УДК 630*116.4:674.031.623.23

ФЛУКТУИРУЮЩАЯ АСИММЕТРИЯ ЛИСТЬЕВ ТОПОЛЯ БАЛЬЗАМИЧЕСКОГО (*POPULUS BALSAMIFERA* L.) В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ

Попельницкая И.М., Попов А.О.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Институт экологии и географии,
Красноярск, e-mail: popelnickayairina@mail.ru

В работе проведен статистический анализ распределения значений морфометрических признаков, листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.), подвергнувшегося обрезке. Для определения характера распределения признаков и их разности использовались критерии Колмогорова – Смирнова (К-С), описательная статистика, графические методы. Проведенный анализ показал, что для четырех исследуемых признаков можно исключить антисимметрию, на основании статистических критериев К-С, значений асимметрии, эксцесса и совпадения средних значений с медианами распределений. Для всех признаков с левой и правой стороны листовой пластины наблюдается слабая левая асимметрия и островершинное нормальное распределение. Исключением является пятый признак – угол между главной и второй жилкой, распределение величин которого можно отнести к нормальному с определенными допущениями, поэтому при расчете интегрального показателя флуктуирующей асимметрии использовали четыре морфометрических признака. Для выявления направленной асимметрии использовали F-тест и двухвыборочный t тест с одинаковыми дисперсиями величин признака с правой и левой стороны листа. Доказан флуктуирующий характер асимметрии. По величине интегрального показателя оценено жизненное состояние 30 деревьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera*), произрастающих на острове Татышев в г. Красноярске. Среднее значение интегрального показателя для тополей, подвергшихся обрезке $FA = 0,038 \pm 0,02$, для необрезанных тополей $FA = 0,036 \pm 0,001$, что соответствует условно нормальному состоянию вида индикатора. Отсутствие статистически достоверных отличий значения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии для тополей, не подвергавшихся и подвергавшихся обрезке, позволяет использовать последние для оценки здоровья среды как вида индикатора.

Ключевые слова: флуктуирующая асимметрия, направленная асимметрия, антисимметрия, тополь бальзамический, обрезанные тополя

LEAVES' FLUCTUATING ASYMMETRY OF POPLARS (*POPULUS BALSAMIFERA*) IN THE URBAN ENVIRONMENT

Popelnitskaya I.M., Popov A.O.

Siberian Federal University, Institute of ecology and geography, Krasnoyarsk,
e-mail: popelnickayairina@mail.ru

The statistical analysis of the distribution of values of morphometric characteristics, leaves of poplar balsamic (*Populus balsamifera* L.), subjected to pruning, was carried out in the work. To determine the nature of the distribution of features and their difference, Kolmogorov-Smirnov criteria (K-S), descriptive statistics, graphical methods were used. The analysis showed that for the four features studied, antisymmetry can be excluded, based on the statistical criteria of K-S, the values of asymmetry, kurtosis, and the coincidence of mean values with the medians of the distributions. For all signs on the left and right side of the leaf plate, there is a weak left asymmetry and a fine normal distribution. The exception is the fifth sign – the angle between the main and the second vein, the distribution of whose values can be attributed to the normal with certain assumptions, therefore four integral morphometric features were used to calculate the integral index of the fluctuating asymmetry. To determine the directional asymmetry, the F-test and a two-sample t test were used with the same variances of the values of the characteristic on the right and left side of the sheet. The fluctuating nature of asymmetry is proved. By the value of the integral index, the life state of 30 poplar balsam trees (*Populus balsamifera*), which grows on the island of Tatyshchev in Krasnoyarsk, is estimated. The average value of the integral index for poplars subjected to trimming $FA = 0.038 \pm 0.02$, for uncircular poplars, $FA = 0.036 \pm 0.001$, which corresponds to the conditionally normal state of the indicator type. The absence of statistically significant differences in the value of the integral index of fluctuating asymmetry for poplars not subjected to and subjected to pruning allows the latter to be used to assess the health of the environment as an indicator type.

