

## МОРФОЛОГІЧНА МІНЛИВІСТЬ ФОЛІАРНИХ ПОКАЗНИКІВ *POPULUS TREMULA* L. В УМОВАХ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

У. Семак, М. Миленька

ДВНЗ «Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника»  
вул. Шевченка, 57, Івано-Франківськ 76000, Україна  
e-mail: [ulianasemak@gmail.com](mailto:ulianasemak@gmail.com)

На основі аналізу модифікації морфологічних параметрів можна оцінити не тільки стан рослинного організму, але й здійснити діагностику стану середовища, що особливо актуально в умовах зростаючих рівнів антропопресії. У статті подано дослідження морфологічних особливостей асиміляційного апарату *Populus tremula* L. в умовах впливу техногенних емісій Бурштинської ТЕС. Методами лінійної морфометрії проаналізовано мінливість морфологічних показників листка при високих рівнях забруднюючих речовин. У зоні впливу промислового об'єкта спостерігається зміна фоліарних показників. Виявлено неоднакову мінливість морфологічних параметрів в умовах впливу промислового забруднення та за мінімізованого техногенного навантаження. Рівні мінливості морфологічних параметрів оцінено через показник коефіцієнта варіації, що для більшості проаналізованих морфологічних ознак в умовах техногенного навантаження характеризується високими і середніми значеннями. Найбільш варіабельними виявилися показники відстані між першою і другою жилкою та довжина другої від основи листка жилки, високомінливою ознакою також є кут між центральною та другою жилкою від основи листкової пластинки. Для біоіндикації техногенного навантаження апробовано показник флуктуючої асиметрії листових пластинок *P. tremula* L. Аналіз флуктуючої асиметрії здійснено на основі лінійних вимірів, а також за даними площі половин листових пластинок. Результати аналізу флуктуючої асиметрії асиміляційного апарату засвідчили зростання аналізованого показника за дії чинників техногенно походження як за лінійними вимірами, так і за показниками площі. Здійснено порівняння двох підходів до оцінки рівня флуктуючої асиметрії. У результаті проведеного дослідження визначено ті фоліарні морфометричні параметри *P. tremula* L., які виявляють високу морфологічну реакційність за дії техногенного навантаження і можуть використовуватись як біоіндикаційні маркери для оцінки стану середовища. Достовірним індикатором техногенного пресингу є рівень флуктуючої асиметрії, що може бути рекомендований до використання у біоіндикаційних дослідженнях.

*Ключові слова:* промислове забруднення, фітоіндикація, лінійна морфометрія, фоліарні показники, флуктуюча асиметрія

Тенденція стрімкого розвитку промисловості обумовлює те, що антропогенний вплив набуває значимості окремого екологічного фактора, який призводить до зміни як абіотичного, так і біотичного компонента екосистем. За цих умов актуальним завданням є пошук об'єктивних методів діагностики стану навколишнього середовища. Інтегральну оцінку якості довкілля дають змогу здійснити біоіндикаційні методи. Найзручнішими об'єктами біоіндикаційних досліджень є рослинні організми, що через особливості своєї життєдіяльності максимально точно відображають умови, в яких зростають, оскільки їхні реакції на стан середовища є пластичними та добре виявляються на рівні морфологічних ознак [6, 7]. Послугуючись фітоіндикаційними методами, можна оцінити як режим

екологічних факторів, так і стан біоти техногенних біосистем загалом [6]. Серед найбільш вживаних і перспективних фітоіндикаційних прийомів провідна роль належить індикації умов середовища за мінливістю морфологічних параметрів [6, 8], при цьому в системі фітоіндикаційних досліджень особливе значення має лінійна морфометрія. Реакція рослин за їхніми морфометричними параметрами є комплексним показником якості довкілля, що відображає стан екосистеми за взаємодії природних і техногенних факторів [6, 8].

Найбільш інформативними біоіндикаційними маркерами є фоліарні показники [10, 11]. Листок, відображаючи функціональний стан рослинного організму, повною мірою характеризує взаємозв'язки у системі «рослина-середовище» [8]. Зважаючи на чутливість морфометричного аналізу асиміляційного апарату, інформація, отримана із обмеженого набору морфоознак, дає можливість охарактеризувати сумарний вплив техногенного пресингу та здійснити інтегральну оцінку середовища [2, 12].

