

УДК 630.86:635.052

Е. Г. Тюлькова¹, Л. П. Авдашкова²

Учреждение образования «Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации»,
Белорусский республиканский союз потребительских обществ, пр. Октября, 50, 246029 Гомель,
Республика Беларусь, ¹+375 (29) 316 44 83, tut-3@mail.ru, ²+375 (29) 314 70 94, avdashkova@mail.ru

ФЛУКТУИРУЮЩАЯ АСИММЕТРИЯ БИЛАТЕРАЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ ЛИСТА БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ *BETULA PENDULA* ROTH. В ТЕХНОГЕННЫХ УСЛОВИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ГОМЕЛЬСКОГО ПОЛЕСЬЯ)

Одной из ключевых проблем промышленных центров являются выбросы техногенных элементов в атмосферу, что имеет негативные последствия для роста и развития древесных растений. Одним из методов интегральной характеристики качества среды является определение показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок древесных растений, который также может быть использован для выявления их адаптивных механизмов при произрастании в техногенных условиях. В результате проведенных исследований на основании определения коэффициента флуктуирующей асимметрии и общей оценки степени и глубины адаптивных изменений листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* Roth. проведен сравнительный анализ условий произрастания исследуемых древесных растений.

Ключевые слова: береза повислая *Betula pendula* Roth.; флуктуирующая асимметрия; интегральный показатель стабильности развития; техногенное влияние; морфометрическая адаптация.

Табл. 5. Рис. 3. Библиогр.: 13 назв.

E. G. Tyulkova¹, L. P. Avdashkova²

Belarusian trade and economic university of consumer cooperation, Belarusian republican union
of consumer societies, 50, pr. Oktyabrya, 246029 Gomel, Belarus, ¹+375 (29) 316 44 83, tut-3@mail.ru,
²+375 (29) 314 70 94, avdashkova@mail.ru

THE FLUCTUATING ASYMMETRY OF THE DROOPING BIRCH *BETULA PENDULA* ROTH. LEAVES BILATERAL SIGNS UNDER TECHNOGENIC CONDITIONS (ON THE EXAMPLE OF GOMEL POLESYE)

One of industrial centres key problems is technogenic elements emission in the atmosphere that has negative consequences for wood plants growth and development. The fluctuating asymmetry indicator definition of wood plants leaf laminas is one of integrated characteristic methods of the environment quality. This method can be also used for wood plants adaptive mechanisms identification in the period of growth under technogenic conditions. As a result, on the basis of defining the indicator of fluctuating asymmetry and degree and depth assessment of leaf laminas of the drooping birch *Betula pendula* Roth. adaptive changes the comparative analysis of wood plants conditions growth is carried out.

Key words: drooping birch *Betula pendula* Roth.; the fluctuating asymmetry; a development stability integrated indicator; technogenic influence; morphometric adaptation.

Table 5. Fig. 3. Ref.: 13 titles.

Введение. В настоящее время в глобальном масштабе происходят процессы изменения структуры размещения промышленных производств и населения. Эти изменения, затронувшие и Республику Беларусь, связаны с государственной политикой преимущественного развития малых городов, увеличения удельного веса выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников, постепенным уменьшением ущерба за счет перевода теплоэнергетики и транспорта на экологически более чистые виды топлива. Наряду с этим происходит стабилизация доли крупных городов в общем городском населении, и интенсивная урбанизация переходит в первоначальную стадию субурбанизации, т. е. развитие пригородных территорий.

Если на этапе интенсивной урбанизации были получены разнообразные данные о влиянии техногенного загрязнения на растительные сообщества, то для этапа субурбанизации такая информация практически отсутствует. Гомельское Полесье, которое является вторым по значимости промышленным регионом Беларуси, представляет собой удобную модель для таких исследований. Здесь на фоне увеличения количества стационарных источников выбросов загрязняющих веществ за последние годы наблюдается незначительное снижение величины удельного веса выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в общем объеме промышленных эмиссий по республике (на 0,3% от стационарных источников и на 0,5% от мобильных источников) [1]. Тем не менее на Гомельскую область приходится рост среднегодовых концентраций оксида углерода в воздухе, фенола, аммиака, что впоследствии может негативно сказаться на процессе роста и развития растительности.

Показатель флуктуирующей асимметрии как интегральный показатель стабильности развития представляет собой эффективный критерий, характеризующий незначительные и ненаправленные отклонения морфометрических параметров листа от строгой билатеральной симметрии под влиянием техногенных воздействий [2—7]. Кроме того, такие изменения морфологического характера могут характеризовать адапционные механизмы, проявляющиеся у растительности при произрастании в техногенных условиях [8—11]. Поэтому целью работы явилось определение модели изменчивости показателя флуктуирующей асимметрии и на основании этого — характера адаптивных изменений листовых пластинок древесных растений в условиях техногенного воздействия на примере Гомельского Полесья. В качестве исследуемого объекта древесных растений выбрана береза повислая *Betula pendula* Roth. как типичный и равномерно произрастающий вид для Гомельского Полесья.