Keywords: fluctuating asymmetry, directional asymmetry, antisymmetry, poplar balsamic, poplar subjected to pruning

Зеленые насаждения являются неотъемлемой составляющей не только природных, но и городских экосистем и выполняют весьма важные экологические функции: средообразующие; санитарно-гигиенические; рекреационные; эстетические.

В озеленении г. Красноярск достаточно широко на протяжении нескольких десяти-

летий используется тополь бальзамический (*Populus balsamifera*). Деревья этого вида распространены во всех районах города, в парках, во дворах, вдоль автомобильных дорог. Встречаются как чисто тополиные посадки, так и в смешении с другими древесно-кустарниковыми растениями. В связи с большим количеством пуха, который

является бичом города в летнее время, со старением деревьев, их интенсивным ростом в городе производится массовая обрезка деревьев [1, 2]. Тополь достаточно часто используется как вид-индикатор для оценки здоровья среды города, но в работах не указывается, для обрезанных или необрезанных деревьев рассчитывается интегральный показатель флуктуирующей асимметрии (ФА) [3]. Так как в г. Красноярске присутствует большое количество тополей, подвергшихся обрезке, было интересно оценить стабильность их развития, используя метод флуктуирующей асимметрии.

Цель исследования

Оценить жизненное состояние в городской среде тополя бальзамического (*Populus balsamifera*), подвергавшегося обрезке.

Материалы и методы исследования

В качестве пробной площади был выбран остров Татышев, расположенный на реке Енисей в черте г. Красноярска. Его протяжённость составляет около 6 км вдоль течения реки и 1,5 км поперек. На острове присутствует большое количество обрезанных и необрезанных тополей, произрастающих в одинаковых условиях, что позволяет провести сравнительный анализ стабильности их развития. Для исследования была взята центральная часть острова.

Предварительная, визуальная оценка жизненного состояния бальзамических тополей с обрезанной и необрезанной кроной проводилась с помощью шкалы категорий состояния деревьев, приведенной в Санитарных правилах в лесах РФ (2011 г.) [4].

Для оценки взаимосвязи состояния деревьев с их морфометрическими показателями использовали метод флуктуирующей асимметрии. Было исследовано 30 случайно выбранных одновозрастных деревьев, подвергшихся обрезке 3 года назад. С каждого дерева было собрано по 10 листьев, пригодных для анализа, на высоте 180–200 см. Листья собирались по кругу. Так же определение ФА было проведено для 30 необрезанных деревьев.

Для каждого листа определяли по пять билатеральных признаков: 1 – ширина половины листа; 2 – длина второй жилки; 3 – расстояние между первой и второй жилкой в центральной части листа; 4 – расстояние между первой и второй жилкой на периферии листа; 5 – угол между главной и второй жилкой. Измерения проводились в период, когда завершается интенсивный рост листьев [5].

Флуктуирующая асимметрия (ФА) рассчитывалась по формуле

$$ФА = \frac{1}{n * m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left| \frac{L_{nij} - L_{n\bar{j}}}{L_{nij} + L_{n\bar{j}}} \right|, \quad (1)$$

где L_{nij} и $L_{n\bar{j}}$ соответственно левый и правый признак $-j$, исследуемого объекта $-i$.

Для оценки характера асимметрии используемых метрических билатеральных признаков, использовали статистические методы анализа. Для определения характера распределения признаков и их разности использовали критерий Колмогорова – Смирнова (К-С),

описательная статистика, графические методы. Для выявления направленной асимметрии использовали F-тест и двухвыборочный t тест с одинаковыми дисперсиями для величин признаков с правой и левой стороны листа.

Обработка результатов проводилась при помощи пакета анализа «Статистика Version10».

