

С. В. Бугров  
С. В. Бугрова

### Статистическая оценка взаимосвязи эколого-морфологических показателей березы повислой (*Betula pendula* Roth) с условиями ее произрастания в городах Самарской области

В статье на основе методов корреляционного и регрессионного анализов, а также теста Краскела — Уоллиса и диаграммы размахов оценивается биоиндикационный потенциал показателей жизненного состояния древостоев и флуктуирующей асимметрии листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth), произрастающей в городах Самаре и Сызрани. По величине флуктуирующей асимметрии было установлено, что в этих городах уровень антропогенной нагрузки увеличивается в следующем ряду функциональных зон: парк < жилая зона < промышленная зона < автодорога < железная дорога. Жизненное состояние насаждений березы слабо связано с типом функциональной зоны городов, но имеет положительную корреляционную связь средней силы с величиной флуктуирующей асимметрии ее листьев.

**Ключевые слова:** Самара, Сызрань, береза повислая, жизненное состояние древостоя, флуктуирующая асимметрия, функциональная зона, антропогенное воздействие, модель линейной регрессии.

#### Введение

Интерес к изучению состояния окружающей среды на урбанизированных территориях определяется тем, что города являются основными центрами промышленного производства, коммуникационными и транспортными узлами, в них живет большая часть населения земного шара. В этой связи урбоэкосистемы, как центры антропогенной активности, в значительной степени подвержены негативному воздействию различных техногенных факторов, таких как химическое загрязнение основных природных сред, рост физических воздействий (электромагнитные поля, свет, шум, вибрация), трансформация основных характеристик атмосферного воздуха, природных вод, геологической среды, почвенного покрова и др. Одним из эффективных способов оценки качества природной среды является биоиндикация — использование относительно легко выявляемых показателей жизнедеятельности организмов-биоиндикаторов для определения изменений параметров среды обитания [18].

В последние годы достаточно широкое применение получил простой и малозатратный метод биоиндикации — измерение величины флуктуирующей асимметрии (ФА) листьев древесных растений [6; 28]. В основе метода лежит представление о том, что нарушение билатеральной симметрии, свойственной большинству животных, а также некоторым органам растений, усиливается под действием стрессовых факторов окружающей среды [9].

Считается, что асимметричность листовой пластинки, наиболее чувствительного к негативным воздействиям органа растения, отражает стабильность развития всего организма в целом или его части [13]. Проявляющиеся морфологические отклонения являются ответной реакцией растения на весь спектр внешних отрицательных воздействий, что и позволяет использовать данный показатель для определения качества среды [8]. Так, например, накопление вредных веществ приводит к деформации и уменьшению площади листа вследствие замедления ростовых процессов, что проявляется в усилении его асимметричности [4; 15].

© Бугров С. В., Бугрова С. В., 2020

При проведении исследований важно правильно подобрать растительный организм-биоиндикатор. Он должен отличаться высокой чувствительностью к исследуемому фактору, стабильностью отклика, а также быть достаточно распространенным и легко доступным. Идеальных биоиндикаторов не существует, однако обзор литературы показал, что достаточно часто используются тополь черный, ива белая, липа сердцевидная, береза повислая [1; 12; 14; 16; 19; 20; 24—26]. В то же время в экспериментах со смолевкой обыкновенной было установлено, что этот вид не может использоваться в качестве биоиндикатора в связи с отсутствием корреляции между значением ФА ее листьев и силой различных стрессовых воздействий [29].

#### **Условия, объекты и методы исследования**

В нашем исследовании оценивалась величина ФА листовой пластинки березы в двух городах Самарской области, различающихся по уровню антропогенной нагрузки: Самаре и Сызрани.

Самара расположена на левом берегу Саратовского водохранилища, между устьями рек Самара и Сок. Площадь территории города составляет 54 140 га, а численность населения 1 млн. 156 тыс. человек. Климат в г. Самаре умеренно континентальный. По результатам многолетних наблюдений установлено, что средняя годовая температура воздуха в городе составляет +5,5°C. Самый теплый месяц — июль со средней температурой +20,1°C. Самым холодным месяцем является январь со среднемесячной температурой -11°C. За год выпадает около 560 мм осадков [5; 22]. Территория города находится в юго-западной части геоморфологической провинции Высокого Заволжья. Форма рельефа умеренно холмистая [23]. Самара расположена в переходной зоне между степью и лесостепью, в почвенном покрове преобладают типичные и обыкновенные черноземы, приуроченные к степным участкам [5; 21].

Городской округ Самара является крупнейшим промышленным центром Среднего Поволжья и крупным транспортным узлом. Основными источниками загрязнения атмосферы здесь являются предприятия строительной, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, электротехнической, металлургической, авиаприборостроительной, топливно-энергетической отраслей промышленности, а также автомобильный и железнодорожный транспорт. Выбросы от стационарных источников составляют около 26 тыс. тонн в год. Количество зарегистрированного автомобильного транспорта — 465 981 ед. [10; 27].

Город Сызрань расположен вдоль правого берега Саратовского водохранилища, при впадении реки Сызранка в Волгу. Площадь города составляет 11 700 га, численность населения 170 тыс. человек. Климат умеренно континентальный. Средняя годовая температура воздуха в городе составляет +5,0°C. Самый теплый месяц — июль со средней температурой +20,1°C. Самым холодным месяцем является январь со среднемесячной температурой -10,3°C. За год выпадает около 440 мм осадков [5; 22]. Сызрань расположена на восточной границе Приволжской возвышенности в лесостепной зоне. Основной формой рельефа является слабохолмистая равнина, которую пересекают овраги и пойменные террасы [23]. В почвенном покрове значительное распространение получили выщелоченные и оподзоленные черноземы [5; 21].