При этом решались следующие задачи: определить параметры асимметрии листовой пластинки березы повислой *Betula pendula* Roth. и изучить их статистические свойства; провести сравнительную количественную оценку адаптивных морфометрических изменений листа березы повислой *Betula pendula* Roth. на территории Гомельского Полесья с учетом коэффициента флуктуирующей асимметрии.

Материал и методы исследования. Пробы листьев березы повислой *Betula pendula* Roth. отбирали в окружении промышленных предприятий Гомеля и Гомельского Полесья, различающихся спецификой промышленного производства и, соответственно, уровнем техногенного влияния на состояние атмосферного воздуха. Такими предприятиями явились: в Гомеле — ОАО «Гомельский химический завод», ОАО «Гомельдрев», ОАО «Гомельский завод литья и нормалей», ОАО «Гомельстекло»; на территории Гомельского Полесья — «Белорусский газоперерабатывающий завод» (Речица); ОАО «СветлогорскХимволокно»; ЗАО «Добрушский фарфоровый завод»; ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод»; ОАО «Белорусский металлургический завод» (Жлобин).

В целях проведения сравнительной оценки характера адаптивных изменений использовались селитебная зона и объездная дорога Гомеля, а также фоновые условия, каковыми явилась часть территории Национального парка «Припятский» (Хобненское лесничество), максимально приближенная к Гомелю и свободная от влияния промышленной деятельности и интенсивного транспорта.

Отбор листьев проводили в августе 2017 года с отдельно стоящих деревьев (не менее 10 в каждой точке; на каждой исследуемой территории выбирали по 2 пробных выборки, расположенные вдоль противоположно направленных трансект) приблизительно одного возраста, с высоты 1,5 м. С каждого опытного дерева с южной стороны кроны срывали по 20—25 неповрежденных листьев.

Возраст деревьев оценивали путем определения диаметра ствола, который делили на среднегодовой прирост. Средний возраст деревьев составил 35—40 лет.

Изображения отсканированных листьев обрабатывались с помощью программы CorelDRAW X6. Для оценки интегрального показателя стабильности развития (коэффициента флуктуирующей асимметрии (далее — КФА)) березы повислой *Betula pendula* определяли ширину половинки листа (посередине листовой пластинки), длину второй от основания листа жилки второго порядка, расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка, расстояние между концами этих жилок, угол между центральной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка, и рассчитывали коэффициент флуктуирующей асимметрии [12; 13].

Математическую обработку цифрового материала выполняли с помощью программ Excel и Statistica.

Адаптивные изменения с учетом флуктуирующей асимметрии листовой пластинки в связи с произрастанием в техногенных условиях ($АП_{фа}$) оценивали по формуле

$$АП_{фа} = C_{фа} \cdot Г_{фа}, \quad (1)$$

где C — степень адаптивных изменений;

$Г$ — глубина адаптивных изменений.

Результаты исследования и их обсуждение. Результаты отбора проб растительного материала в зонах влияния промышленных предприятий и фоновой территории позволили оценить диапазон изменений асимметрии исследуемых морфометрических параметров листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* Roth. при развитии в условиях с различной степенью техногенной нагрузки (в таблицах 1—4 и на рисунках 1—3 представлены результаты по первой выборке в каждой точке отбора образцов).

Т а б л и ц а 1. — Значения параметров асимметрии листовых пластинок березы повислой *Betula pendula*

T a b l e 1. — The leaf lamina asymmetry parameters values of the drooping birch *Betula pendula*

Место отбора проб	Значения параметров асимметрии				
	расстояние между основаниями первой и второй от основания листа жилки второго порядка, мм / относительная погрешность, %	расстояние между концами первой и второй от основания листа жилки второго порядка, мм / относительная погрешность, %	длина второй от основания листа жилки второго порядка, мм / относительная погрешность, %	ширина половинки листа, мм / относительная погрешность, %	угол между центральной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка, град / относительная погрешность, %
1	5,93±0,013/0,22	10,24±0,012/0,12	30,13±0,027/0,09	18,46±0,015/0,08	39,47±0,041/0,10
	5,86±0,011/0,19	11,13±0,013/0,12	30,01±0,024/0,08	18,47±0,013/0,07	38,48±0,041/0,11
2	5,64±0,009/0,16	9,78±0,010/0,10	33,16±0,023/0,07	18,88±0,016/0,09	34,79±0,027/0,08
	5,33±0,008/0,16	10,44±0,009/0,09	33,13±0,022/0,07	19,04±0,016/0,08	34,75±0,025/0,07
3	5,76±0,007/0,13	9,39±0,007/0,07	28,68±0,017/0,06	17,89±0,011/0,06	40,27±0,035/0,09
	5,48±0,006/0,12	9,60±0,009/0,09	28,00±0,016/0,06	16,65±0,010/0,06	40,24±0,029/0,07
4	5,33±0,009/0,18	11,45±0,011/0,10	31,30±0,026/0,08	18,14±0,012/0,07	44,10±0,025/0,06
	5,40±0,008/0,15	11,42±0,011/0,09	30,28±0,027/0,09	18,95±0,016/0,08	43,42±0,033/0,08
5	4,95±0,007/0,14	9,77±0,013/0,13	28,83±0,020/0,07	17,57±0,012/0,07	41,82±0,038/0,09
	4,87±0,007/0,14	9,68±0,011/0,11	28,36±0,019/0,07	17,62±0,013/0,07	41,02±0,040/0,10

