

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКРЕАЦИОННЫХ ЗОН МЕТОДОМ ФЛУКТУИРУЮЩЕЙ АСИММЕТРИИ ЛИСТЬЕВ *Betula pendula* Roth.

Представлены результаты оценки стабильности развития *Betula pendula* Roth. методом флуктуирующей асимметрии листьев в условиях рекреации высокогорного Усть-Коксинского административного района Республики Алтай. Компонентный анализ, помимо четких отличий между выборками, выявил направленный рост показателей асимметрии листа *Betula pendula* по мере возрастания рекреационной нагрузки на популяцию. Балльная оценка качества среды в рекреационных зонах Усть-Коксинского района показала зависимость величины флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* от степени рекреационной нагрузки.

Ключевые слова: стабильность развития; флуктуирующая асимметрия листьев; береза повислая; Республика Алтай; рекреация.

Введение

В настоящее время все шире используются возможности измерения флуктуирующей асимметрии как морфогенетической меры нарушения стабильности развития, как результата неспособности организма развиваться по точно определенным путям [1–4]. Под флуктуирующей асимметрией (ФА) понимают ненаследуемые мелкие ненаправленные отклонения от строгой билатеральной симметрии [5]. В качестве тест-объекта может быть выбран любой вид, для которого характерна билатеральная симметрия [6].

На макроскопическом уровне ФА предложено использовать в качестве меры в оценке стабильности развития организма [7]. Уровень морфогенетических отклонений (т.е. ФА) от нормы оказывается минимальным лишь при определенных (оптимальных) условиях среды и неспецифически возрастает при любых стрессовых воздействиях [8]. Стабильность развития, оцениваемая по уровню ФА, – чувствительный индикатор состояния природных популяций, что явилось основанием для утверждения Министерством природных ресурсов РФ этой методики в качестве нормативной [9]. Оценка величины ФА лежит и в основе методологии характеристики качества среды обитания, получившей название «методология оценки здоровья среды» [7].

Оценка качества среды становится принципиально важной задачей как при планировании, так и при осуществлении любых мероприятий по природопользованию, охране природы и обеспечению экологической безопасности. Одним из перспективных подходов для интегральной характеристики качества среды является оценка состояния живых организмов по стабильности развития, которая характеризуется уровнем флуктуирующей асимметрии морфологических структур.

Цель работы – оценить экологическое состояние рекреационных зон Усть-Коксинского района Республики Алтай методом флуктуирующей асимметрии листьев *B. pendula* Roth.

Материалы и методики исследований. Район исследований

Объект исследования: Береза повислая – *Betula pendula* Roth.

Сбор материала проводился после остановки роста листьев, в августе 2010 г. С каждой зоны было взято по

100 листьев (по 10 образцов с 10 деревьев). Всего было собрано 300 листьев. Сбор листьев проводили, основываясь на методике В.М. Захарова [7]. При сборе материала, добываясь приблизительной однородности образцов, были соблюдены одинаковые условия сбора листьев: одиночные деревья в возрасте 20–50 лет, произрастающие в одинаковых экологических условиях; листья были собраны с нижней части кроны с южной стороны; все листья с одной территории упаковывались в полиэтиленовый пакет, в него также помещали этикетку с названием места сбора.

Методы обработки. Методика определения стабильности развития *B. pendula* по величине флуктуирующей асимметрии листовых пластинок основана на системе промеров листа. Для этого используются признаки, характеризующие общие морфологические особенности листа, удобные для учета и однозначной оценки [7]. При этом на каждой листовой пластинке выполняли по 5 измерений с левой и правой стороны листа (рис. 1).

Измерения проводились в миллиметрах (пункты 1–4) и градусах (пункт 5): 1 – ширина (измеряется по середине листовой пластинки); 2 – длина второй жилки второго порядка; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 – расстояние между внешними концами этих же жилок; 5 – угол между главной и второй жилкой второго порядка. Листья сканировали на фоне миллиметровой бумаги, изображения измеряли в компьютерной программе MapInfo [11]. Для каждой листовой пластинки брали промеры 5 стандартных метрических билатеральных признаков [7]. Угол между жилками измерялся с помощью транспортира.

Для каждого пластического признака величина асимметрии рассчитывается как различие в промерах слева и справа. Следуя методике С.И. Марченко [12], было произведено 1 000 измерений для каждого пункта отбора проб (5 мерных признаков × 2 стороны листа × 10 листьев с каждого дерева × 10 деревьев).

Статистическая обработка. Для статистической обработки применен метод многомерного анализа: метод главных компонент и метод оценки стабильности развития по каждому признаку [13].