Приоритетными загрязнителями воздушного бассейна г. Сызрань являются оксиды азота, сернистый ангидрид, пыль, бенз(а)пирен, окись углерода [10]. Максимальный вклад в загрязнение атмосферного воздуха г. Сызрань вносят предприятия нефтепереработки, нефтехимии, машиностроения, ТЭЦ, железнодорожный и автомобильный транспорт. В среднем за год от стационарных источников, расположенных на территории Сызрани, выбрасывается 15 тыс. тонн загрязняющих веществ. Число зарегистрированных автомобильных транспортных средств составляет 52 575 ед. [27].

В качестве биоиндикатора была выбрана береза повислая (*Betula pendula* Roth), поскольку этот вид широко представлен в системах озеленения территории обоих городов и часто применяется в аналогичных исследованиях. Расчет ФА выполнялся согласно методике В. М. Захарова [11].

Сбор образцов производился с нижней части кроны в летний период 2018 г. после прекращения фазы роста листьев — в конце июля и начале августа. В общей сложности было изучено 210 деревьев березы повислой, произрастающих на 42 пробных площадях (26 — в Сызрани и 16 — в Самаре). В зависимости от характера основного использования каждая пробная площадь отнесена к одной из пяти функциональных зон, различающихся степенью антропогенной нагрузки: парки и скверы, жилая зона, промышленная зона, автодорога и железная дорога.

Помимо сбора листовых образцов для каждого дерева визуально оценивались и заносились в полевой журнал такие диагностические признаки, как густота кроны, наличие сухих ветвей, степень поврежденности листьев, также определялись высота дерева и диаметр ствола. По этим диагностическим признакам каждому растению был присвоен определенный балл на основании шкалы категорий жизненного состояния деревьев: 1 — здоровое дерево; 2 — поврежденное (ослабленное) дерево; 3 — сильно поврежденное дерево; 4 — отмирающее дерево; 5 — сухостой. В дальнейшем для каждого участка было рассчитано относительное жизненное состояние древостоя по известной методике [2; 3].

Результаты анализа состояния окружающей среды по уровню флуктуирующей асимметрии в Самаре и Сызрани подробно исследовались ранее [7]. В настоящей статье принята попытка провести дополнительное статистическое исследование с целью установления возможных скрытых закономерностей в имеющихся данных. Статистический анализ, обработка и визуализация информации проводились в среде R.

### Результаты и их обсуждение

Средние значения флуктуирующей асимметрии, диагностических признаков деревьев и состояние древостоя для каждой пробной площади приведены в таблице 1.

Таблица 1

Средние значения флуктуирующей асимметрии и диагностических показателей деревьев для изучаемых пробных площадей

Номер пробной площади	Зона	ФА	Высота дерева, м	Диаметр ствола, м	Плотность кроны, %	Сухие ветви, %	Поврежденность листьев, %	Состояние древостоя, %
<b>Самара</b>								
1	Жилая	0,047	18,4	0,20	88	9	8	100
2	Жилая	0,047	19,4	0,28	83	16	12	88
3	Автодорога	0,047	18,8	0,33	90	8	5	94
4	Парк	0,046	17,6	0,29	87	12	5	88
5	Промышленная	0,048	17,4	0,23	84	20	5	82
6	Жилая	0,049	20,0	0,27	76	20	13	78
7	Автодорога	0,051	17,2	0,24	85	15	15	78
8	Автодорога	0,058	17,4	0,28	85	25	11	64
9	Парк	0,047	19,6	0,20	72	9	10	70

Продолжение табл. 1

Номер пробной площади	Зона	ФА	Высота дерева, м	Диаметр ствола, м	Плотность кроны, %	Сухие ветви, %	Поврежденность листьев, %	Состояние древостоя, %
10	Жилая	0,044	16,4	0,18	92	8	12	88
11	Парк	0,042	17,2	0,26	90	11	5	100
12	Промышленная	0,049	18,4	0,26	77	25	15	70
13	Промышленная	0,044	19,2	0,30	90	11	8	88
14	Парк	0,046	16,5	0,25	80	23	9	70
15	Парк	0,047	20,0	0,30	95	9	11	94
16	Промышленная	0,048	17,8	0,21	85	19	15	76
<b>Сызрань</b>								
1	Жилая	0,046	22,0	0,30	54	39	10	70
2	Автомобильная	0,050	21,8	0,28	73	19	13	70
3	Парк	0,046	24,0	0,29	68	11	12	82
4	Промышленная	0,049	20,4	0,33	78	19	3	76
5	Жел. дорога	0,050	19,7	0,33	77	15	29	50
6	Жилая	0,045	22,2	0,39	86	6	3	94
7	Автомобильная	0,047	17,0	0,19	66	19	5	75
8	Парк	0,046	17,4	0,18	87	9	8	88
9	Парк	0,044	20,0	0,34	86	9	4	94
10	Жилая	0,048	19,4	0,35	92	9	4	100
11	Автомобильная	0,050	18,0	0,29	78	20	5	76
12	Парк	0,048	19,6	0,34	80	12	7	82
13	Промышленная	0,049	18,4	0,30	83	17	4	82
14	Жел. дорога	0,047	21,0	0,35	81	20	5	85
15	Парк	0,048	16,2	0,20	92	5	4	93
16	Жилая	0,046	16,0	0,21	89	9	11	93
17	Автомобильная	0,050	23,8	0,37	94	5	13	88
18	Промышленная	0,047	20,0	0,30	93	8	13	94
19	Жел. дорога	0,054	22,0	0,30	92	8	10	88
20	Жилая	0,047	18,4	0,25	88	10	7	88
21	Автомобильная	0,047	19,2	0,27	88	9	17	79
22	Парк	0,046	22,7	0,32	94	5	5	100
23	Промышленная	0,047	17,4	0,26	95	5	3	100
24	Жилая	0,047	18,8	0,32	29	9	14	82
25	Автомобильная	0,048	20,2	0,33	94	10	17	82
26	Жилая	0,047	17,4	0,33	94	10	17	70