Окончание таблицы 1

Место отбора проб	Значения параметров асимметрии				
	расстояние между основаниями первой и второй от основания листа жилки второго порядка, мм / относительная погрешность, %	расстояние между концами первой и второй от основания листа жилки второго порядка, мм / относительная погрешность, %	длина второй от основания листа жилки второго порядка, мм / относительная погрешность, %	ширина половинки листа, мм / относительная погрешность, %	угол между центральной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка, град / относительная погрешность, %
6	5,75±0,008/0,14	9,18±0,008/0,09	29,45±0,020/0,07	17,81±0,012/0,07	41,85±0,030/0,07
	5,34±0,007/0,13	9,54±0,010/0,11	29,24±0,020/0,07	17,66±0,011/0,06	41,78±0,030/0,07
7	4,14±0,005/0,12	8,99±0,008/0,09	27,77±0,017/0,06	16,09±0,010/0,07	41,26±0,022/0,05
	3,92±0,004/0,11	8,96±0,008/0,09	27,41±0,015/0,05	16,33±0,009/0,06	40,33±0,025/0,06
8	8,41±0,010/0,12	9,76±0,060/0,61	29,54±0,032/0,11	17,19±0,013/0,08	30,53±0,030/0,10
	8,61±0,010/0,11	8,42±0,010/0,12	28,33±0,019/0,07	17,27±0,015/0,09	31,04±0,024/0,08
9	5,40±0,008/0,15	9,71±0,012/0,12	30,65±0,022/0,07	18,36±0,011/0,06	39,02±0,035/0,09
	4,97±0,006/0,12	10,01±0,010/0,10	29,92±0,023/0,08	17,99±0,016/0,09	38,37±0,037/0,10
10	5,72±0,011/0,19	10,72±0,012/0,11	30,35±0,023/0,08	17,65±0,013/0,07	43,52±0,033/0,07
	5,50±0,010/0,19	10,21±0,010/0,10	28,78±0,031/0,11	17,73±0,017/0,10	42,77±0,037/0,09
11	5,42±0,009/0,17	9,43±0,010/0,11	29,24±0,019/0,07	17,32±0,014/0,08	41,97±0,031/0,07
	5,35±0,010/0,18	9,65±0,009/0,09	28,86±0,019/0,07	17,49±0,012/0,07	41,68±0,028/0,07
12	5,96±0,013/0,21	10,73±0,012/0,11	30,19±0,028/0,09	17,79±0,018/0,10	43,73±0,045/0,10
	5,85±0,011/0,19	10,38±0,012/0,12	29,36±0,030/0,10	17,68±0,020/0,11	43,45±0,044/0,10
13	5,26±0,006/0,11	11,27±0,011/0,09	32,78±0,030/0,09	21,79±0,015/0,07	40,93±0,037/0,09
	5,29±0,006/0,12	11,23±0,013/0,11	32,67±0,018/0,06	21,60±0,013/0,06	41,71±0,024/0,06

Примечание. Здесь и далее в таблицах 2—5: 1 — ОАО «Гомельский химический завод», 2 — ОАО «Гомельдрев», 3 — ОАО «Гомельский завод литья и нормалей», 4 — ОАО «Гомельстекло», 5 — объездная дорога, 6 — ЗАО «Добрушский фарфоровый завод», 7 — ОАО «Белорусский металлургический завод», 8 — ОАО «Мозырский НПЗ», 9 — «Белорусский газоперерабатывающий завод», 10 — ОАО «СветлогорскХимволокно», 11 — селитебная зона (частная застройка), 12 — селитебная зона (многоэтажная застройка), 13 — Национальный парк «Припятский». В числителе представлены параметры левой половины листа и относительная погрешность их измерений, в знаменателе — правой.

Данные таблицы 1 свидетельствуют, что в техногенных условиях параметры асимметрии листовых пластинок (на примере первой из исследуемых выборок в каждой точке отбора проб) варьировали в более широком диапазоне по сравнению с фоновыми условиями и селитебной зоной. Так, для расстояния между основаниями первой и второй от основания листа жилками второго порядка этот диапазон составил 3,92—8,61 мм в техногенных условиях (фоновые значения 5,26—5,29 мм); для расстояния между концами этих жилок — 8,42—11,45 мм (фоновые значения 11,23—11,27 мм); для длины второй от основания листа жилки второго порядка — 27,41—33,16 мм (фоновые значения 32,67—32,78 мм); для ширины половинки листа — 16,09—19,04 мм (фоновые значения 21,60—21,79 мм); для угла между центральной жилкой и второй от основания листа жилки второго порядка — 30,53—44,10° (фоновые значения 40,93—41,71°). Величина относительной погрешности измерений не превышает 1%.