Одним із найбільш точних та інформативних методів у біоіндикації можна вважати прояв флуктуючої асиметрії асиміляційного апарату багаторічних деревних рослин [2–5, 14, 15]. За проявом флуктуючої асиметрії можна дізнатися про рівень стресу, який переживає організм, оскільки флуктуюча асиметрія виявляється мінімальною лише за оптимальних умов середовища і неспецифічно зростає за будь-яких стресових впливів [3, 5, 14]. Рівень флуктуючої асиметрії виступає показником стабільності розвитку організму, адже механізми, які мали би контролювати симетричність в умовах стресу, не здатні протистояти зовнішнім негативним факторам [9, 14–16]. Відхилення від умовної норми показників симетричності в умовах помірного стресу виявляються раніше, ніж виражені морфологічні порушення [12].

Численні дослідження свідчать, що величина флуктуючої асиметрії зростає в місцях високого антропогенного навантаження [3, 5, 14, 15]. Таким чином, показник величини флуктуючої асиметрії є дуже зручним і точним способом оцінки стану довкілля в умовах високих рівнів антропопресії.

Під час проведення біоіндикаційних досліджень найважливішим етапом є вибір адекватного об'єкта біоіндикації. Представники роду *Populus* за даними низки досліджень [1, 2, 14, 15] відзначаються високим біоіндикаційним потенціалом. Однак подальша апробація представників роду як біоіндикаторів залишається актуальною.

Метою дослідження є аналіз морфологічної реакції листків *Populus tremula* L., найбільш поширеного виду дендрофлори золошлаковідвалів Бурштинської ТЕС, на високі рівні техногенного навантаження досліджуваного екотопу.

#### Матеріали та методи

Дослідження проводили в зоні впливу Бурштинської ТЕС – найбільшого забруднювача довкілля на Прикарпатті [9, 10]. До складу емісій входить низка потенційно небезпечних забруднюючих речовин, серед яких аерополітанти (сірчистий і сірчаний ангідриди, оксиди нітрогену, газоподібні продукти неповного згорання, дрібнодисперсні аерозолі тощо), а найбільш небезпечними через високу токсичність для біоти є важкі метали [10, 13]. Об'єктами підвищеної екологічної небезпеки є також золошлаковідвали Бурштинської ТЕС – спеціальні гідротехнічні споруди, де відбувається складування твердих відходів від спалювання вугілля [10]. В умовах золошлаковідвалів спостерігається трансформація природних геохімічних циклів, зміна природного радіоактивного фону через підвищену концентрацію радіоактивних ізотопів у продуктах згорання вугілля [13]. Вивітрювання та розсіювання твердих часток різного ступеня дисперсності з поверхні чаш золовідвалів зумовлює аеротехногенне забруднення довкілля. Унаслідок

потрапляння золошлакових матеріалів із чаш золовідвалів до поверхневих і ґрунтових вод відбувається зміна їхніх хімічних показників [9, 13]. Відбір проб здійснювали на діючому золошлаковідвалі № 3. За умовно чисту територію приймали Галицький національний природний парк. Точки відбору проб містяться на відстані понад 30 км одна від одної, а отже, є добре ізольованими.

Наприкінці вегетаційного періоду, коли завершився повний розвиток асиміляційної системи, на кожній із дослідних ділянок випадково обирали 5 дерев, із яких збирали по 50 листків. Відбір листків здійснювали з гілок одного порядку галуження, розташованих на висоті 1–2 м над поверхнею ґрунту. Обирали рослини приблизно одного віку. Обсяг вибірки становив 500 листків.

Свіжозрізані листки дигіталізували з використанням сканера Samsung SCX-3205. З кожної листкової пластинки за допомогою програмного пакету CoralDRAW X6 знімали по 9 параметрів: 1 – довжина черешка, см; 2 – довжина листка, см; 3 – ширина правої та лівої частини листкової пластинки, см; 4 – довжина першої від основи листка жилки із правого та лівого боку листкової пластинки, см; 5 – довжина другої від основи листка жилки з правого та лівого боку, см; 6 – відстань між першою та другою жилкою, см; 7 – кут між центральною і першою від основи листкової пластинки жилкою; 8 – кут між центральною та другою від основи листка жилкою; 9 – площа половини листкової пластинки, см<sup>2</sup>. Зазначені морфологічні показники відповідно до літературних даних [2, 3, 5, 15] відзначаються максимальною інформативністю для визначення флуктуючої асиметрії.