Разведочный анализ представляет собой эффективный способ оценки основных свойств данных, установления имеющихся в них закономерностей, распределений. Одним из действенных методов разведочного анализа является определение корреляции

онных зависимостей между переменными в корреляционной матрице. В связи с тем что часть данных представлена в порядковых шкалах, было решено использовать коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Для порядковых шкал ранги назначались по мере увеличения антропогенной нагрузки следующим образом: для параметра «город»: Сызрань — 1, Самара — 2; для параметра «зона»: парк — 1, жилая зона — 2, промышленная зона — 3, автодорога — 4, железная дорога — 5. При расчете использовались средние значения каждого параметра по участку. Матрица корреляций представлена в таблице 2.

Таблица 2

Матрица корреляций между диагностическими признаками деревьев, жизненным состоянием древостоя, значением ФА и антропогенной нагрузкой

	Город	Зона	ФА	Высота дерева	Диаметр ствола	Плотность кроны	Сухие ветви	Поврежденность листьев	Состояние древостоя
Город	1	—	-0,05	-0,35	-0,37	0,01	0,21	0,07	-0,08
Зона	—	1	0,58	0,12	0,20	-0,04	0,21	0,31	-0,33
ФА	-0,05	0,58	1	0,07	0,08	-0,04	0,26	0,24	-0,40
Высота дерева	-0,35	0,12	0,07	1	0,63	-0,21	-0,04	0,08	0,02
Диаметр ствола	-0,37	0,20	0,08	0,63	1	0,13	-0,08	-0,01	0,05
Плотность кроны	0,01	-0,04	-0,04	-0,21	0,13	1	-0,74	-0,05	0,60
Сухие ветви	0,21	0,21	0,26	-0,04	-0,08	-0,74	1	0,09	-0,64
Поврежденность листьев	0,07	0,31	0,24	0,08	-0,01	-0,05	0,09	1	-0,57
Состояние древостоя	-0,08	-0,33	-0,40	0,02	0,05	0,60	-0,64	-0,57	1

Из корреляционной матрицы можно заключить, что значение флуктуирующей асимметрии увеличивается по мере усиления антропогенной нагрузки, связанной со способом использования зоны города, на которой расположена пробная площадь. Также наблюдается отрицательная связь между ФА и состоянием древостоя: при ухудшении состояния древостоя можно ожидать увеличения значения ФА. В то же время величина ФА никак не связана с конкретным городом, в котором были отобраны образцы березовых листьев. Жизненное состояние древостоя, в свою очередь, также несколько ухудшается по мере увеличения антропогенной нагрузки.

Чтобы установить значимость различий между группами, в данном случае между функциональными зонами городов и отдельными городами, использовался дисперсионный анализ, основанный на сравнении средних групповых значений. Одним из условий применения дисперсионного анализа является нормальность распределения значений, однако, как показывают результаты теста Шапиро — Уилка, гипотеза о нормальности распределения значений ФА отклоняется с большой долей вероятности. В этой ситуации можно воспользоваться непараметрическим аналогом дисперсионного анализа — критерием (тестом) Краскела — Уоллиса.

Результаты анализа приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значимость различий (p-value) между функциональными зонами и городами согласно тесту Краскела — Уоллиса

	ФА	Высота дерева	Диаметр ствола	Плотность кроны	Сухие ветви	Поврежденность листьев	Состояние древостоя
Зона	0,002	0,506	0,586	0,980	0,644	0,328	0,374
Город	0,455	0,02	0,01	0,486	0,053	0,313	0,531

Согласно результатам теста Краскела — Уоллиса, действительно значимым является лишь различие величины флуктуирующей асимметрии между функциональными зонами. В Самаре и Сызрани, а также в различных функциональных зонах этих городов не наблюдается значительных различий в состоянии древостоя.

Чтобы определить, как именно изменяется уровень ФА между функциональными зонами, была построена диаграмма размахов, или «ящик с усами» (рис. 1). Жирная линия обозначает медиану, высота прямоугольников — интерквартильный размах, ширина прямоугольников пропорциональна квадратному корню из числа наблюдений в каждой группе, верхний и нижний «усы» отмечают максимальное и минимальное значения, находящиеся в пределах полутора интерквартильных расстояний от границ, точки — возможные выбросы [17].