Результаты анализа дисперсионного комплекса, включающего параметры асимметрии листа в техногенных и фоновых условиях, свидетельствуют, что значение F -критерия превышают $F_{\text{критич.}}$ для всех исследованных параметров при $f = 19, 1980$ и $p \leq 0,05$ ($F_{\text{критич.}} = 1,59$). Следовательно, параметры листовых пластинок деревьев, произрастающих в окружении промышленных предприятий и в селитебной зоне, достоверно отличаются от выборки в фоновых условиях.

С целью выявления наличия или отсутствия взаимосвязи между исследуемыми параметрами асимметрии листовых пластинок (отдельно на левой и правой половинах листа) был проведен расчет парных коэффициентов корреляции. В результате было выявлено отсутствие сильной корреляционной связи между отдельными признаками, поэтому далее все параметры использовались для определения КФА.

Для расчета КФА на предварительном этапе обработки данных по параметрам асимметрии листовых пластинок необходимо было убедиться во флуктуирующем характере асимметрии каждого признака и отсутствии или наличии направленной асимметрии и антисимметрии.

Для установления наличия или отсутствия направленной асимметрии была проверена гипотеза о равенстве показателя симметрии на левой и правой стороне листовых пластинок с помощью критерия Колмогорова—Смирнова (см. таблицу 2).

Таблица 2. — Значения λ -статистики критерия Колмогорова—Смирнова для параметров асимметрии листовых пластинок березы повислой *Betula pendula*

Table 2. — Value λ -statistic of Kolmogorov—Smirnov test for leaf laminas asymmetry parameters of the drooping birch *Betula pendula*

Место отбора проб	Значения λ для параметров асимметрии листовых пластинок				
	1	2	3	4	5
1	0,14	1,20	0,35	0,49	0,78
2	0,21	1,34	0,57	0,78	0,64
3	0,85	0,78	0,78	1,48	0,85
4	1,13	0,28	0,70	0,91	0,42
5	0,28	0,71	0,35	0,42	0,28
6	0,85	0,35	0,92	0,21	0,57
7	1,20	0,14	0,78	0,64	0,99
8	0,03	0,06	0,07	0,10	0,10
9	0,78	0,57	0,57	0,99	0,49
10	0,28	0,99	0,64	0,49	0,78
11	0,99	0,64	0,64	0,21	0,57
12	0,35	1,48	0,85	0,35	0,35
13	0,36	0,22	0,58	0,36	0,36

Примечание. 1 — расстояние между основаниями первой и второй от основания листа жилок второго порядка; 2 — расстояние между концами этих жилок; 3 — длина второй от основания листа жилки второго порядка; 4 — ширина половинки листа; 5 — угол между центральной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка

Из данных таблицы 2 видно, что фактические значения λ меньше $\lambda_{\text{критич.}}$ (равного 1,36 с уровнем значимости 0,05). Поэтому можно сформулировать вывод об отсутствии направленных различий между левой и правой сторонами листовых пластинок и предварительно определить КФА.

Для наличия или отсутствия антисимметрии определяли эксцесс КФА и проверяли его на значимость (см. таблицу 3).

Т а б л и ц а 3. — Значения эксцесса для выявления наличия или отсутствия антисимметрии и коэффициента флуктуирующей асимметрии листовых пластинок березы повислой *Betula pendula*

T a b l e 3. — The values of kurtosis to detect the antisymmetry presence or absence and the drooping birch *Betula pendula* leaf laminas fluctuating asymmetry indicator

Место отбора проб	Значения эксцесса	Коэффициент флуктуирующей асимметрии
1	-0,78 / 2,32	0,064±0,00018
2	6,93	0,060±0,00018
3	7,89	0,058±0,00015
4	6,79	0,069±0,00023
5	3,33	0,073±0,00018
6	-0,29 / 2,31	0,045±0,00014
7	0,57	0,049±0,00012
8	10,08	0,073±0,00021
9	6,58	0,063±0,00018
10	5,90	0,068±0,00022
11	8,35	0,052±0,00016
12	13,17	0,057±0,00020
13	8,09	0,033±0,00016

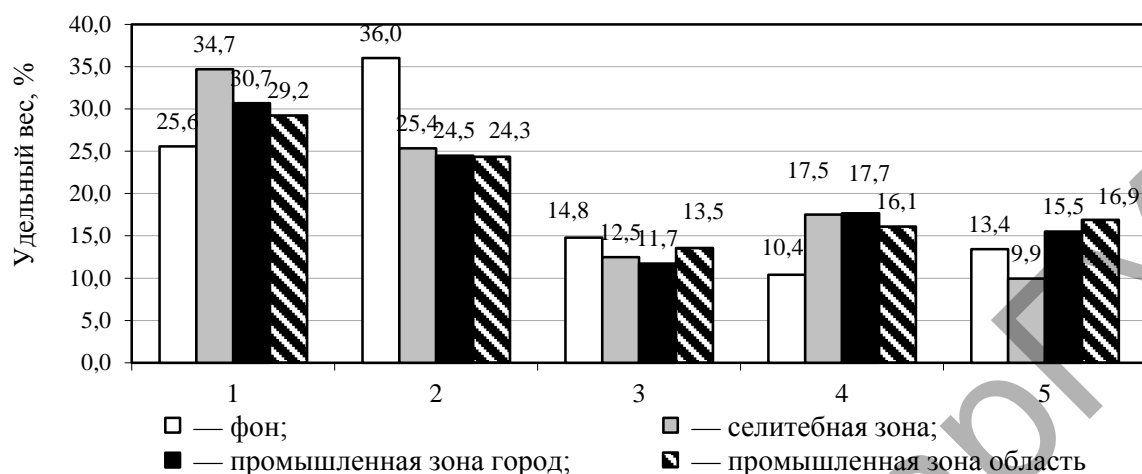
Для территорий, значения эксцесса которых положительны, антисимметрия отсутствует. В случае отрицательного эксцесса проверена гипотеза о его значимости, которая подтвердила равенство эксцесса нулю, что также свидетельствует об отсутствии антисимметрии. Поскольку направленной асимметрии и антисимметрии нет, то присутствует только флуктуирующая асимметрия, для которой был рассчитан коэффициент и которая демонстрирует адаптивный механизм листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* в техногенных условиях (см. таблицу 3).