Биометричний аналіз даних проведено методами математичної статистики. Обчислено середнє арифметичне та його похибка ( $M \pm m$ ); середній квадрат відхилень, або дисперсію ( $Sx^2$ ); коефіцієнт варіації ( $CV$ ).

Значення коефіцієнта асиметрії обчислювали як добуток подвоєного модуля різниці промірів зліва та справа до суми промірів зліва та справа:

$$FA=2|L-R|/|L+R|,$$

де  $FA$  – флуктуюча асиметрія,  $L$  – промір листкової пластинки з лівого боку,  $R$  – промір листкової пластинки з правого боку.

Порівняння середніх арифметичних і визначення достовірності різниці між ними проведено за допомогою  $t$ -критерію Стьюдента. Довірчу ймовірність  $t$ -розподілу було обрано рівною 0,95 % (ймовірність помилки 5 %). Статистичну обробку морфометричних даних проведено з використанням комп'ютерної програми Excel 7.0.

### Результати і їхнє обговорення

Результати проведеного аналізу фоліарних показників методами лінійної морфометрії свідчать про відмінність рівня їхньої мінливості в умовах золошлаковідвалів Буршинської ТЕС і на території із мінімізованим техногенним пресингом. З'ясовано, що модифікація фоліарних показників *P. tremula* в умовах техногенного навантаження та за відсутності такого не є однаковою.

Для оцінки морфологічної мінливості досліджуваних параметрів обчислили коефіцієнт варіації. Більшість морфологічних параметрів в обох моніторингових точках характеризуються середніми показниками варіабельності (див. таблицю).

Найбільш варіабельною ознакою виявився показник відстані між першою та другою жилкою. На території золошлаковідвалів коефіцієнт варіації показника становить 23–29 %. Однак ця ознака показує підвищену варіативність як за високих рівнів антропопресії, так і за мінімізованого впливу техногенного навантаження, і на умовно чистій території становить 19–25 %.

Морфометричні параметри листка *Populus tremula* L.: 1 – територія золошлаковідвалів Бурштинської ТЕС; 2 – умовно чиста територія

№	Морфометричні параметри	Показники						
		M±m		S <sup>2</sup>		CV, %		
		1	2	1	2	1	2	
1	Довжина черешка, см	4,04 ± 0,5	4,57 ± 0,56	0,4	0,54	15,2	15,4	
2	Довжина листка, см	4,46 ± 0,42	4,77 ± 0,42	0,26	0,3	11,4	11	
3	Ширина листка, см	L	2,29 ± 0,2	2,19* ± 0,23	0,06	0,1	10,6	12,4
		R	2,31 ± 0,21	2,25* ± 0,23	0,07	0,1	11,2	12,2
4	Довжина першої жилки, см	L	3,76 ± 0,34	3,66* ± 0,36	0,18	0,23	11,2	12
		R	3,76 ± 0,34	3,68* ± 0,36	0,2	0,24	11,8	12
5	Довжина другої жилки, см	L	2,43 ± 0,47	2,84 ± 0,33	0,4	0,2	25,4	16,4
		R	2,4 ± 0,49	2,64 ± 0,34	0,38	0,2	25,4	16,2
6	Відстань між першою і другою жилкою, см	L	1,47 ± 0,27	1,6* ± 0,28	0,12	0,14	23	19
		R	1,48 ± 0,28	1,55* ± 0,29	0,13	0,14	29	25
7	Кут між центральною і першою жилкою, °	L	42,28 ± 4,91	44,66* ± 4,68	43,32	38,64	14,8	14
		R	41,54 ± 3,52	47,35* ± 4,66	21,26	35,17	10,2	13,2
8	Кут між центральною і другою жилкою, °	L	44,12 ± 7,02	50,8* ± 6,54	79,95	70,37	20,4	16,4
		R	45,8 ± 6,02	53,0* ± 6,22	61,84	71,19	17,4	15,6
9	Площа половини листкової пластинки, см <sup>2</sup>	L	7,25 ± 0,19	10,24* ± 0,5	11,75	11,31	32,9	18,3
		R	9,3 ± 0,26	12,9* ± 0,6	11,58	11,67	28,1	18,3