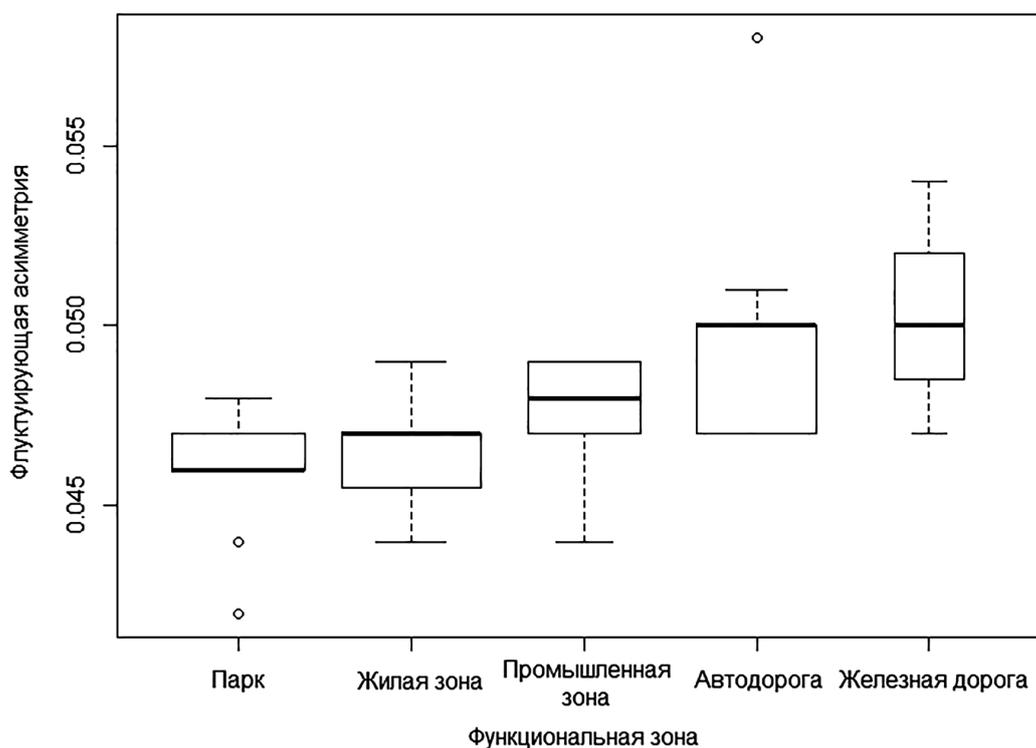


Рис 1. Диаграмма размахов, отображающая разницу в значении ФА между различными функциональными зонами в городах Самаре и Сызрани

Анализ диаграммы размахов позволяет заключить, что имеется следующая тенденция к увеличению значения флуктуирующей асимметрии: парк < жилая зона < промышленная зона < автодорога < железная дорога. Отметим, что парковая и жилая зоны почти не различаются между собой. Точно так же почти не различаются автодорога и железная дорога. Вероятно, это связано со сходностью условий произрастания. Так, парки и скве-

ры часто располагаются внутри селитебных территорий, а деревья, находящиеся возле железнодорожных и автотранспортных путей, могут подвергаться воздействию одних и тех же негативных факторов, например вибраций, шумов или загрязнения органическими и неорганическими поллютантами. Пробные площади, находящиеся возле промышленных предприятий, занимают промежуточное положение.

Для более полного изучения характера связи между имеющимися данными были построены несколько линейных регрессионных моделей, описывающих влияние различных параметров (предикторов) на значение флуктуирующей асимметрии. Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Коэффициенты и характеристики линейных регрессионных моделей

Характеристики модели		Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Параметры модели	Свободный член	0,0553***	0,046***	0,05067***	0,051***
	Состояние древостоя	-0,00009348***	—	-0,00005346*	-0,00005521*
	x2	—	0,0005000	0,0003494	0,001235
	x3	—	0,0016250	0,001421	0,003188***
	x4	—	0,0037778***	0,0033***	—
x5	—	0,0043333***	0,003639**	—	
Стандартное отклонение остатков модели (RSE)		0,002470	0,002243	0,002188	0,02137
Скорректированный коэффициент детерминации		0,1624	0,2929	0,327	0,3581
F-критерий		7,952	5,349	5,082	8,811
Статистическая значимость модели (p-value)		0,0073	0,0016	0,0012	0,0001

\* p-value < 0,1; \*\* p-value < 0,05; \*\*\* p-value < 0,01.

Модель 1 представляет собой зависимость изменения среднего значения величины ФА от жизненного состояния древостоя на участке. Согласно уравнению, при лучшем состоянии древостоя можно ожидать меньшего значения флуктуирующей асимметрии листовой пластинки. Однако, несмотря на высокую статистическую значимость модели, очевидно, что данных лишь о жизненном состоянии древостоя недостаточно для предсказания ФА: доля объясненного моделью разброса значений составляет 16,2% (в данном случае использовался нескорректированный коэффициент детерминации). Графическое изображение модели приведено на рисунке 2.

Модель 2 включает в качестве предиктора другой сильно коррелирующий фактор — тип функциональной зоны, на которой были отобраны образцы. Поскольку в качестве предиктора для линейной регрессионной модели должна быть использована непрерывная переменная, а тип зоны измеряется в порядковой шкале, было решено преобразовать его в фиктивную переменную в соответствии с таблицей 5. Таким образом были получены пять дихотомических переменных (по числу зон) и пять коэффициентов для них, имеющих смысл лишь в случае нахождения пробной площади в определенной функциональной зоне.

Исходя из параметров новой модели можно заключить, что она по сравнению с первой точнее описывает изменения данных: имеет большую статистическую значимость, объясняет 29,3% разброса, имеет меньшее стандартное отклонение остатков. Кроме того, предсказание модели 2 позволяет установить, как именно изменяется флуктуирующая

асимметрия в различных функциональных зонах. Так, парковая зона была взята моделью за эталон, поэтому коэффициент при  $x_1$  равен нулю, а значение ФА в этой зоне прогнозируется равным свободному члену — 0,046. Для жилой зоны коэффициент лишь немногим отличается от нуля, к тому же признан незначимым для модели. Коэффициент для промышленной зоны также незначим, однако он уже гораздо выше, чем в жилой зоне. Прогнозируемая величина ФА здесь составляет 0,0476. Наконец, на участках возле транспортных путей обнаруживается заметное, статистически значимое увеличение ФА — до 0,0498 для автодороги и до 0,05 для железной дороги, что свидетельствует о сильном возрастании антропогенной нагрузки.