Для выявления различий между коэффициентами флуктуирующей асимметрии в техногенных и фоновых условиях далее вначале была проверена гипотеза о равенстве дисперсий выборок (в Excel — двухвыборочный *F*-тест для дисперсий), а затем, в зависимости от имеющихся различий между дисперсиями, проверены гипотеза о равенстве математических ожиданий при неизвестных и равных дисперсиях и гипотеза о равенстве математических ожиданий при неизвестных и неравных дисперсиях (в Excel — двухвыборочный *t*-тест с одинаковыми или различными дисперсиями).

Результаты свидетельствуют: наблюдаемые *t*-значения больше критических (1,97), что указывает на наличие различий между сравниваемыми средними величинами.

Полученные значения КФА варьируют в пределах от 0,033 до 0,073 и свидетельствуют, что территорию Национального парка «Припятский» можно характеризовать как благоприятную для развития; промышленная и селитебная зона относится к загрязненным и неблагоприятным условиям для роста и развития растений. При этом максимально высокие значения КФА наблюдаются в районе ОАО «Мозырский НПЗ», объездной дороги Гомеля, ОАО «Гомельстекло», ОАО «СветлогорскХимволокно».

В результате определения удельного веса асимметрии отдельных параметров в общем коэффициенте флуктуирующей асимметрии установлено, что наибольший вклад в асимметрию листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* вносит расстояние между основаниями 1 и 2 жилок (рисунок 1).



1 — расстояние между основаниями первой и второй от основания листа жилок второго порядка; 2 — расстояние между концами этих жилок; 3 — длина второй от основания листа жилки второго порядка; 4 — ширина половинки листа; 5 — угол между центральной жилкой и второй от основания листа жилки второго порядка

1 — the distance between the first and the second from the leaf basis veins of second order; 2 — the distance between these veins ends; 3 — the length of the second from the leaf basis vein of second order; 4 — the half leaf width; 5 — the corner between the central vein and the second from the leaf basis vein of second order

Рисунок 1. — Удельный вес асимметрии отдельных параметров листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* в общем коэффициенте флуктуирующей асимметрии

Figure 1. — Specific weight of separate parameters asymmetry of the drooping birch *Betula pendula* leaf lamina in the general fluctuating asymmetry indicator

Общая оценка адаптивных изменений, характеризующих адаптивный потенциал березы повислой *Betula pendula* с учетом асимметрии листа, предусматривала определение степени и глубины адаптивных изменений КФА.

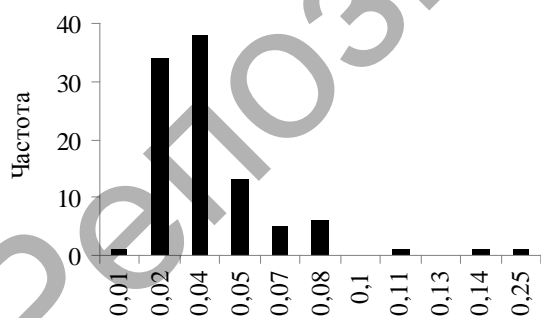


Рисунок 2. — Частоты распределения коэффициента флуктуирующей асимметрии параметров листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* в пригороде

Figure 2. — Fluctuating asymmetry indicator frequency distribution of leaf drooping birch *Betula pendula* characteristic in suburban area

При этом степень характеризует частоту отклонений исследуемого параметра от фоновых значений, т. е. количество фактически адаптированного материала; глубина — насколько значительны эти отклонения по сравнению с фоновыми условиями.

Коэффициент флуктуирующей асимметрии является случайной величиной, обозначим ее X . Гистограмма распределения вероятностей (рисунок 2) и проверка на значимость асимметрии и эксцесса нормального распределения позволяют отвергнуть предположение о нормальном распределении случайной величины X и выдвинуть гипотезу о логнормальном распределении исследуемой случайной величины. Это следует из того, что значения асимметрии и эксцесса, вычисленные по выборке, в большинстве случаев больше критического значения соответствующей статистики, и асимметрия и эксцесс для каждой из техногенных зон значительно отличаются от нуля (см. таблицу 4).