Результаты исследования и их обсуждение

Визуальная оценка жизненного состояния бальзамических тополей показала, что 27 из 30 обрезанных тополей (90%) не имеют видимых признаков ослабления, а оставшиеся 3 дерева (10%) можно отнести к ослабленным. Из 30 тополей, не подвергавшихся обрезке, 25 (83,3%) не имеют видимых признаков ослабления, а (16,7%) можно отнести к ослабленным.

Элементом фенотипической изменчивости, например, тополя, является флуктуирующая асимметрия (ФА) листовой пластины. Основными критериями ФА являются ее независимость и случайность, поэтому она не должна иметь четко выраженной направленности. Другими словами одна половинка листа должна изменяться независимо от второй. В связи с этим необходимо выявить характер асимметрии, то есть исключить такие ее виды, как направленная асимметрия (НА) и антисимметрия (АС), для этого необходимо оценить характер распределения, используемых билатеральных признаков и отсутствие достоверных различий между их значениями справа и слева.

Для исключения АС необходимо оценить нормальность распределения, используемых признаков. Проверку распределения используемых билатеральных признаков проводили, используя К-С при $D > 0,08$ и $p < 0,05$ распределение отличается от нормального. При идеальном нормальном распределении величины асимметрии и эксцесса должны равняться 0, а значение медианы (Me) и среднего совпадать. В нашем случае распределение можно отнести к нормальному, если величина асимметрии (А) не превышает 0,25, а эксцесса (Е) – 2,59 (для выборки объемом $n = 300$ и уровня значимости $p = 0,05$).

Характер распределения значений ширины листовой пластины слева и справа и их разности для обрезанных тополей представлен на рис. 1.

Характер распределения для значений левой, правой половины практически одинаков (рис. 1, а). По величине критерия К-С $D = 0,064$, $p < 0,2$. Для ширины листовой пластины слева значения $A = -0,17$,

$E = 0,11$, среднее значение признака $X_{\text{ср,л}} = (62,9 \pm 0,40)$ мм, медиана $Me = 64$ мм; для распределения ширины листовой пластинки справа – $A = -0,21$, $E = 0,40$, $X_{\text{ср,пр}} = (62,9 \pm 0,39)$ мм, $Me = 64$ мм. Таким образом, распределение значений ширины листовой пластины слева и справа можно считать нормальным островершинным с незначительной левой асимметрией. Распределение разности между шириной листовой пластины слева и справа (рис. 1, б) подтверждает флуктуирующий характер изменения признака, так как также подчиняется нормальному значению, со средним значением $X_{\text{ср}} = (0 \pm 0,11)$ мм, $Me = 0$ ($A = -0,04$, $E = 1,1$, $D = 0,07$, $p < 0,11$).

Распределение значений второго признака – длина второй жилки и ее разности с левой и правой сторон листовой пластины

для обрезанных тополей представлено на рис. 2.

Для длины второй жилки листьев значения слева $A = -0,17$, $E = 1,05$, $K-C D = 0,077$, $p < 0,11$; справа – $A = -0,14$, $E = 1,35$; $K-C D = 0,078$; $p < 0,1$, то есть оба распределения данного признака также можно отнести к нормальному закону распределения. Среднее значение длины второй жилки с правой стороны листовой пластинки $X_{\text{ср,пр}} = (74,3 \pm 0,40)$ мм, $Me = 75$, для левой – $X_{\text{ср,л}} = (74,2 \pm 0,43)$ мм, $Me = 75$. Распределение разности длины второй жилки листьев слева и справа (рис. 1, б) подтверждает флуктуирующий характер изменения признака, так как подчиняется нормальному значению, со средним значением близким к 0 $X_{\text{ср}} = (0,08 \pm 0,23)$ мм, $Me = 0$ ($A = -0,10$, $E = 0,66$, $D = 0,072$, $p < 0,10$).