**Примітки:** L – значення вимірюваного показника з лівого боку листка; R – значення показника з правого боку листка; M±m – середнє арифметичне і похибка середнього; Sx<sup>2</sup> – дисперсія; CV – коефіцієнт варіації; \* – статистично достовірна різниця (p≤0,05)

Високим показником варіативності характеризується також довжина другої жилки, що на золошлаковідвалах становить 25 %, тоді як на контрольній території – 16,2 %. На противагу показник довжини першої жилки, хоч і показує середній рівень варіативності на обох територіях, характеризується трохи меншим коефіцієнтом варіації на золошлаковідвалах – 11,2–11,8 %, тоді як на контрольній території – 12 %. Схожою тенденцією виявляє мінливість ширини листка, що на золошлаковідвалах характеризується нижчим рівнем варіативності (10–11,2 %), ніж на еталонній території (12,2–12,4 %).

Незначне перевищення середнього рівня варіації у кута між центральною та другою жилкою спостерігається на золошлаковідвалах – 20,4 %; на контрольній території коефіцієнт варіації за цією ознакою – 16,4 %. Натомість мінливість показника кута між першою і центральною жилкою становить 14,8–10,2 % на умовно чистій території та 14–13,2 % для золошлаковідвалів.

Інші показники, зокрема, довжина черешка і довжина листка, характеризуються середнім показником коефіцієнта варіації та становлять приблизно 15 і 11 % на обох територіях.

**Перевірка гіпотези критерієм Стьюдента** (гіпотеза справедлива на 95 %) показала достовірну різницю між вибірками за більшістю досліджуваних ознак ( $t_{\text{роз}} > t_{\text{гр}}$ ), за винятком довжини черешка, довжини листка та довжини другої жилки ( $t_{\text{роз}} < t_{\text{гр}}$ ).

Результати аналізу флуктуючої асиметрії листкових пластинок *P. tremula* свідчать, що показники асиметричності листкових пластинок більші на золошлаковідвалах, де середнє значення флуктуючої асиметрії 15,2 %. На противагу показник флуктуючої асиметрії листкових пластинок на території з мінімізованим рівнем антропогенного навантаження становить 9,8 %. Рівні флуктуючої асиметрії листкових пластинок *P. tremula* відображені на рис. 1.

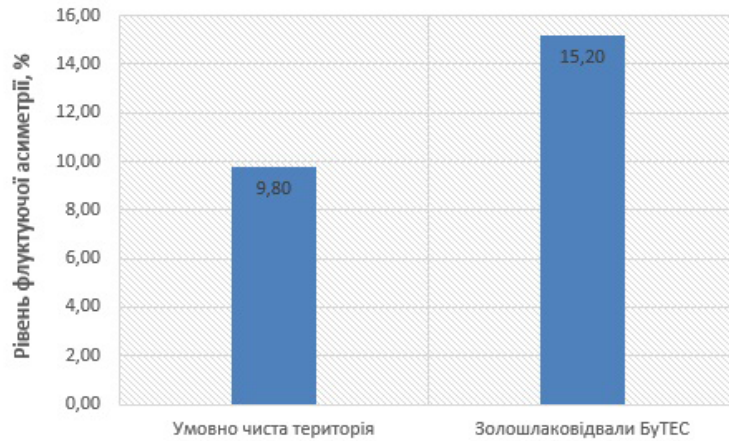


Рис. 1. Флуктуюча асиметрія листкових пластинок *Populus tremula* L. на контрольній території та в умовах техногенного навантаження (лінійна морфометрія)

Обчислено коефіцієнти флуктуючої асиметрії через дані площі правої та лівої половини листкових пластинок.

За результатами вимірів на території золошлаковідвалів рівень асиметрії коливається від 7 до 12 % і в середньому становить 9 %. На умовно чистій території асиметрія становить від 6 до 8 % (усереднено – 6,8 %).

Використання значення площі (рис. 2) дає нижчий рівень асиметрії: на золошлаковідвалах 9 % проти 15 % за лінійними ознаками; на умовно чистій території 6,8 % проти 9 % за лінійними вимірами.