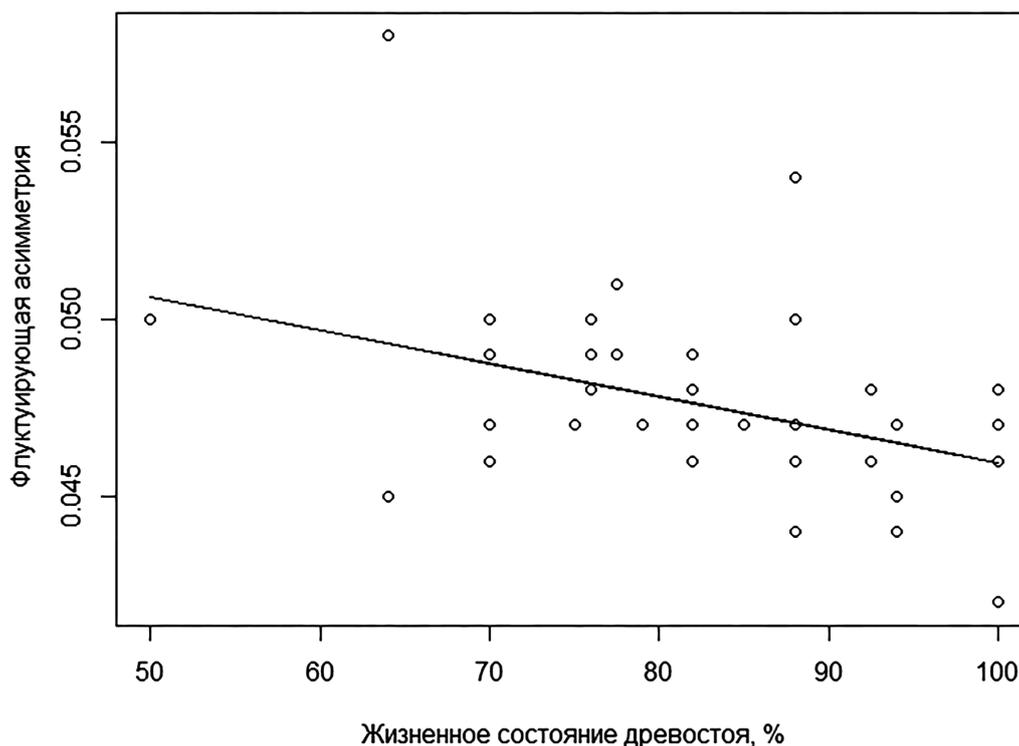


Рис. 2. Связь между жизненным состоянием древостоя березы и флуктуирующей асимметрией ее листьев

Таблица 5

Преобразование типа функциональной зоны в фиктивную переменную

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
Парк	1	0	0	0	0
Жилая зона	0	1	0	0	0
Промышленная зона	0	0	1	0	0
Автодорога	0	0	0	1	0
Железная дорога	0	0	0	0	1

Для модели 3 в качестве предикторов были выбраны состояние древостоя и тип функциональной зоны, так как, во-первых, эти переменные имеют высокую коррелятивную связь со значением ФА и, во-вторых, добавление остальных переменных привело бы к появлению мультиколлинеарности, искажающей результаты моделирования (согласно таблице 2, между некоторыми переменными присутствует сильная корреляционная зависимость). Изначально в модель добавлялась также высота дерева, однако она

была откинута методом пошагового исключения в связи с небольшим уровнем значимости переменной. Модель 3 опирается на изменение двух значащих факторов, поэтому ее предсказательная способность выше, чем у предыдущих двух моделей, однако все равно остается небольшой.

Наконец, в целях улучшения прогностической ценности модели 3 была предпринята попытка объединить похожие функциональные зоны в одну, чтобы уменьшить количество предикторов. В итоге были выделены:

- зона небольшой антропогенной нагрузки, объединяющая парки, скверы и жилые массивы;

- зона повышенной антропогенной нагрузки — возле промышленных предприятий;

- зона высокой антропогенной нагрузки — возле автомобильных и железных дорог.

Получившаяся модель множественной линейной регрессии с новой фиктивной переменной объясняет 35,8% разброса значений, имеет большую статистическую значимость и меньшее стандартное отклонение остатков модели. Полное уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\Phi A = 0,051 - 0,00005521 \cdot L_n + 0,001235 \cdot x_2 + 0,003188 \cdot x_3,$$

где  $L_n$  — относительное жизненное состояние древостоя, %;  $x_2$  — дихотомическая переменная, принимающая значение 1, если образцы собраны в промышленной зоне (иначе 0);  $x_3$  — дихотомическая переменная, принимающая значение 1, если образцы собраны возле автодороги или железной дороги (иначе 0).

Уравнение модели отражает связь между средним значением флуктуирующей асимметрии на пробной площади, относительным жизненным состоянием древостоя и типом функциональной зоны. При этом тип функциональной зоны выделяется как более важный параметр (табл. 4), в то время как состояние древостоя, вероятно, определяется также другими факторами, не влияющими на величину  $\Phi A$ , и поэтому имеет низкую значимость.

### Заключение

Таким образом, статистический анализ данных позволил установить, что значение флуктуирующей асимметрии имеет значимую корреляционную связь с относительным жизненным состоянием древостоя березы и типом функциональной зоны, в которой были отобраны образцы ее листьев. При улучшении состояния древостоя можно ожидать уменьшения асимметричности листьев. Анализ диаграммы размахов позволяет расположить функциональные зоны по мере увеличения в них значения  $\Phi A$  (и, следовательно, антропогенной нагрузки) следующим образом: парк < жилая зона < промышленная зона < автодорога < железная дорога. Кроме того, результаты регрессионного анализа позволяют заключить, что условия произрастания березы повислой почти не различаются между парком и жилой зоной, между автодорогой и железной дорогой, а информация о типе функциональной зоны имеет большую прогностическую ценность, чем данные о жизненном состоянии древостоя. Наиболее точная модель множественной линейной регрессии, которую можно построить по имеющимся данным, объясняет только 35,8% разброса значений  $\Phi A$ , что говорит о наличии неучтенных факторов, имеющих более сильную связь с величиной этого показателя.