а)

б)

Рис. 1. Распределение значений ширины листовой пластины (а) и разности между шириной слева и справа (б)

а)

б)

Рис. 2. Распределение значений длины второй жилки листовой пластины (а), и значений ее разности слева и справа (б)

а)

б)

Рис. 3. Распределение значений расстояния между первой и второй жилкой в центральной части листа (а) и их разности (б)

а)

б)

Рис. 4. Распределение значений четвертого признака – расстояние между первой и второй жилкой на периферии листа (а) и разности слева и справа (б)

Распределение значений третьего признака – расстояние между первой и второй жилкой в центральной части листа и разницей ее значений представлено на рис. 3.

Для расстояний между первой и второй жилкой в центральной части листа значения слева $A = -0,23$, $E = 0,62$, $K-C D = 0,0697$, $p < 0,15$; справа – $A = -0,40$, $E = 0,42$, $K-C D = 0,076$; $p < 0,11$; данный признак так же, как и предыдущие, можно считать нормально распределенным. Среднее значение расстояний между первой и второй жилкой в центральной части листа с правой стороны листовой пластинки $X_{ср,п} = (21,6 \pm 0,33)$ мм, $Me = 22$ с левой – $X_{ср,л} = (21,6,2 \pm 0,34)$ мм, $Me = 22$. Распределение разности между

первой и второй жилкой в центральной части листа с левой и правой стороны листа (рис. 1, б), подтверждает флуктуирующий характер изменения признака, так как подчиняется нормальному значению, со средним значением $X_{ср} = (0,10 \pm 0,19)$ мм, $Me = 0$ мм ($A = -0,25$, $E = 2,06$, $D = 0,077$, $p < 0,10$).

Распределение значений четвертого признака – расстояние между первой и второй жилкой на периферии листа и разности значений слева и справа для тополей, подвергавшихся обрезке, представлены на рис. 4.

По величинам асимметрии и абсциссы распределение четвертого признака наиболее близко к нормальному по сравне-

нию со всеми ранее проанализированными признаками. Для значений признака слева $A = 0,03$, $E = 0,06$, К-С $D = 0,06$, $p < 0,15$; справа $A = 0,008$, $E = 0,52$, К-С $D = 0,0697$, $p < 0,15$. При этом можно отметить, что для значений признака слева и справа характерно повышенное рассеивание больших переменных, то есть в данном распределении присутствует незначительная правая асимметрия. Среднее значение расстояний между первой и второй жилкой на периферии листа с правой стороны листовой пластинки $X_{\text{сп,пр}} = (24,4 \pm 0,36)$ мм, $Me = 25$ мм, с левой – $X_{\text{сп,л}} = (24,2 \pm 0,38)$ мм, $Me = 24$ мм, а сами распределения соответствуют нормальному закону. Распределение разности между первой и второй жилкой на периферии листа с левой и правой стороны листа (рис. 1, б), также подчиняется нормальному распределению со средним значением $X_{\text{р}} = (0,16 \pm 0,03)$ мм и $Me = 0$ ($A = -0,26$, $E = 2,75$, $D = 0,076$, $p < 0,10$).

Распределение значений пятого признака – угол между главной и второй жилкой и разности его значений слева и справа для обрезанных тополей приведено на рис. 5.

Для распределении значений угла между главной и второй жилкой листовой пластинки значения показателей распределения равны слева $A = -0,21$, $E = -0,99$, К-С $D = 0,080$, $p < 0,05$; справа – $A = -0,26$, $E = -0,14$, К-С $D = 0,087$, $p < 0,05$. Среднее значение угла между главной и второй жилкой с правой стороны листовой пластинки $X_{\text{сп,пр}} = (59,8 \pm 0,23)^0$, $Me = 60^0$ с левой –

$X_{\text{сп,л}} = (59,8 \pm 0,32)^0$, $Me = 60^0$. По критерию согласия К-С оба распределения данного признака нельзя отнести к нормальному закону распределения, при этом по величине эксцесса, асимметрии, равенстве моды, медианы и среднего значения распределение можно считать нормальным. Распределение разности значений угла слева и справа (рис. 1, б) подчиняется нормальному, со средним значением $X_{\text{р}} = (0,02 \pm 0,03)^0$, $Me = 0^0$ ($A = 0,26$, $E = 2,7$, $D = 0,076$, $p < 0,10$).

