

Ю.А. Штирц, Д.В. Сыщиков, И.В. Агурова

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЧВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛИСТОВОЙ ПЛАСТИНКИ *POLYGONUM MONSPELIENSE* THIÉBAUT EX PERS.

Государственное бюджетное учреждение «Донецкий ботанический сад»

Методами геометрической морфометрии проведена оценка влияния ряда почвенных параметров техногенных территорий на изменчивость листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. в условиях лабораторного выращивания. Согласно результатам корреляционного анализа, из семи анализируемых параметров почв на проявление изменчивости формы листовой пластинки наибольшее влияние оказывает содержание гумуса и нитратного азота, на проявление флуктуирующей асимметрии – гидролитическая кислотность почвы. Не оказывают существенного воздействия на рассматриваемые морфологические параметры листовой пластинки содержание в почве подвижных фосфатов и обменного аммония.

Ключевые слова: почва, техногенная территория, листовая пластинка, геометрическая морфометрия, флуктуирующая асимметрия, направленная асимметрия, *Polygonum monspeliense*, биотестирование, биоиндикация

Цитирование: Штирц Ю.А., Сыщиков Д.В., Агурова И.В. Оценка влияния почвенных параметров техногенных территорий на изменчивость листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. // Промышленная ботаника. 2022. Вып. 22, № 3–4. С. 61–67. DOI: 10.5281/zenodo.7790976

Введение

Наиболее целесообразным методом интегральной оценки почвенных условий является биотестирование, в основе которого лежит определение реакции живых организмов на уровень техногенного воздействия и содержание загрязняющих веществ в субстрате. По мнению ряда авторов, биотестирование дает возможность получать объективную информацию о состоянии почвы при минимальных материальных и физических затратах, без использования сложных и дорогостоящих аналитических методов [2, 7].

Основу метода фитотестирования составляет способность растений реагировать на изменение условий среды, что позволяет оценивать токсичность или биоактивность различных объектов [9, 14]. Чувствительность растений к внешним воздействиям проявляется в изменении био-

химических реакций и отражается на морфологических параметрах роста и развития [8].

Фитотестирование как метод оценки почв используется для определения плодородия сельскохозяйственных, и относительно недавно в природоохранной сфере для оценки экологического качества природных сред (вод, почв). Фитотесты можно объединить в три группы методов: лабораторные, вегетационные и микроделяночные. Особую актуальность в экологической оценке приобретают лабораторные методы как наиболее экспрессные и экономичные [6].

По мнению ряда исследователей, адекватную оценку качества почв дает субстратное, или контактное биотестирование. Этот способ обеспечивает непосредственный контакт тест-организма с исследуемым образцом и, таким обра-

зом, позволяет установить уровень воздействия почвенных характеристик [6, 13–15].

В настоящее время используется диагностика состава почв с использованием морфометрических показателей тест-культур [3–5, 8].

Ввиду вышесказанного является актуальным накопление сведений о влиянии различных почвенных факторов на формирование морфологических признаков растений с позиций возможности использования в целях биоиндикации и биотестирования.

Адаптивные процессы растений, вызванные условиями произрастания, приводят к существенным перестройкам ассимилирующего аппарата, который является высокочувствительным к внешним воздействиям и обладает высокой пластичностью, ввиду чего морфологические изменения листа являются функциональным ответом на факторы окружающей среды [17, 18].

Цель и задачи исследований

Цель работы – анализ влияния почвенных параметров техногенных территорий на изменчивость листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. для оценки возможности использования данных показателей при проведении биомониторинга и биотестирования состояния почв.

Для выполнения поставленной цели предусматривалось решение следующих задач:

- 1) выявление почвенных характеристик, влияющих на изменчивость формы листовой пластинки;
- 2) выявление почвенных характеристик, влияющих на асимметрию листовой пластинки исследуемого вида.

Объекты и методики исследований

В качестве модельного вида для выращивания на почвенных образцах исследуемых участков был выбран *P. monspeliense*: данный вид встречается в самых разнообразных биотопах, что дает возможность использовать его в качестве биоиндикатора состояния почв и экосистем в целом.