Т а б л и ц а 4. — Наблюдаемые значения статистики по коэффициенту флуктуирующей асимметрии листа березы повислой *Betula pendula*T a b l e 4. — The observed values of the statistics on the drooping birch *Betula pendula* leaf fluctuating asymmetry indicator

Место отбора проб	Наблюдаемые значения статистики	
	$As_{\text{факт}}$	$Ex_{\text{факт}}$
1	0,449	-0,780
2	1,737	6,926
3	1,922	7,894
4	2,176	6,793
5	1,219	3,332
6	0,630	-0,298
7	0,641	0,567
8	2,398	10,082
9	1,679	6,579
10	1,652	5,901
11	2,029	8,353
12	2,581	13,170
13	2,457	8,092

Примечание: $As_{\text{критич.}} = 0,713$; $Ex_{\text{критич.}} = 2,320$

Логарифм КФА, уменьшенный на постоянную величину, равную логарифму среднего значения этого коэффициента, подчиняется нормальному закону с нулевым средним значением. Функция распределения случайной величины X имеет вид

$$F(x) = P(X < x) = P(\ln X < \ln x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\ln x} e^{-\frac{(t-\ln a)^2}{2\sigma^2}} dt, \text{ где } \ln a \text{ — среднее значение логарифми-}$$

рованной случайной величины, σ — ее среднее квадратическое отклонение.

Поскольку преобразование натурального логарифма строго монотонно, то тождество $P(X < x) = P(\ln X < \ln x)$ правомерно использовать при получении плотности логнормального

распределения вероятности $f(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \ln a)^2}{2\sigma^2}}$.

Так, например, графики плотности логнормального распределения вероятности КФА для Национального парка «Припятский» и ОАО «Гомельский завод литья и нормалей» приведены на рисунке 3, а.

Для определения значения величины степени адаптивных изменений по КФА ($C_{\text{фа}}$) необходимо найти площадь S фигуры, заключенной между графиками плотностей распределения вероятностей. Однако тождество $P(X < x) = P(\ln X < \ln x)$ позволяет значения величины степени адаптивных изменений находить как разность между площадью под кривой плотности нормального распределения логарифма признака в техногенных условиях и площадью перекрывания техногенной и фоновой кривых, заданных функциями плотностей распределения

вероятностей $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-b)^2}{2\sigma^2}}$, где b — среднее значение параметра, σ — среднее квадра-

тическое отклонение параметра в техногенных и фоновых условиях (см. рисунок 3, б).

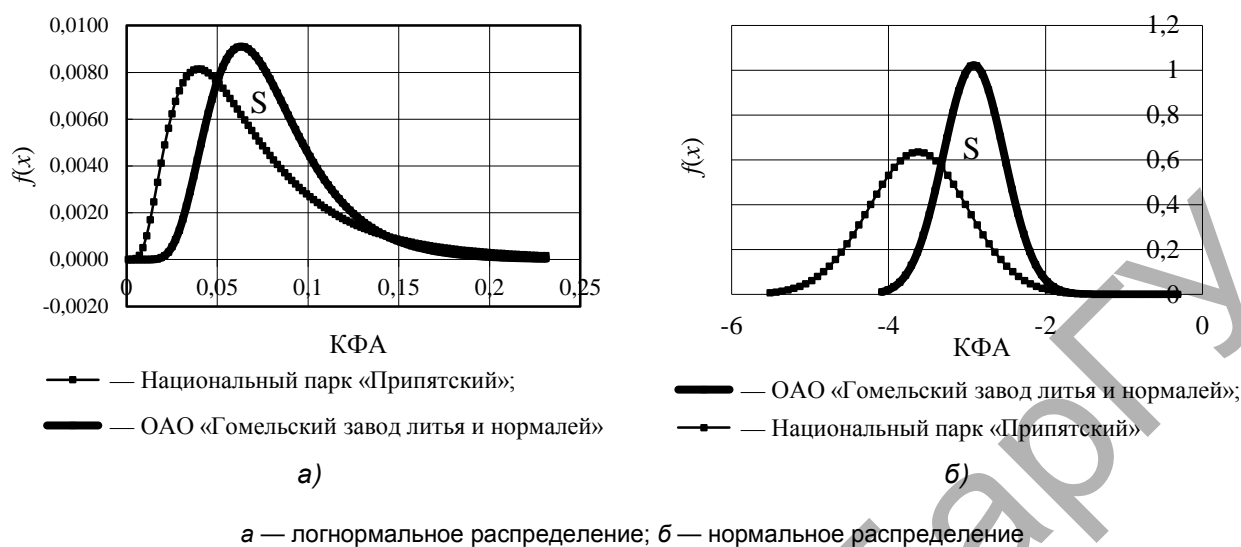


Рисунок 3. — Кривые распределения случайной величины коэффициента флуктуирующей асимметрии параметров листовых пластинок березы повислой *Betula pendula*

Figure 3. — Distribution curves of a random variable fluctuating asymmetry of leaf lamina parameters of the drooping birch *Betula pendula*

Для определения глубины адаптивных изменений по КФА ($\Gamma_{фа}$) необходимо сравнить интервалы наиболее вероятных значений показателя в техногенной зоне и в фоновых условиях.