### Список использованной литературы

1. Александрова Т. В., Нахаева В. И. Экологическая оценка округов города Омска и их рекреационных зон с помощью растительных тест-объектов (*Betula pendula* Roth, *Trifolium repens* L.) // Успехи современного естествознания. 2015. № 1, ч. 4. С. 606—610.

2. Алексеев В. А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51—57.
3. Алексеев В. А. Некоторые вопросы индикации и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Л. : Наука, 1999. С. 38—54.
4. Анюшкина Л. В., Пузанова О. А., Смирнова А. В. Оценка качества среды методом флуктуирующей асимметрии древесных растений // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2011. № 28. С. 79—81.
5. Атлас земель Самарской области / отв. ред. Л. Н. Порошина. Самара, 2002. 101 с.
6. Биологический контроль окружающей среды. Биоиндикация и биотестирование / под ред. О. П. Мелеховой, Е. Е. Егоровой. М. : Академия, 2007. 287 с.
7. Бугрова С. В. Морфометрические особенности березы повислой в условиях городов Самары и Сызрани // Экологический сборник 7: Труды молодых ученых / под ред. С. А. Сенатора, О. В. Мухортовой, С. В. Саксонова. Тольятти : Институт экологии Волжского бассейна РАН : Анна, 2019. С. 91—95.
8. Бухарина И. Л., Поварницына Т. М., Ведерников К. Е. Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде. Ижевск : Ижевская ГСХА, 2007. 216 с.
9. Вершинин В. Л. Биота урбанизированных территорий. Екатеринбург : [Б. и.], 2007. 85 с.
10. Доклад об экологической ситуации в Самарской области за 2017 год / отв. ред. Т. Н. Сафронова. Самара, 2018. 226 с.
11. Здоровье среды: практика оценки / В. М. Захаров [и др.]. М. : Центр экологической политики России, 2000. 318 с.
12. Козловцева О. С., Лизавчук С. В. Оценка экологического благополучия сельского населенного пункта // Наука XXI века: актуальные направления развития. 2017. № 2-1. С. 40—42.
13. Корнилина В. В. Влияние *Phellinus tremulae* (Bond et Borissov) на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластины осины // Фундаментальные исследования. 2013. № 1, ч. 1. С. 37—40.
14. Коротченко И. С. Флуктуирующая асимметрия листьев тополя как тест-система в условиях автотранспортного загрязнения // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 11-2. С. 56—57.
15. Курило Ю. А., Григорьев А. И. Изучение взаимосвязи между электрическим сопротивлением и флуктуирующей асимметрией листовой пластины березы повислой [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1, ч. 1. URL: <https://www.science-education.ru/pdf/2015/1/606.pdf>.
16. Майджи О. В., Буланкина Е. Г. Исследование качества окружающей среды методом флуктуирующей асимметрии // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2012. № 13 (18). С. 33—38.
17. Мاستицкий С. Э., Шитиков В. К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R [Электронный ресурс] // R: Анализ и визуализация данных. 2014. URL: <http://r-analytics.blogspot.com>. (Дата обращения: 26.02.2020).
18. Методы полевых экологических исследований : учеб. пособие / сост. О. Н. Артаев. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. 412 с.
19. Новиков А. В., Чуйков Ю. С. Возможности использования тополя черного и ивы белой в качестве биоиндикаторов последствий загрязнения атмосферного воздуха автотранспортом // Естественные науки. 2007. № 1 (18). С. 24—27.
20. Перзадаева А. А. Биоиндикация экосистем города Астаны по состоянию листьев березы повислой // Научный альманах. 2017. № 10-3 (36). С. 200—202.
21. Почвы Куйбышевской области. Куйбышев : Куйбыш. кн. изд-во, 1985. 392 с.
22. Приволжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogoda-sv.ru/monitoring/> (Дата обращения: 16.05.2020).
23. Природа Куйбышевской области / сост. М. С. Горелов, В. И. Матвеев, А. А. Устинова. Куйбышев : Куйбыш. кн. изд-во, 1990. 464 с.
24. Рунова Е. М., Берковская О. Н. Оценка состояния окружающей среды г. Братск с использованием метода флуктуирующей асимметрии березы повислой (*Betula pendula* Roth) // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 1. С. 198—204.
25. Суслина М. А., Сунцова Л. Н. Оценка экологического состояния окружающей среды г. Красноярск по интегральным характеристикам асимметрии листьев липы мелколистной (*Tilia cordata*) // Технология и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сб. статей Всерос. науч.-практ. конф. Красноярск : Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2019. С. 75—78.
26. Чуйков Ю. С., Шадманова Т. Х. Оценка качества городской среды по состоянию тополя черного (*Populus nigra*) // Естественные науки. 2012. № 4 (41). С. 48—58.
27. Экологический паспорт Самарской области [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecopassport.samregion.ru/> (Дата обращения: 16.05.2020).

28. Kozlov M., Cornelissen T., Gavrikov D., Kunavin M., Lama A., Milligan J., Zverev V., Zvereva E. Reproducibility of fluctuating asymmetry measurements in plants: Sources of variation and implications for study design // *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 73. P. 733—740. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.10.033.