В целях оценки возможности фитотестирования состояния почв в лабораторных условиях с использованием показателей формы листовой пластинки проведена посадка экспериментальных растений в образцы почв, отобранных на участках. Высадку *P. monspeliense* осуществляли в емкости из пищевого пластика объе-

мом 460 мл, заполненные образцами почвы. Местами для отбора почвенных образцов послужил ряд территорий с различной степенью антропогенной трансформации в пределах Донецко-Макеевской городской агломерации: выведенный из эксплуатации карьер по добыче строительного камня (балка Калиновая, Горняцкий район, г. Макеевка); склон отвала бывшей шахты № 12–18 «Наклонная» восточной экспозиции (Пролетарский район, г. Донецк); склон отвала шахты им. Ленина южной экспозиции (Горняцкий район, г. Макеевка); зона выполаживания склона южной экспозиции у основания отвала шахты им. Ленина (Горняцкий район, г. Макеевка); территория, прилегающая к реке Богодуховая, загрязненная строительными отходами (Буденновский район, г. Донецк); территория ГБУ «Донецкий ботанический сад»; территория, прилегающая к южной части отвала шахты № 12–18 «Наклонная» (Пролетарский район, г. Донецк).

Отбор образцов проводили в поверхностном слое почвы. Опытные экземпляры растений были пересажены с незначительного по площади локального участка на территории Донецкого ботанического сада, что позволило в определенной степени снизить генетическую разнородность опытных экземпляров. К моменту пересадки исследуемые растения имели 3–5 сформированных листовых пластинок, которые были помечены, в дальнейшем их анализу не подвергали. В одну емкость высаживали по 7–8 растений. Густота посадки соответствовала плотности популяции *P. monspeliense*, из которой были взяты экспериментальные экземпляры. Дальнейший рост растений происходил в лабораторных условиях. Полив осуществляли дистиллированной водой, периодичность полива варьировала в зависимости от степени подсыхания поверхностного слоя. С периодичностью один раз в два дня осуществляли поворот емкостей на 180° вокруг оси с целью более равномерного освещения экспериментальных растений. Учитывая то, что видовой особенностью *P. monspeliense* является значительное отличие листьев, сформировавшихся на побегах первого и второго порядков [10], анализу подвергали листовые пластинки, собранные с побегов первого порядка. Объем каждой из выборок листовых пластинок *P. monspeliense*, выращенных на исследуемых почвенных образцах, составил 150 листьев.

Оценка влияния почвенных параметров на изменчивость листовой пластинки проведена методами геометрической морфометрии с использованием программы SAGE (Symmetry and Asymmetry in Geometric Data) Version 1.21. Детальное описание применяемой методики приведено в ранее опубликованной работе [16]. Проведена оценка влияния на изменчивость листовой пластинки следующих почвенных параметров: содержание подвижных фосфатов, гумуса, обменного аммония, нитратного азота, показатели потенциальной (обменной и гидролитической) кислотности почвы, суммы обменных оснований. Определение потенциальной кислотности и суммы обменных оснований проводили общепринятыми методами [1, 11]. Содержание органического вещества – по методу Тюрина со спектрофотометрическим окончанием по Орлову-Гриндель [11]. Концентрацию аммонийного азота (обменного аммония) определяли колориметрически с реактивом Несслера [11]. Содержание нитратного азота проведено по методу Грандваль-Ляжу [11]. Определение подвижных форм фосфора проводили согласно методу Чирикова [11].

Оценка корреляции морфологических параметров листовой пластинки *P. monspeliense* с поч-

венными характеристиками проведена с использованием коэффициента Пирсона. Предварительно для оценки возможности использования указанного коэффициента корреляции был проведен анализ соответствия распределения исследуемых параметров листовой пластинки и почвенных характеристик закону нормального распределения с использованием критериев Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса, Шапиро-Уилка. Для статистической обработки данных использовали пакет прикладных программ STATISTICA 6.0. Интерпретация результатов проведена в соответствии с методическими подходами, изложенными в работе О. Ю. Ребровой [12]. При оценке силы корреляции использована следующая шкала: слабая корреляция – значение коэффициента корреляции не превышает 0,25, умеренная корреляция – значение коэффициента корреляции составляет более 0,25 и менее 0,75, сильная корреляция – значение коэффициента корреляции составляет не менее 0,75 [12].

Результаты исследований и их обсуждение

Диапазон изменчивости почвенных характеристик исследуемых участков в вегетационный период отражен в таблице 1.