Поскольку распределение показателя асимметрично, то в такой ситуации полагаться на среднее и стандартное отклонение нельзя. Для описания таких данных воспользуемся 5-й и 95-й процентилями в качестве границ интервалов. Глубину ($\Gamma_{фа}$) рассчитали как разность единицы и отношения среднего интервала изменений показателя в фоновых условиях к среднему тех значений показателя в техногенных зонах, которые не попали в интервал фоновых значений.

Представим итоговые значения показателя адаптивных изменений $АП_{фа}$, вычисленные по формуле (1) и усредненные из двух выборок в каждой точке отбора проб (таблица 5.)

Т а б л и ц а 5. — Значения показателя адаптивных изменений листовых пластинок березы повислой *Betula pendula*

T a b l e 5. — The value of leaf lamina drooping birch *Betula pendula* adaptive changes indicator

Место отбора проб	Характеристика адаптивных изменений		
	степень	глубина	общая оценка
1	0,521	0,873	0,454
2	0,485	0,866	0,420
3	0,537	0,848	0,455
4	0,548	0,877	0,481
5	0,654	0,864	0,565
6	0,279	0,855	0,239
7	0,396	0,843	0,334
8	0,642	0,858	0,551
9	0,535	0,866	0,463
10	0,507	0,888	0,451
11	0,371	0,873	0,323
12	0,416	0,873	0,363

При интерпретации значений общей оценки адаптивных изменений с учетом КФА следует учитывать, что его значение в общем случае изменяется от 0 до 1.

В результате количественной оценки общего показателя адаптивных изменений листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* установлено, что, по сравнению с фоновыми условиями, максимальная реализация адаптивного потенциала наблюдается в районе ОАО «Мозырский НПЗ» (0,551) и объездной дороги Гомеля (0,565) (см. таблицу 5). Незначительные адаптационные процессы отмечены для листовых пластинок в окружении ЗАО «Добрушский фарфоровый завод». В перспективе планируется использование методики расчета общего показателя адаптивных изменений листовых пластинок с учетом нескольких параметров (длины, ширины, площади, зольности, сухой биомассы, концентрации фотосинтетических пигментов, параметров фотосинтетической активности, генетического полиморфизма), что позволяет провести сравнительный анализ адаптивных изменений различных представителей растительного сообщества.

Заключение. Использование показателя флуктуирующей асимметрии морфологических структур, которая проявляется даже на относительно низком уровне средовых нарушений, с одной стороны, является одним из подходов для интегральной характеристики качества среды, с другой — характеризует адаптивные механизмы растений в техногенных условиях. В проведенных исследованиях определение КФА листовых пластинок березы повислой *Betula pendula* Roth. позволило осуществить оценку общего показателя адаптивных изменений с учетом их степени и глубины. В результате установлено, что значения КФА варьируют в пределах от 0,033 до 0,073 и свидетельствуют, что территорию Национального парка «Припятский» можно характеризовать как благоприятную для развития; промышленная и селитебная зона относится к загрязненным и неблагоприятным условиям для роста и развития растений. По сравнению с фоновыми условиями максимальная реализация адаптивного потенциала наблюдается в районе ОАО «Мозырский НПЗ» и объездной дороги Гомеля. Незначительные адаптационные процессы характерны для листовых пластинок в окружении ЗАО «Добрушский фарфоровый завод», что, возможно, свидетельствует о наиболее благоприятных условиях для роста и развития растений в рамках проведенных исследований.

Список цитированных источников

1. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь : стат. сб. — Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2017. — 235 с.
2. Тагирова, О. В. Сезонные изменения интегрального показателя стабильности развития и жизненное состояние деревьев *Betula pendula* Roth. в условиях Уфимского промышленного центра / О. В. Тагирова, А. Ю. Кулагин // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. — 2015. — № 4 (5). — С. 1015—1022.
3. Лозинская, О. В. Сравнительный анализ состояния ценопопуляций березы повислой (*Betula pendula* Roth.), произрастающей в условиях с разным уровнем антропогенной нагрузки / О. В. Лозинская, А. И. Крижевская, С. Б. Мельнов // Экол. вестн. — 2013. — № 4 (26). — С. 103—108.
4. Гуртяк, А. А. Экологическая оценка урбанизированных территорий с применением коэффициента флуктуирующей асимметрии : автореф. дис. ... канд. биол. наук / А. А. Гуртяк. — Тюмень, 2013. — 16 с.
5. Савинцева, Л. С. Экологический анализ адаптивных механизмов растений в урбанизированной среде : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Л. С. Савинцева. — Петрозаводск, 2015. — 23 с.
6. Собчак, Р. О. Оценка экологического состояния рекреационных зон методом флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth. / Р. О. Собчак, Т. Г. Афанасьева, М. А. Копылов // Вестн. Том. гос. ун-та. — 2013. — № 368. — С. 195—199.
7. Мандра, Ю. А. Растения как индикаторы экологического состояния среды курортного региона (на примере города Кисловодска) : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Ю. А. Мандра. — М., 2010. — 21 с.
8. Шергина, О. В. Оценка состояния урбоэкосистемы по параметрам древесных растений и почвенного покрова : на примере г. Иркутска : автореф. дис. ... канд. биол. наук / О. В. Шергина. — Иркутск, 2006. — 19 с.
9. Латанов, А. А. Эколого-физиологическая оценка состояния древесных растений и насаждений в зависимости от антропогенной нагрузки в городе Одинцово : автореф. дис. ... канд. биол. наук / А. А. Латанов. — М., 2012. — 23 с.