Проведенный анализ показал, что для четырех исследуемых признаков можно исключить антисимметрию, на основании статистических критериев К-С, значений асимметрии, эксцесса и совпадения средних значений с медианами распределений. Для всех признаков с левой и правой стороны листовой пластины наблюдается слабая левая асимметрия и островершинное нормальное распределение. Исключением является пятый признак – угол между главной и второй жилкой, распределение величин которого можно отнести к нормальному с определенными допущениями. Распределение разности значений всех признаков с левой и правой стороны листа подтверждает флуктуирующий характер их изменения.

Для выявления наличия или отсутствия направленной асимметрии использовали F-тест на равенство дисперсий двух выборок величин признака с правой и левой стороны листа. Результаты проведенного анализа представлены в таблице.

а)

б)

Рис. 5. Распределение значений пятого признака – угол между главной и второй жилкой (а) и разность значений слева и справа (б)

Результаты F-теста и t теста на равенство дисперсий двух выборок величин признака с правой и левой стороны листа при уровне значимости $p < 0,05$

Признак	$F_{ст}$	$F_{кр}$	p	$t_{ст}$	$t_{кр}$	$t_{кр}$ -одностороннее
ширина половины листа	1,01	1,21	0,20	0	1,96	0,5
длина второй жилки	1,12	1,21	0,15	0,14	1,96	0,44
расстояние между первой и второй жилкой в центральной части листа	1,02	1,21	0,42	0,21	1,96	0,42
расстояние между первой и второй жилкой на периферии листа	1,09	1,21	0,21	0,3	1,96	0,39
угол между главной и второй жилкой	1,86	1,21	$4,1 \cdot 10^{-8}$	0,05	1,96	0,49

Для четырех метрических билатеральных признаков: ширина половины листа; длина второй жилки; расстояние между первой и второй жилкой в центральной части листа; расстояние между первой и второй жилкой на периферии листа; значение критерия Фишера, найденное экспериментальным путем $F_{ст}$ меньше критического значения $F_{кр}$ при уровне значимости $p < 0,05$ (таблица). То есть отклонения с правой и левой стороны листовой пластины для каждого признака относятся к одной выборочной совокупности, то же самое подтверждает и двухвыборочный t-тест с одинаковыми дисперсиями. Для выборочных совокупностей значений угла между главной и второй жилкой с левой и правой части листовой пластины значение $F_{кр}$ меньше критерия Фишера, найденного экспериментальным путем при уровне значимости $p < 0,05$ (таблица), то есть нельзя говорить о равенстве дисперсий двух совокупностей. В связи с этим использовали двухвыборочный t-тест с одинаковыми дисперсиями, который позволил подтвердить случайный характер изменений значений угла между главной и второй жилкой с левой и правой стороны листовой пластины, так как $t_{кр}$ -одностороннее $< t_{кр}$ (таблица). Проведенный статистический анализ метрических билатеральных признаков позволил исключить наличие НА для листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera*), подвергнувшегося обрезке.

Заключение

Исследование пяти билатеральных признаков листьев тополей подвергнувшихся обрезке позволило для четырех из них исключить направленную асимметрию (НА) и антисимметрию (АС) и подтвердить флуктуирующий характер их вариаций. Из расчетов был исключен пятый при-

знак – угол между главной и второй жилкой, так как его распределение отличается от нормального.