Таблица 1. Диапазон изменчивости почвенных характеристик исследуемых участков в вегетационный период

Почвенный параметр	I	II	III	IV	V	VI	VII
Содержание подвижных фосфатов (мг P ₂ O ₅ /100 г почвы)	24,06–28,67	0,70–1,78	1,85–3,63	1,22–1,97	2,23–3,85	10,81–19,32	10,56–18,45
Содержание гумуса (%)	0,44–0,56	0,23–0,37	0,31–0,45	0,27–0,37	0,60–0,99	1,52–2,21	2,67–3,68
Содержание обменного аммония (мг N-NH ₄ /100 г почвы)	2,76–3,02	1,57–3,18	1,43–1,64	0,97–1,14	1,51–3,76	3,87–4,01	2,75–5,75
Содержание нитратного азота (мг N-NO ₃ /100 г почвы)	0,21–0,47	0,12–0,15	0,19–0,41	0,18–0,43	0,88–1,13	2,08–3,12	1,80–3,30
Обменная кислотность (мг-экв/100 г почвы)	0,050–0,070	1,420–1,510	0,07–0,09	0,07–0,09	0,061–0,063	0,012–0,015	0,010
Гидролитическая кислотность (мг-экв/100 г почвы)	1,03–2,13	10,87–10,94	1,03–1,15	0,83–1,77	1,45–1,57	1,68–1,73	0,84–0,86
Сумма обменных оснований (мг-экв/100 г почвы)	36,20–37,10	7,18–7,36	15,70–17,80	6,40–8,30	27,50–28,40	30,14–31,26	42,70–43,80

Примечание. Цифрами I–VII отмечены места отбора почвенных образцов:

I – выведенный из эксплуатации карьер по добыче строительного камня (балка Калиновая, Горняцкий район, г. Макеевка); II – склон отвала бывшей шахты № 12–18 «Наклонная» восточной экспозиции (Пролетарский район, г. Донецк); III – склон отвала шахты им. Ленина южной экспозиции (Горняцкий район, г. Макеевка); IV – зона выполаживания склона южной экспозиции у основания отвала шахты им. Ленина (Горняцкий район, г. Макеевка); V – территория, прилегающая к реке Богодуховая, загрязненная строительными отходами (Буденновский район, г. Донецк); VI – территория ГБУ «Донецкий ботанический сад»; VII – территория, прилегающая к южной части отвала шахты № 12–18 «Наклонная» (Пролетарский район, г. Донецк).

Результаты прокрустова дисперсионного анализа составляющих изменчивости листовой пластинки *P. monspeliense*, выращенных на почвенных образцах исследуемых участков, отражены в таблице 2.

Согласно результатам прокрустова дисперсионного анализа, значения морфогеометриче-

ских индексов изменчивости формы образцов листовой пластинки (фактор «образец») и флуктуирующей асимметрии (фактор «образец» × «сторона») статистически значимы для всех анализируемой выборки ($p \leq 10^{-6}$), значение направленной асимметрии (фактор «сторона») в четырех из семи случаев является статистически не-

Таблица 2. Результаты прокрустова дисперсионного анализа составляющих изменчивости листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thié baut ex Pers., выращенных на почвенных образцах исследуемых участков

Номер выборки	Источник вариации	SS	dF	MS	F	p
I	Образец	0,4149400	5364	0,0010478	2,7951	0,000001
	Сторона	0,0022641	36	0,0000628	0,1678	1,000000
	Образец × сторона	0,1484500	5364	0,0003749	95,2394	0,000001
	Ошибка измерения	0,0027600	10800	0,0000007	–	–
II	Образец	0,4377400	5364	0,0011054	2,3891	0,000001
	Сторона	0,0031154	36	0,0000865	0,1870	1,000000
	Образец × сторона	0,1832200	5364	0,0004627	108,0737	0,000001
	Ошибка измерения	0,0036989	10800	0,0000043	–	–
III	Образец	0,3662600	5364	0,0009249	9,9780	0,000001
	Сторона	0,0143440	36	0,0003985	4,2985	0,000001
	Образец × сторона	0,0367070	5364	0,0000927	29,2743	0,000001
	Ошибка измерения	0,0027358	10800	0,0000032	–	–
IV	Образец	0,1602300	5364	0,0004046	3,1024	0,000001
	Сторона	0,0018078	36	0,0000502	0,3850	0,999570
	Образец × сторона	0,0516480	5364	0,0001304	42,5026	0,000001
	Ошибка измерения	0,0026513	10800	0,0000031	–	–
V	Образец	0,3927800	5364	0,0009919	13,8106	0,000001
	Сторона	0,0042070	36	0,0001169	1,6272	0,001461
	Образец × сторона	0,0284410	5364	0,0000718	21,0654	0,000001
	Ошибка измерения	0,0029457	10800	0,0000034	–	–
VI	Образец	0,2722300	5364	0,0005401	5,1268	0,000001
	Сторона	0,0060898	36	0,0001692	1,6056	0,001593
	Образец × сторона	0,0530990	5364	0,0001054	34,6698	0,000001
	Ошибка измерения	0,0032819	10800	0,0000030	–	–

Окончание табл. 2.