Метод оценки стабильности развития по каждому признаку сводится к оценке асимметрии. Для пластического признака величина асимметрии у особи рассчитывается как различие в промерах слева и справа, отнесенное к сумме промеров на двух сторонах. Использование

такой относительной величины необходимо для того, чтобы нивелировать зависимость величины асимметрии от величины самого признака. Популяционная

оценка выражается средней арифметической этой величины. Статистическая значимость различий между выборками определяется по t-критерию Стьюдента.

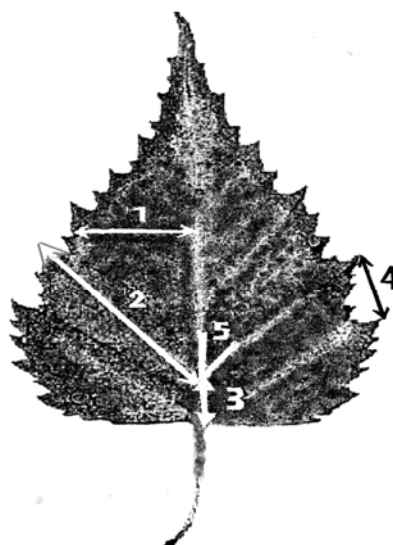


Рис. 1. Промеры левой (L) и правой (R) сторон листа *Betula pendula* (по В.М. Захарову, 2000): 1 – ширина левой и правой половинок листа (от границы центральной жилки до края листа); 2 – длина жилки второго порядка, второй от основания листа; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 – расстояние между концами этих же жилок; 5 – угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка

При анализе комплекса морфологических признаков лучше использовать интегральные показатели стабильности развития. Расчет интегрального показателя производили по методике В.М. Захарова [7]:

1) для каждого промеренного листа вычисляли относительные величины асимметрии для каждого признака, для этого разность между промерами слева (L) и справа (R) делили на сумму этих же промеров: $(L-R) / (L+R)$;

2) вычисляли показатель асимметрии для каждого листа, для этого суммировали значения относительных величин асимметрии по каждому признаку и делили на число признаков;

3) вычисляли интегральный показатель стабильности развития – величина среднего относительного различия между сторонами на признак, для этого вычисляли среднюю арифметическую всех величин асимметрии (для каждого из десяти деревьев);

4) находили значение, являющееся средним арифметическим для всего района.

Для оценки качества среды использовали пятибалльную шкалу степени нарушения стабильности развития березы повислой, разработанную В.М. Захаровым и др. (табл. 1).

Район исследований. Усть-Коксинский административный район расположен в юго-западной части Республики Алтай на границе с Казахстаном. Он занимает площадь 12 958 км², протягиваясь с запада на восток на 160 км, а с юга на север – на 150 км.

Высокогорный район испытывает настоящий «туристский бум». Известно, что в условиях гор экосистемы являются особенно уязвимыми. Рекреационное освоение территорий предполагает негативное воздействие на природные ландшафты, в том числе и на состояние растений.

Таблица 1

Балльная шкала оценки качества среды по величине флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* (по В.М. Захарову, 2000)

Балл	Качество среды	ФА
I	Условно нормальное	< 0,040
II	Начальные (незначительные) отклонения от нормы	0,040–0,044
III	Средний уровень отклонений от нормы	0,045–0,049
IV	Существенные (значительные) отклонения от нормы	0,050–0,054
V	Критическое состояние	> 0,054

Места сбора материала. Оценка проводится на модельных площадях Усть-Коксинского района в трех различных по степени рекреационной нагрузки зонах. По классификации Ю.А. Лукьяновой [10], зоны под-

разделяются следующим образом: ЗЗ – заповедная зона (слабая); ЗР – зона регулируемого туризма (средняя); ЗО – зона обслуживания посетителей (сильная) (рис. 2).

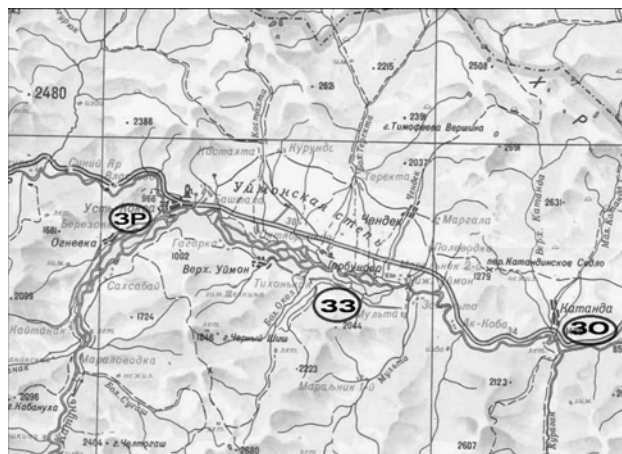


Рис. 2. Зоны с различной степенью рекреационной нагрузки
Усть-Коксинского района Республики Алтай