Рассчитанный средний интегральный показатель флуктуирующей асимметрии листьев 30 тополей, не подвергнувшихся обрезке $FA_{необр} = (0,0373 \pm 0,002)$, что соответствует 1 баллу шкалы оценки состояния видов-индикаторов по величине отклонений от симметрии. Для 30 тополей, подвергнувшихся обрезке, $FA_{об} = (0,038 \pm 0,002)$ тоже соответствует 1 баллу по этой шкале ($FA < 0,055$) [5, 6] и позволяет оценить состояние тополей произрастающих на острове Татышев как условно нормальное, что так же подтверждает их визуальная оценка. Достоверных различий между полученными значениями, интегрального показателя для деревьев, подвергнувшихся и не подвергнувшихся обрезке, нет. Таким образом, обрезка тополей не отразилась на стабильности их развития, и обрезанные тополя можно использовать в качестве вида – индикатора здоровья окружающей среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РГНФ № 16-12-24023 «Методология моделирования и прогнозирования сценариев развития «зеленой экономики» и биоэкономики регионов в условиях активного хозяйственного освоения ресурсов Арктической зоны».

Список литературы

1. Нефедова Е.В. Исследование экологического состояния деревьев в результате обрезки в городе Новотроицке // Е.В. Нефедова, Т.С. Деулина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2016. – Т. 1, № 1. – С. 225–227.
2. Кружилин С.Н. Экологически обоснованные мероприятия по формированию габитуса тополевых насаждений в условиях урбандошадтов нижнего Дона / С.Н. Кружилин, С.С. Таран // Наука, мысль. – 2014. – № 1. – С. 84–86.
3. Коротченко И.С. Влияние теплоэнергетического комплекса г. Красноярска на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластины тополя бальзамического

го / И.С. Коротченко // Вестник КрасГАУ. – 2015. – № 8. – С. 15–20.

4. Лесоустроительная инструкция [Текст]: Приказ Рослехоза от 12.12.2011 № 516 // Зарегистрирована в Минюсте РФ 06.03.2012 № 23413. – 76 с.

5. Здоровье среды: практика оценки / В.М. Захаров, А.Т. Чубинишвили, С.Г. Дмитриев и др. – М.: Центр экологической политики России, 2006. – 68 с.

6. Рунова Е.М., Гнатович П.С. Экологическая оценка рекреационных зон города Братска методом флуктуирующей асимметрии березы повислой / Е.М. Рунова, П.С. Гнатович // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11. – С. 223–227.

References

1. Nefedova E.V. Issledovanie jekologicheskogo sostojanija derevev v rezultate obrezki v gorode Novotroicke // E.V. Nefedova, T.S. Deulina // Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tehniki i obrazovanija. Magnitogorsk: Magnitogorskij

gosudarstvennyj tehničeskij universitet im. G.I. Nosova, 2016. T. 1, no. 1. pp. 225–227.

2. Kruzhilin S.N. Jekologičeski obosnovannye mero-prijatija po formirovaniju gabitusa topolevyh nasazhdenij v uslovijah urbolandshaftov nizhnego Dona / S.N. Kruzhilin, S.S. Taran // Nauka, mysl. 2014. no. 1. pp. 84–86.

3. Korotchenko I.S. Vlijanie teplojenergetičeskogo kompleksa g. Krasnojarska na veličinu fluktuirujushhej asimmetrii listovoj plastiny topolja balzamicheskogo / I.S. Korotchenko // Vestnik KrasGAU. 2015. no. 8. pp. 15–20.

4. Lesoustroitel'naja instrukcija [Tekst]: Prikaz Roslehoza ot 12.12.2011 no. 516 // Zaregistrirrovana v Minjuste RF 06.03.2012 no. 23413. 76 p.

5. Zdorove sredy: praktika ocenki / V.M. Zaharov, A.T. Chubinishvili, S.G. Dmitriev i dr. M.: Centr jekologičeskij politiki Rossii, 2006. 68 p.

6. Runova E.M., Gnatovich P.S. Jekologičeskaja ocenka rekreacionnyh zon goroda Bratska metodom fluktuirujushhej asimmetrii berezy povisloj / E.M. Runova, P.S. Gnatovich // Fundamentalnye issledovanija. 2013. no. 11. pp. 223–227.