Л. М., Мамина Д. Х. Исследование зависимости проективного покрытия лишайниками форофита от ключевых факторов среды // Естественные и технические науки. №10 (173). М., Издательство «Спутник+», 2022. С. 71-76.
3. Справочник-определитель: URL: <http://www.fadr.msu.ru/opred/> (7.01.2025).
4. Пчелкин А. В., Боголюбов А. С. Методы лихеноиндикации загрязнений окружающей среды // М., Экосистема. 1997. 27 с.
5. Нелинейное оценивание // Электронный учебник StatSoft. 1998. URL: <https://dit.isuct.ru/IVT/BOOKS/IS/is7/Modules/stnonlin.html> (27.01.2025).