Заповедная зона (контроль – слабый уровень рекреационной нагрузки), где запрещены все виды хозяйственной и рекреационной деятельности, соблюдается полное невмешательство в ход природных процессов. Участок расположен в разнотравном березняке. Имеется подрост из ели обыкновенной (*Picea obovata* L.), березы повислой и ерники – кустарниковые заросли из ивы (*Salix* sp.), курильского чая (*Pentaphylloides fruticosa* L.), малины обыкновенной (*Rubus idaeu* L.).

Зона регулируемого туризма (средний уровень рекреационной нагрузки) – предназначена для организации туризма и отдыха в природных условиях, экологического просвещения. На территории зоны разрешается благоустройство территории, а также деятельность по осуществлению регулируемого туризма и отдыха. Исследуемый участок расположен в разнотравном березняке. Имеется подрост из ели, подлесок из жимолости (*Lonicera* sp.). В сложении травяного покрова участвуют следующие виды: земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), вероника длиннолистная (*Veronica longifolia* L.), черноголовка обыкновенная (*Prunella vulgaris* L.), горошек лесной (*Vicia sylvatica* L.), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.).

Зона обслуживания посетителей (сильный уровень рекреационной нагрузки) предусматривает строительство стационарных объектов туристского сервиса, необходимых объектов информационного обслуживания, оборудование подъездных путей, информационных площадок. Исследуемый участок расположен в березняке разнотравно-злаковом. Травяной покров слагают следующие виды: пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), мятлик узколистный (*Poa angustifolia* L.), подмаренник настоящий (*Galium verum* L.), будра плющевидная (*Glechoma hederacea* L.), гвоздика травяная (*Dianthus deltoids* L.), дрема белая (*Melandrium album* (Mill.) Garcke.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), виды родов клевера (*Trifolium* sp.), горошек заборный (*Vicia sepium* L.).

Результаты исследований и обсуждение

Для более целостного представления о характере межпопуляционных дистанций и уровне асимметрии листа *B. pendula* модельные выборки рассмотрены в пространстве главных компонент. Метод главных ком-

понент позволяет исследовать и визуализировать внутреннюю структуру изменчивости некоторой совокупности объектов, определяемую их природой [13]. Данный метод нашел широкое применение при изучении морфологии различных групп животных и растений [14–15]. Метод главных компонент позволяет на основе небольшого числа параметров (главных компонент) описать значительную часть изменчивости исходных признаков. Первые несколько (обычно три-четыре) компоненты отражают свыше 70–90% совокупной изменчивости [16]. При этом первая главная компонента представляет собой координатную ось, которая проходит в направлении максимальной дисперсии исходных признаков, ось второй главной компоненты ортогональна первой, и дисперсия вдоль этой компоненты – максимальная из оставшейся. Аналогично определяются последующие компоненты. При проекции исследуемых объектов на плоскость, образованную главными компонентами, можно оценивать морфометрические дистанции между реально существующими совокупностями особей. Содержательная интерпретация компонент выполняется на основе оценки величины вклада признаков в компоненту [17].

Для более целостного представления о характере межпопуляционных дистанций и уровне асимметрии листа *B. pendula* модельные выборки нами рассмотрены в пространстве главных компонент (рис. 3).

Наши исследования показали, что все исходные признаки вносят в первую главную компоненту положительный вклад, следовательно, ее можно рассматривать как переменную, отражающую отличия в линейных (абсолютных) размерах листа. В данном случае первая компонента снимает 39,38% дисперсии. Вдоль оси первой компоненты четко прослеживаются отличия между выборками из заповедной зоны и зоны регулируемого туризма от зоны обслуживания посетителей (рис. 4). В связи с этим вполне логично считать, что увеличение антропогенной нагрузки на популяцию, вероятно, приводит к угнетающим эффектам ростовых процессов в жизни растений.

Следует отметить, что для листа *B. pendula* свойственна определенная асимметрия. Во всех исследованных случаях это проявляется в несколько более крупных размерах правой половины относительно левой (рис. 4), что,

по-видимому, является одной из биологических особенностей модельного вида. При этом обращает на себя внимание направленное увеличение асимметрии листа по

мере возрастания антропогенной нагрузки на популяцию. В пользу этого говорит тренд к увеличению расстояния между соответствующими центроидами выборок.