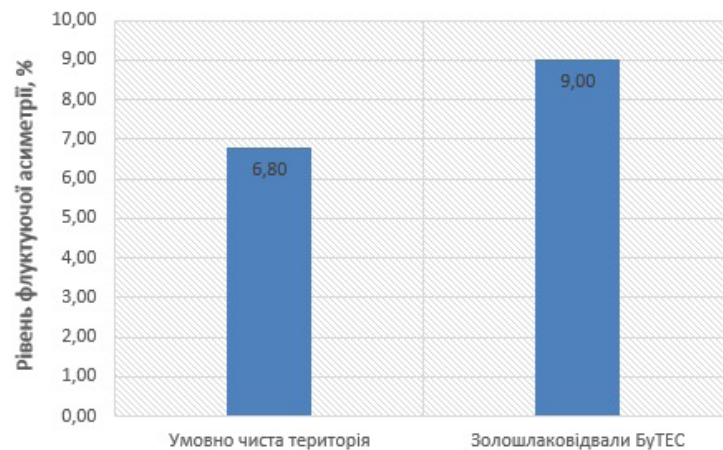


Рис. 2. Рівень флуктуючої асиметрії листкових пластинок *P. tremula* з використанням показників площі

Порівнюючи значення вимірних асиметрій двома різними способами, слід зазначити, що лінійні вимірювання дають ширший діапазон значення асиметрії.

Перевірка гіпотез критерієм Стьюдента показує достовірну різницю для вибірок у разі вимірювання флуктуючої асиметрії через вимірювання площі половин, а також лінійного визначення ( $t_{\text{роз}} > t_{\text{гр}}$ ).

В умовах техногенного навантаження спостерігається морфологічна реакційність асиміляційного апарату *P. tremula*, що виявляється як достовірне зменшення фоліарних показників і модифікація показників мінливості морфоознак.

Такі морфопараметри як довжина черешка, довжина та ширина листка, довжина першої жилки від основи листової пластинки, а також кут між центральною і першою жилкою від основи листка показали середній рівень варіації на обох територіях. Найбільш варіабельною ознакою на обох територіях виявився показник відстані між першою і другою жилкою. Високим показником варіативності також характеризується довжина другої жилки та кут між центральною і другою жилкою.

Таким чином, показники довжини другої жилки та кут між центральною і другою жилкою від основи листової пластинки можна використовувати у біоіндикаційних дослідженнях як високочутливі маркери стану середовища.

Результати дослідження свідчать про зростання флуктуючої асиметрії в умовах техногенного навантаження як із лінійним вимірюванням фоліарних показників, так і з використанням показників площі. Порівнюючи значення вимірної флуктуючої асиметрії двома різними способами, слід зазначити, що лінійні вимірювання дають ширший діапазон значення асиметрії та вищі показники асиметричності порівняно із визначенням флуктуючої асиметрії через вимірювання площ половин листових пластинок.

Отже, *Populus tremula* L. є перспективним видом для оцінки стану довкілля на основі морфометричних даних і за показником флуктуючої асиметрії. Проте для використання показника флуктуючої асиметрії листових пластинок в умовах золошлаковідвалів необхідно врахувати весь комплекс чинників, які могли би призвести до порушення асиметричності білатеральних структур, а тому виникає необхідність детальнішого вивчення всіх факторів впливу. Зважаючи на те, що асиметрія деяких ознак є генетично детермінованою і не пов'язана з впливом факторів зовнішнього середовища, вважаємо за доцільне дослідити неспрямовану асиметрію й антисиметрію аналізованих морфопараметрів у подальших дослідженнях.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреева М. В. Оценка состояния окружающей среды в насаждениях в зонах промышленных выбросов с помощью растений-индикаторов: автореф. дис. ... канд. с-х. наук: 06.03.03. СПб., 2007. 18 с.
2. Ганжа Д. Морфологічна реакція листків тополі в різних умовах урботехногенного навантаження // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол. 2012. Вип. 60. С. 163–170.
3. Гаврикова В. С. Біоіндикація урбосередовища за показником флуктуючої асиметрії дерев *Acer saccharinum* L. // Наук.-практ. журнал. Екол. науки. 2014. № 6. С. 77–81.
4. Гаврикова В. С. Скринінг видів клена (*Acer*) як тест-об'єктів для оцінювання ступеня забруднення навколишнього середовища // Наук. вісн. НЛТУ України. 2014. Вип. 24 (6). С. 70–73.
5. Глухов А. З., Штирц Ю. А., Демкович А. Е., Жуков С. П. Оценка проявления флуктуирующей асимметрии билатеральных признаков листовой пластинки *Acer pseudoplatanus* L. в условиях придорожных экосистем промышленного города (на примере г. Донецка) // Пром. ботаника. 2011. Вып. 11. С. 90–96.
6. Глухов О. З., Прохорова С. І. Індикація стану техногенного середовища за морфологічною мінливістю рослин // Пром. ботаника. 2008. Вып. 8. С. 3–11.