29. Sandner M. T., Matthies D. Fluctuating asymmetry of leaves is a poor indicator of environmental stress and genetic stress by inbreeding in *Silene vulgaris* // *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 79. P. 247—253. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.030.

Поступила в редакцию 28.04.2020

**Бугров Сергей Вячеславович**, аспирант

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: sergey25101993@mail.ru

**Бугрова Светлана Вячеславовна**, магистр

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева  
Российская Федерация, 443086, Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: svetlana-bugrova95@list.ru

UDC 574.2

**S. V. Bugrov**

**S. V. Bugrova**

### **Statistical assessment of the correlation between growth conditions of *Betula pendula* Roth and its ecological and morphological parameters in the cities of the Samara region**

Based on the methods of correlation and regression analyses, as well as the Kruskal — Wallis test and the range diagram, the article assesses the bioindication potential of indicators of the vital state of tree stands and fluctuating asymmetry of leaves of *Betula pendula* Roth growing in the cities of Samara and Syzran. According to the magnitude of the fluctuating asymmetry, the level of anthropogenic pressure in these cities increases in the series of functional zones: park < residential area < industrial zone < highway < railroad. The life state of birch standings is weakly related to the type of city functional zone, but has a positive correlation between the average strength and the fluctuating asymmetry indexes of birch leaves.

**Key words:** Samara city, Syzran city, *Betula pendula* Roth, forest standings vitality, fluctuating asymmetry, functional zone, anthropogenic impact, linear regression model.

**Bugrov Sergey Vyacheslavovich**, Postgraduate student

Samara National Research University  
Russian Federation, Samara, 443086, Moskovskoye shosse, 34  
E-mail: sergey25101993@mail.ru

**Bugrova Svetlana Vyacheslavovna**, Master

Samara National Research University  
Russian Federation, Samara, 443086, Moskovskoye shosse, 34  
E-mail: svetlana-bugrova95@list.ru

#### **References**

1. Aleksandrova T. V., Nakhaeva V. I. Ekologicheskaya otsenka okrugov goroda Omska i ikh rekreatsionnykh zon s pomoshch'yu rastitel'nykh test-ob'ektov (*Betula pendula* Roth, *Trifolium repens* L.) [Environmental assessment of Omsk city districts and recreational areas with plant test objects (*Trifolium repens* L., *Betula Pendula* Roth)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya — Advances in Current Natural Sciences*, 2015, no. 1, part 4, pp. 606—610. (In Russian)

2. Alekseev V. A. Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev [Diagnostics of the vital state of trees and stands]. *Lesovedenie — Russian Journal of Forest Science*, 1989, no. 4, pp. 51—57. (In Russian)
3. Alekseev V. A. Nekotorye voprosy indikatsii i klassifikatsii povrezhdennykh zagryazneniem lesnykh ekosistem [Some issues of indication and classification of forest ecosystems damaged by pollution]. *Lesnye ekosistemy i atmosferno zagryaznenie* [Forest ecosystems and atmospheric pollution]. Leningrad, Nauka Publ., 1999, pp. 38—54. (In Russian)
4. Anyushkina L. V., Puzanova O. A., Smirnova A. V. Otsenka kachestva sredy metodom fluktuiruyushchei asimmetrii drevesnykh rastenii [Environmental quality assessment by the method of fluctuating asymmetry of woody plants]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2011, no. 28, pp. 79—81. (In Russian)
5. *Atlas zemel' Samarskoi oblasti* [Land Atlas of the Samara Region]. Samara, 2002. 101 p. (In Russian)
6. *Biologicheskii kontrol' okruzhayushchei sredy. Bioindikatsiya i biotestirovanie* [Biological control of the environment. Bioindication and biotesting]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 287 p. (In Russian)
7. Bugrova S. V. Morfometricheskie osobennosti berezy povisloi v usloviyakh gorodov Samary i Syzrani [Morphometric features of drooping birch in the conditions of the cities of Samara and Syzran]. *Ekologicheskii sbornik 7: Trudy molodykh uchenykh* [Ecological collection 7. Proceedings of young scientists]. Tol'yatti, Institut ekologii Volzhskogo basseina RAN Publ., Anna Publ., 2019, pp. 91—95. (In Russian)
8. Bukharina I. L., Povarnitsyna T. M., Vedernikov K. E. *Ekologo-biologicheskie osobennosti drevesnykh rastenii v urbanizirovannoi srede* [Ecological and biological characteristics of woody plants in an urbanized environment]. Izhevsk, Izhevskaya GSKhA Publ., 2007. 216 p. (In Russian)
9. Vershinin V. L. *Biota urbanizirovannykh territorii* [Biota of urbanized areas]. Yekaterinburg, 2007. 85 p. (In Russian)
10. *Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Samarskoi oblasti za 2017 god* [Report on the environmental situation in the Samara region for 2017]. Samara, 2018. 226 p. (In Russian)
11. Zakharov V. M. [et al.] *Zdorov'e sredy: praktika otsenki* [Environmental health: assessment practice]. Moscow, Tsentri ekologicheskoi politiki Rossii Publ., 2000. 318 p. (In Russian)
12. Kozlovteva O. S., Lizavchuk S. V. Otsenka ekologicheskogo blagopoluchiya sel'skogo naselenogo punkta [Assessment of the ecological well-being of a rural settlement]. *Nauka XXI veka: aktual'nye napravleniya razvitiya*, 2017, no. 2-1, pp. 40—42. (In Russian)
13. Kornilina V. V. Vliyanie Phellinus tremulae (Bond et Borissov) na velichinu fluktuiruyushchei asimmetrii listovoi plastiny osiny [Influence Phellinus tremulae (Bond et Borissov) on the fluctuating asymmetry's size of the leaf plate of the aspen]. *Fundamental'nye issledovaniya — Fundamental Research*, 2013, no. 1, part 1, pp. 37—40. (In Russian)
14. Korotchenko I. S. Fluktuiruyushchaya asimmetriya list'ev topolya kak test-sistema v usloviyakh avtotransportnogo zagryazneniya [Fluctuating asymmetry of poplar leaves as a test system under road traffic pollution]. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*, 2014, no. 11-2, pp. 56—57. (In Russian)
15. Kurilo Yu. A., Grigor'ev A. I. Izuchenie vzaimosvyazi mezhdu elektricheskim soprotivleniem i fluktuiruyushchei asimmetrii listovoi plastiny berezy povisloi [Study of the relationship between electrical resistance and fluctuating asymmetry a sheet of Betula pendula]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya — Modern Problems of Science and Education*, 2015, no. 1, part 1. Available at: <https://www.science-education.ru/pdf/2015/1/606.pdf>. (In Russian)
16. Maidzhi O. V., Bulankina E. G. Issledovanie kachestva okruzhayushchei sredy metodom fluktuiruyushchei asimmetrii [Investigation of environmental quality by the leaf fluctuating asymmetry method]. *Vestnik Rossiiskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnnogo universiteta*, 2012, no. 13 (18), pp. 33—38. (In Russian)
17. Mastitskii S. E., Shitikov V. K. Statisticheskii analiz i vizualizatsiya dannykh s pomoshch'yu R [Statistical analysis and data visualization using R]. *R: Analiz i vizualizatsiya dannykh* [R: Data analysis and visualization]. 2014. Available at: <http://r-analytics.blogspot.com>. Accessed: 26.02.2020. (In Russian)
18. *Metody polevykh ekologicheskikh issledovaniy* [Environmental field research methods]. Saransk, Mordov. un-t Publ., 2014. 412 p. (In Russian)
19. Novikov A. V., Chuikov Yu. S. Vozmozhnosti ispol'zovaniya topolya chernogo i ivy beloï v kachestve bioindikatorov posledstviy zagryazneniya atmosfernogo vozdukha avtotransportom [Possibilities of using black poplar and white willow as bioindicators of the consequences of atmospheric air pollution by vehicles]. *Estestvennye nauki — Natural Sciences*, 2007, no. 1 (18), pp. 24—27. (In Russian)
20. Perzadaeva A. A. Bioindikatsiya ekosistem goroda Astany po sostoyaniyu list'ev berezy povisloi [Ecosystems bioindication of Astana city of birch leaves]. *Nauchnyi al'manakh — Science Almanac*, 2017, no. 10-3 (36), pp. 200—202. (In Russian)
21. *Pochvy Kuibyshevskoi oblasti* [Soils of the Kuibyshev region]. Kuibyshev, Kuibysk. kn. izd-vo Publ., 1985. 392 p. (In Russian)