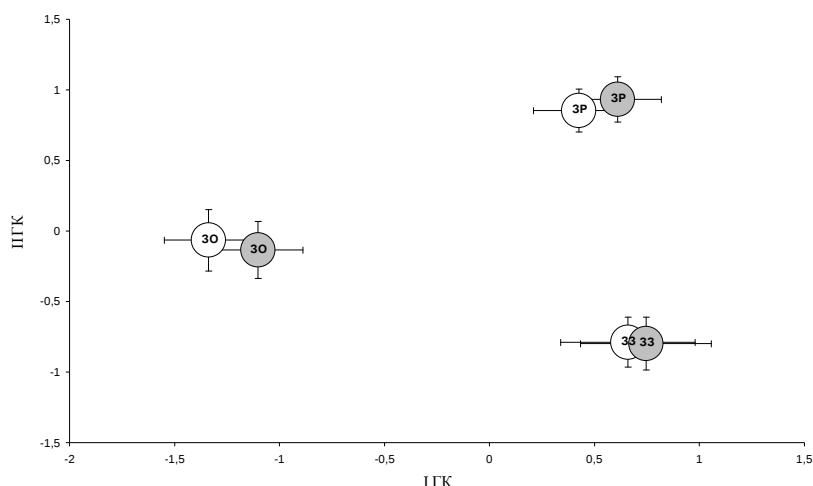


Рис. 3. Распределение центроидов *Betula pendula* в пространстве I и II главных компонент. Серым цветом показаны выборки правой половины листа, белым – левой

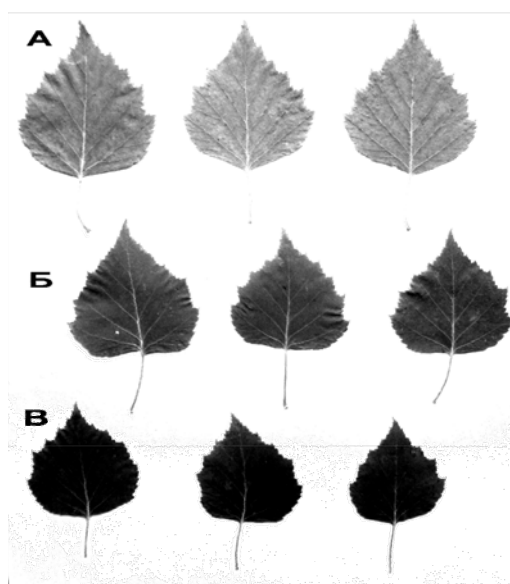


Рис. 4. Внешний облик листьев *Betula pendula* из трех модельных выборок: А – из заповедной зоны; Б – из зоны регулируемого туризма; В – из зоны обслуживания посетителей

Вторая главная компонента описывает 25,5% от общей дисперсии, вдоль вектора ее значений выражены отчетливые отличия между представленными выборками. В заповедной зоне жилки на листьях березы несколько удалены друг от друга в сравнении с другими популяциями.

Растения, собранные на участке с регулируемым контролем имеют больший угол, образованный главной осью и первой от основания жилкой листа (табл. 2).

В целом компонентный анализ, помимо четких отличий между выборками, выявил направленный рост

показателей асимметрии листа *B. pendula* по мере возрастания антропогенной нагрузки на популяцию.

Для определения параметра, вносящего наибольшую долю в асимметрию листа, построены точечные диаграммы распределения модельных объектов вдоль областей значений правой и левой половин листа. Предметный их анализ показал, что основной вклад в их несоответствие вносит расстояние между жилками, в то время как по остальным признакам листа асимметрия проявляется в меньшей степени.

Таблица 2

Вклады признаков в главные компоненты (*1000)

Признак	I ГК	II ГК
1 – ширина листовой пластинки	896	-061
2 – длина второй жилки второго порядка	912	-053
3 – расстояние между основаниями первой и второй жилками второго порядка	205	-793
4 – расстояние между внешними концами этих же жилок	814	224
5 – угол между главной и второй жилками второго порядка	104	808

Результаты многомерного анализа находят во многом свое отражение при рассмотрении изменчивости природных популяций *B. pendula* с позиции подходов флуктуирующей асимметрии.

Наши данные были проанализированы в соответствии с балльной шкалой [7] отклонений состояния

организма от условий нормы по величине интегрального показателя стабильности развития для *B. pendula* (табл. 3).

Минимальное значение коэффициента флуктуирующей асимметрии, соответствующее первому баллу по шкале, зафиксировано в заповедной зоне.