7. Зайцева І. А. Зміни морфометричних характеристик та стан рослин роду *Ulmus* L. у зелених насадженнях промислових міст Дніпропетровської області // Питання біоіндикації та екології. 2012. Вип. 17. № 1. С. 176–183.
8. Злобін Ю. А., Скляр В. Г., Бондарєва Л. М. та ін. Концепція морфометрії в сучасній ботаніці // Чорномор. ботан. журнал. 2009. Т. 5. №1. С. 5–22.
9. Ковалів Л. М. Екологічні проблеми теплових електростанцій // Наук. вісн. НЛТУ України. 2013. Вип. 23 (18). С. 57–56.
10. Миленька М. М. Біоіндикаційна оцінка екологічного стану Бурштинської урбоєкосистеми: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00.16. Дніпропетровськ, 2009. 20 с.
11. Морозова Т. В., Курнична Л. І. Морфологічні особливості деревних рослин в умовах аеротехногенного забруднення // Вісн. Прикарпат. нац. ун-ту. Сер. біол. 2012. XVI. С. 175–179.
12. Неверова О. А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера. 2009. Т. 1. № 1. С. 82–92.
13. Неспляк О. С. Екологічні особливості формування флори і рослинності золошлаковідвалів Бурштинської теплової електростанції та їх використання в рекультивативі: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00.16. Дніпропетровськ, 2011. 23 с.
14. Савосько В. М., Католіченко О. М. Флюктууюча асиметрія листків берези повислої в умовах аеротехногенного забруднення Криворіжжя // Питання біоіндикації та екології. 2014. Вип. 19. № 2. С. 90–102.
15. Штірц Ю. О. Показники асиметрії листкової пластинки *Populus nigra* L. та їх біоіндикаційна інформативність // Чорномор. бот. журнал. 2013. Т. 3. № 9. С. 349–358.
16. Leung B., Forbes M. R., Houle D. Fluctuating Asymmetry as a Bioindicator of Stress: Comparing Efficacy of Analyses Involving Multiple Traits // Am. Nat. 2000. Vol. 155 (1). P. 101–115.

Стаття надійшла до редакції 12.12.19

доопрацьована 13.07.20

прийнята до друку 13.08.20

## VARIATION IN LEAF MORPHOLOGICAL TRAITS OF *POPULUS TREMULA* L. UNDER THE CONDITIONS OF TECHNOGENIC LOAD

U. Semak, M. Mylen'ka

*Vasyl Stefanyk Precarpathian National University  
57, Shevchenko St., Ivano-Frankivsk 76018, Ukraine  
e-mail: ulianasemak@gmail.com*

The article presents the study of leaf morphological features of *Populus tremula* L. Growing under the conditions of the influence emissions from Burshtynska TPP. The methods of linear morphometry were used to analyze the variability of the morphological parameters of leaves at high levels of pollutants. In the zone of influence of the industrial object there is a significant decrease in the foliar parameters. Uneven variability of morphological parameters between the study plots of industrial pollution and with minimized technogenic load are revealed. Levels of variability of morphological parameters are estimated using coefficient of variation, which for most of the analyzed morphological features at the polluted plot load is characterized by high and average values. The most varied ones were the

distance between the first and second veins and the length of the second vein from the base of the leaf vein. For bioindication of anthropogenic load, an index of fluctuating asymmetry of *P. tremul* leaf blades has been tested. The analysis of the fluctuating asymmetry was based on leaf linear measurements and area of the halves of leaf blades. The results indicated an increase in fluctuating asymmetry index in plant growing at the polluted plot, both in linear measurements and in area indices. The comparison of the two approaches to the estimation of the level of fluctuating asymmetry has been carried out. As a result of this study, those foliar morphometric parameters of *P. tremula*, which exhibit high morphological reactivity under the influence of anthropogenic load, can be used as bioindicators for assessing the state of the environment. A reliable indicator of technological pressure is the level of fluctuating asymmetry that can be recommended for use in bioindicative studies.

*Keywords:* industrial contamination, phytoindication, linear morphometry, leaf indexes, fluctuating asymmetry