VII	Образец	0,1106300	5364	0,0002794	4,1792	0,000001
	Сторона	0,0025216	36	0,0000700	1,0478	0,397880
	Образец × сторона	0,0264730	5364	0,0000669	22,2488	0,000001
	Ошибка измерения	0,0025960	10800	0,0000030	–	–

Примечания:

1. Цифровые обозначения мест отбора почвенных образцов см. в примечании к табл. 1;
2. SS – сумма квадратов, dF – число степеней свободы, MS – средний квадрат, F – значение критерия Фишера, p – уровень значимости.

достоверным, ввиду чего влияние почвенных параметров на данный тип асимметрии не анализировали (табл. 2). Численные выражения морфогометрических индексов оценивали по средним квадратам соответствующих факторов.

Значения коэффициента корреляции морфогометрических индексов изменчивости листовой пластинки *P. monspeliense* с почвенными характеристиками отражены в таблице 3.

Таким образом, отмечена умеренная отрицательная корреляция морфогометрического индекса изменчивости формы с содержанием гумуса и нитратного азота в почве, а также с таким показателем, как сумма обменных оснований. С показателем гидролитической кислотности отмечена умеренная положительная корреля-

ция. Из числа перечисленных почвенных показателей наибольшее значение на изменчивость формы оказывает содержание гумуса и нитратного азота в почве.

Отмечена сильная положительная корреляция морфогометрического индекса флуктуирующей асимметрии с гидролитической кислотностью почвы и умеренная положительная корреляция с обменной кислотностью. Выявлена также умеренная отрицательная корреляция с содержанием гумуса, нитратного азота и суммой обменных оснований.

Выводы

На изменчивость формы листовой пластинки *P. monspeliense* выявлено влияние четырех поч-

Таблица 3. Значения коэффициента корреляции морфогометрических индексов изменчивости листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiébaute Pers. с почвенными характеристиками

Почвенный параметр	Параметр листовой пластинки	Морфогометрический индекс изменчивости формы образцов листовой пластинки	Морфогометрический индекс флуктуирующей асимметрии листовой пластинки
Содержание подвижных фосфатов (мг P ₂ O ₅ /100 г почвы)		–0,17	0,07
Содержание гумуса (%)		–0,70	–0,50
Содержание обменного аммония (мг N-NH ₄ /100 г почвы)		–0,24	–0,13
Содержание нитратного азота (мг N-NO ₃ /100 г почвы)		–0,69	–0,54
Обменная кислотность (мг-экв/100 г почвы)		0,11	0,55
Гидролитическая кислотность (мг-экв/100 г почвы)		0,52	0,81
Сумма обменных оснований (мг-экв/100 г почвы)		–0,26	–0,30

венных параметров: гидролитической кислотности, суммы обменных оснований, содержания гумуса и нитратного азота. На степень проявления флуктуирующей асимметрии листовой пластинки исследуемого вида отмечено воздействие пяти параметров почвы: гидролитической и обменной кислотности, суммы обменных оснований, содержания гумуса и нитратного азота.

Не оказывают существенного воздействия на рассматриваемые морфологические параметры листовой пластинки содержание в почве подвижных фосфатов и обменного аммония. Из числа анализируемых почвенных параметров на проявление изменчивости формы листовой пластинки наибольшее влияние оказывает содержание гумуса и нитратного азота, на проявление флуктуирующей асимметрии – гидролитическая кислотность почвы.

Проведенные исследования демонстрируют возможность использования *P. monspeliense* в целях биотестирования и биоиндикации состояния почвенных условий.