Т а б л и ц а 3

Оценка качества среды Усть-Коксинского района в трех зонах по величине флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* (по балльной шкале М.В. Захарова, 2000)

Зона	ФА	Балл
Заповедная зона	0,027	I
Зона регулируемого туризма	0,041	II
Зона обслуживания посетителей	0,055	V

Эта выборка растений – из благоприятных условий произрастания. За ней следует зона регулируемого туризма со вторым баллом степени ФА, т.е. наблюдаются незначительные отклонения от нормы. Наиболее высокие значения ФА отмечены в зоне обслуживания посетителей, интегральный показатель соответствует пятому баллу, это говорит о критическом состоянии среды.

По-видимому, наиболее значимыми факторами, воздействующими на исследуемую территорию, являются строительство турбазы, безответственный отдых (как приезжих туристов, так и местных жителей) и автотранспорт.

Выводы:

1. Рекреационная нагрузка Усть-Коксинского района распределена неравномерно: имеются зоны со

слабой (заповедная зона), средней (зона регулируемого туризма) и сильной (зона обслуживания посетителей) нагрузкой.

2. Компонентный анализ, помимо четких отличий между выборками, выявил направленный рост показателей асимметрии листа *Betula pendula* по мере возрастания антропогенной нагрузки на популяцию.

3. Установлено, что основной вклад в асимметрию листа *Betula pendula* вносит элемент «расстояние между жилками», который является наиболее информативным в биоиндикации рекреационной территории.

4. Балльная оценка качества среды в рекреационных зонах Усть-Коксинского района показала зависимость величины флуктуирующей асимметрии листа *Betula pendula* от степени рекреационной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Valkama J., Kozlov M. Impact of climatic factors on the developmental stability of mountain birch growing in a contaminated area // Journal of Applied Ecology. 2001. № 3. P. 665–673.
2. Солдатова В.Ю. Флуктуирующая асимметрия березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) как критерий качества городской среды и территорий, подверженных антропогенному воздействию (на примере Якутии) : дис. ... канд. биол. наук. Якутск, 2006. 139 с.
3. Klingenberg C.P., Barluenga M., Meyer A. Shape analysis of symmetric structures: quantifying variation among individuals and asymmetry // Evolution. 2002. № 56 (10). P. 1909–1920.
4. Баранов С.Г. Изучение признаков для оценки флуктуирующей асимметрии листовой пластины липы мелколистной // Фундаментальные медико-биологические науки и практическое здравоохранение : сб. науч. тр. 1-й Междунар. телеконференции. Томск, 2010. С. 43–46.
5. Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Захаров В.М. Анализ стабильности развития березы повислой в условиях химического загрязнения // Экология. 1996. № 6. С. 441–444.
6. Дружнина Т.А., Лебедев Л.В. Исследование биоиндикационных свойств древесных пород в городской среде М. : Наука, 2010. С. 42.
7. Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И. и др. Здоровье среды: методика оценки. М. : Центр экологической политики России, 2000. 318 с.
8. Макеева Л.П. Биоиндикационная оценка качества среды на территории г. Мирного по показателю нарушения стабильности развития березы плосколистной. М. : Наука, 2010. С. 53.
9. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур) // Распоряжение Росэкология от 16.10.2003 № 460. М. : Наука, 2003. 24 с.
10. Лукьянова Ю.А. Динамика растительного покрова сосновых ценозов национального парка «Нижняя Кама» в условиях дифференцированного режима охраны: рекреационный аспект : сб. науч. трудов по итогам Междунар. науч.-техн. конф. Брянск : БГТИА, 2007. Вып. 19. С. 123–128.
11. Коросов А.В. Специальные методы биометрии. Петрозаводск : ПГУ, 2007. С. 91–105.
12. Марченко С.И. Методика определения величины асимметрии площадей половинок листьев с использованием компьютерных технологий. Брянск : БГИТА, 2008. С. 9–18.
13. Ефимов В.М., Ковалева В.Ю. Многомерный анализ биологических данных : учеб. пособие. 2-е изд., испр. и доп. СПб., 2008. 86 с.
14. Березина О.Г., Мордович В.Г. Опыт морфологической классификации привидных жуков (Insecta, Coleoptera) // Сибирский экологический журнал. 2000. № 3. С. 271–277.
15. Венгеров П.Д. Экологические закономерности изменчивости и корреляции морфологических структур птиц. Воронеж : ВГУ, 2001. 248 с.
16. Животовский Л.А. Популяционная биометрия. М. : Наука, 1991. 71 с.
17. Васильев А.Г., Фалеев В.И., Галактионов Ю.К. и др. Реализация морфологического разнообразия в природных популяциях млекопитающих. Новосибирск : Наука, 2004. 92 с.

Статья представлена научной редакцией «Биология» 5 декабря 2012 г.