10. Ведерников, К. Е. Биоэкологические особенности древесных растений в насаждениях урбаноэкосистем : (на примере г. Ижевска) : автореф. дис. ... канд. биол. наук / К. Е. Ведерников. — Тольятти, 2008. — 20 с.
11. Мощеникова, Н. Б. Оценка экологического состояния зеленых насаждений Санкт-Петербурга : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Н. Б. Мощеникова. — М., 2011. — 19 с.
12. Здоровье среды: методика оценки / В. М. Захаров [и др.]. — М. : Центр экол. политики России, 2000. — 66 с.
13. Козлов, М. В. Исследования флуктуирующей асимметрии растений в России: мифология и методология / М. В. Козлов // Экология. — 2017. — № 1. — С. 3—12.

References

1. Environmental protection in Belarus Republic : statistical compendium. Minsk : National statistical Committee of Belarus Republic, 2017. 235 p. (in Russian).
2. Tagirova O. V., Kulagin A. U. Seasonal changes of an integrated stability development indicator and trees *Betula pendula* Roth. vital condition in Ufa industrial center conditions // Samara scientific center News of Russian Academy of Sciences. 2015. № 4 (5). Pp. 1015—1022 (in Russian).
3. Lozinskaya O. V., Krizhevskaya A. I., Melnov S. B. Comparative analysis of populyation drooping birch (*Betula pendula* Roth.) condition in different level anthropogenic loading growing conditions // Ecological messenger. 2013. № 4 (26). Pp. 103—108 (in Russian).
4. Gurtyak A. A. Ecological assessment of the urbanized territories with the fluctuating asymmetry indicator application. Avtoref. Cand. Biol. Sci. Tyumen, 2013. 16 p. (in Russian).
5. Savintseva L. S. The ecological analysis of plants adaptive mechanisms in urbanized environment. Avtoref. Cand. Biol. Sci. Petrozavodsk, 2015. 23 p. (in Russian).
6. Sobchak R. O., Afanasyeva T. G., Kopylov M. A. The rest zones ecological state assessment by *Betula pendula* Roth. leaves fluctuating asymmetry method // Messenger the Tomsk state university. 2013. № 368. Pp. 195—199 (in Russian).
7. Mantra U. A. Plants as ecological condition indicators of the resort region environment: (on the example of Kislovodsk city). Avtoref. Cand. Biol. Sci. Moscow, 2010. 21 p. (in Russian).
8. Shergina O. V. The assessment city ecosystem condition in wood plants parameters and a soil cover: on the example of Irkutsk. Avtoref. Cand. Biol. Sci. Irkutsk, 2006. 19 p. (in Russian).
9. Latanov A. A. Ecology and physiology assessment of wood plants and plantings condition depending on anthropogenic loading in Odintsovo city. Avtoref. Cand. Biol. Sci. Moscow, 2012. 23 p. (in Russian).
10. Vedernikov K. E. Bioecological features of wood plants in plantings city ecosystems: (on Izhevsk example). Avtoref. Cand. Biol. Sci. Togliatti, 2008. 20 p. (in Russian).
11. Moshchenikova N. B. The ecological condition assessment of St. Petersburg green plantings. Avtoref. Cand. Biol. Sci. Moscow, 2011. 19 p. (in Russian).
12. Health of the environment: assessment technique / V. M. Zakharov [et al]. M. : Center of Russia environmental policy, 2000. 66 p. (in Russian).
13. Kozlov M. V. Researches of plants fluctuating asymmetry in Russia: mythology and methodology. 2017. 1. Pp. 3—12 (in Russian).

Now at a suburbanization stage there are practically no data on vegetable communities technogenic pollution influence. Gomel Polesye which ranks second in the importance of Belarus industrial region represents a convenient model for such research. Therefore purpose of the work was to define the fluctuating asymmetry indicator variability model as well as wood plants leaf laminas adaptive changes in the technogenic influence conditions on the example of the drooping birch *Betula pendula* Roth. growing in Gomel Polesye. In the result it was found out that in comparison with background conditions the adaptive potential maximum realization is observed around Mozyr oil plant and the bypass road of the city of Gomel. Insignificant adaptation processes are characteristic of leaf laminas in Dobrush porcelain plant environment that perhaps proves to be optimal conditions for plants growth and development within the frames of the conducted research.

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность доктору географических наук, профессору кафедры почвоведения и земельных информационных систем Белорусского государственного университета Н. К. Чертко за помощь в подготовке материала статьи к опубликованию.

Поступила в редакцию 21.11.2017