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
2. *Бардина Т.В., Чугунова М.В., Бардина В.И.* Изучение экотоксичности урбаноземов методами биотестирования // Живые и биокосные системы. 2013. Вып. 5. URL: <http://www.jbks.ru/archive/issue5/article-8.pdf> (дата обращения: 14.02.2022).
3. *Галактионова Л.В., Губайдуллина И.З.* Использование морфометрических и биохимических показателей тест-культур для оценки токсичности наночастиц меди // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. N 3 (65). С. 196–198.
4. *Галактионова Л.В., Суздалева А.В.* Экологическая оценка почвенного покрова урбанизированных территорий методами биодиагностики // Современные проблемы науки и образования. 2017. N 4. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=26560> (дата обращения: 07.03.2022).
5. *Еськова Е.Н., Коротченко И.С.* Влияние гюмта натрия на морфометрические показатели тест-культуры в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами // Вестник КрасГАУ. 2014. N 3. С. 99–104.
6. *Лисовицкая О.В., Терехова В.А.* Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения // Доклады по экологическому почвоведению. 2010. N 1 (13). С. 1–18.
7. *Мелехова О.П., Сарапульцева Е.И., Евсева Т.И.* Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование: учеб. пособие. М.: Академия, 2008. 228 с.
8. *Митракова Н.В.* Оценка биологической активности и токсичности почв и техногенных поверхностных образований в Пермском Прикамье: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08. Пермь, 2019. 18 с.
9. *Николаева О.В., Терехова В.А.* Совершенствование лабораторного фитотестирования для экотоксикологической оценки почв // Почвоведение. 2017. N 9. С. 1141–1152.
10. *Определитель высших растений Украины / Добрачаева Д.Н., Котов М.И., Прокудин Ю.Н. и др. К.: Наук. думка, 1987. 548 с.*
11. *Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Мишеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.*
12. *Реброва О.Ю.* Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTICA. М.: Медиа Сфера, 2002. 312 с.
13. *Селивановская С.Ю., Галицкая П.Ю.* Оценка токсичности почв с использованием контактного метода биотестирования // Токсикологический вестник. 2006. N 4. С. 12–15.
14. *Терехова В.А.* Биотестирование почв: подходы и проблемы // Почвоведение. 2011. N 2. С. 190–198.
15. *Фомин Г.С., Фомин А.Г.* Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам: справочник. М.: Протектор, 2001. 304 с.
16. *Штирц Ю.А.* Оценка изменчивости формы листовой пластинки *Polygonum monspeliense* Thiebaut ex Pers. методами геометрической морфометрии при выращивании на почвенных субстратах техногенных территорий // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2020. Т. 19, N 2. С. 225–228. DOI: <https://doi.org/10.14258/pbssm.2020108>
17. *Zhongqiang L., Dan Y.* Factors affecting leaf morphology: A case study of *Ranunculus natans* C.A. Mey. (Ranunculaceae) in the arid zone of

northwest China // Ecol. Res. 2009. Vol. 24. P. 1323–1333.

18. Scheepens J.F., Frei E.S., Stöcklin J. Genotypic and environmental variation in specific leaf area in a widespread Alpine plant after transplantation to different altitudes // Oecologia. 2010. Vol. 164. P. 141–150.

Поступила в редакцию: 12.08.2022

UDC 58.02:574.21:581.45:582.657.24

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF SOIL PARAMETERS OF TECHNOGENIC TERRITORIES ON THE VARIABILITY OF THE LEAF BLADE OF *POLYGONUM MONSPELIENSE* THIÉBAUT EX PERS.

Yu.A. Shtirts, D.V. Syschikov, I.V. Agurova

Public Budgetary Institution «Donetsk Botanical Garden»

Geometric morphometry methods were used to evaluate the influence of a number of soil parameters in technogenic territories on the variability of the leaf blade of *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. under laboratory growing conditions. According to the results of the correlation analysis, out of the seven analyzed soil parameters, the manifestation of variability in the shape of the leaf blade is most affected by the content of humus and nitrate nitrogen, and the manifestation of fluctuating asymmetry is the hydrolytic acidity of the soil. The content of mobile phosphates and exchangeable ammonium in the soil does not have a significant effect on the considered morphological parameters of the leaf blade.

Key words: soil, technogenic territory, leaf blade, geometric morphometry, fluctuating asymmetry, directional asymmetry, *Polygonum monspeliense*, biotesting, bioindication

Citation: Shtirts Yu.A., Syschikov D.V., Agurova I.V. Evaluation of the influence of soil parameters of technogenic territories on the variability of the leaf blade of *Polygonum monspeliense* Thiébaud ex Pers. // Industrial Botany. 2022. Vol. 22, N 3–4. P. 61–67. DOI: 10.5281/zenodo.7790976