22. *Privolzhskoe upravlenie po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchei sredy* [Volga Region Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring]. Available at: <http://www.pogoda-sv.ru/monitoring/> Accessed: 16.05.2020. (In Russian)

23. *Priroda Kuibyshevskoi oblasti* [The nature of the Kuibyshev region]. Kuibyshev, Kuibysk. kn. izd-vo Publ., 1990. 464 p. (In Russian)

24. Runova E. M., Berkovskaya O. N. Otsenka sostoyaniya okruzhayushchei sredy g. Bratsk s ispol'zovaniem metoda fluktuiruyushchei asimmetrii berezy povisloi (*Betula pendula* Roth) [Assessment of the state of the environment in Bratsk using the method of fluctuating asymmetry of silver birch (*Betula pendula* Roth)]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki* [Proceedings of the Bratsk State University. Ser. Natural and Engineering Sciences]. 2018, vol. 1, pp. 198—204. (In Russian)

25. Suslina M. A., Suntsova L. N. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya okruzhayushchei sredy g. Krasnoyarska po integral'nym kharakteristikam asimmetrii list'ev lipy melkolistnoi (*Tilia cordata*) [Assessment of the ecological state of the environment in Krasnoyarsk by the integral characteristics of the asymmetry of the leaves of small-leaved linden (*Tilia cordata*)]. *Tekhnologiya i oborudovanie sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitel'stva: sb. statei Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Technology and equipment of garden and park and landscape construction. Proceed. of All-Russia scientific-practical conf.]. Krasnoyarsk, Sibirskii gos. un-t nauki i tekhnologii im. akad. M. F. Reshetneva Publ., 2019, pp. 75—78. (In Russian)

26. Chuikov Yu. S., Shadmanova T. Kh. Otsenka kachestva gorodskoi sredy po sostoyaniyu topolya chernogo (*Populus nigra*) [Assessment of the quality of the urban environment by the condition of *Populus nigra*]. *Estestvennye nauki — Natural Sciences*, 2012, no. 4 (41), pp. 48—58. (In Russian)

27. *Ekologicheskii pasport Samarskoi oblasti* [Environmental passport of the Samara region]. Available at: <http://www.ecopassport.samregion.ru/>. Accessed: 16.05.2020. (In Russian)

28. Kozlov M., Cornelissen T., Gavrikov D., Kunavin M., Lama A., Milligan J., Zverev V., Zvereva E. Reproducibility of fluctuating asymmetry measurements in plants: Sources of variation and implications for study design. *Ecological Indicators*, 2017, vol. 73, pp. 733—740. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.10.033.

29. Sandner M. T., Matthies D. Fluctuating asymmetry of leaves is a poor indicator of environmental stress and genetic stress by inbreeding in *Silene vulgaris*. *Ecological Indicators*, 2017, vol. 79, pp. 247—253. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.04.030.