

УДК 581.15+502.175:504.054 (470.331)

DOI: 10.26456/vtbio324

ИНДИКАТОРНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ НЕКОТОРЫХ ВИДОВ РАСТЕНИЙ В БИОМОНИТОРИНГЕ СОСТОЯНИЯ СРЕДЫ ПО ДАННЫМ ФЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

А.Ф. Мейсунова¹, О.А. Еремеева¹, А.Б. Савинов²

¹Тверской государственной университет, Тверь

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

Исследовано фенетическое разнообразие *Aegopodium podagraria*, *Plantago major* и *Chelidonium majus* в трех городах Ржевско-Старицкого Поволжья Тверской области. Приведены данные, характеризующие изменения фенетического разнообразия у растений по градиенту загрязнения среды. Выяснено, что среди изученных видов, в биомониторинге оценки качества среды с помощью фенетического анализа, целесообразно использовать *P. major* и *Ch. majus*. Виды демонстрируют наибольшее сходство максимальных и минимальных значений фенетических параметров (μ , h , Sp_h) в одних и тех же биотопах, что свидетельствует об их более широких индикаторных возможностях. Определены редкие фены у *Plantago major* (PR8) и *Ch. majus* (2Д), которые можно использовать в качестве маркеров экологического благополучия изучаемых территорий.

Ключевые слова: *Plantago major*, *Aegopodium podagraria*, *Chelidonium majus*, фены листьев, тяжелые металлы, загрязнение, фенетический анализ, фенофонды, Тверская область, г. Ржев, г. Зубцов, г. Старица

Введение. Одной из актуальных проблем настоящего времени является загрязнение окружающей среды, решение которой невозможно без использования информации о реакции живых организмов на антропогенное воздействие (Мейсунова, 2014; Мурашко, Рышкель, 2017; Пестова, 2017). Состояние окружающей среды в условиях техногенного загрязнения позволяют оценить разные индикаторные виды, в том числе, высшие растения (Мынбаева и др., 2012; Бекузарова, 2017; Наумова, Стрельцов, 2021). При этом получаемые сведения могут быть разного уровня (Оказова, Мажаева, 2018; Назаренко и др., 2020; Гусев, 2022). Значимые результаты дает фенетический анализ индикаторных видов высших растений, который позволяет оценить состояние биотопов в условиях техногенного загрязнения по изменению морфологических признаков (Мейсунова и др., 2021; Мейсунова и др., 2022; Савинов, Новожилов, 2021; Савинов и др., 2021 а, б; Савинов и др., 2022; Еремеева, Мейсунова, 2022). Известно, что морфологическая изменчивость растений может

регистрироваться по качественным признакам – фенам (Савинов, Новожилов, 2021). Параметры фенофондов позволяют осуществлять индикацию состояния ценопопуляций растений и косвенно оценивать состояние их биотопов (Савинов, Новожилов, 2021). Однако разные индикаторные виды могут по-разному отражать уровень фитотоксичности среды в зависимости от степени чувствительности к изменениям окружающей среды (Савинов и др., 2021 б). В этой связи, актуальны специальные исследования на предмет сравнения индикаторных возможностей разных видов растений. Удобными модельными территориями для таких исследований могут служить города Ржевско-Старицкого Поволжья в Тверской области, в которых развита промышленная инфраструктура, а также имеются крупные зеленые зоны, служащие местом произрастания для индикаторных видов. В 2022 г. на данных территориях были проведены фенетические исследования с помощью индикаторного вида *P. major*. Обнаружено низкое фенетическое разнообразие в биотопах, где сосредоточено значительное количество промышленных предприятий (Еремеева, Мейсурова, 2022). В почвенных пробах данных мест произрастания были зарегистрированы высокие концентрации тяжелых металлов и металлоидов (ТМ).

Цель – сравнить индикаторные возможности широко распространенных видов растений (*Aegopodium podagraria* L., *Plantago major* L., *Chelidonium majus* L.), используемых в биомониторинге состояния окружающей среды на основе фенетических данных. Задачи: 1) определить сеть пунктов отбора (ПО) образцов трех видов растений в городах Ржевско-Старицкого Поволжья (Ржев, Старица, Зубцов); 2) провести фенетический анализ растительного материала; 3) оценить уровень фенетического разнообразия разных видов растений в зависимости от уровня антропогенной нагрузки; 4) сравнить индикаторные возможности разных видов растений.

Методика Объектами исследования служили образцы трех широко распространенных видов растений: подорожника большого (*P. major*), сныти обыкновенной (*A. podagraria*) и чистотела большого (*Ch. majus*). Сеть пунктов отбора (ПО) материала выделили на основе анализа промышленной инфраструктуры городов Ржевско-Старицкого Поволжья (Ржев, Старица, Зубцов) и ранее проведенных исследований в них (Мейсурова, 2016; Еремеева, Мейсурова, 2022). Общее число ПО составило – 15. Сбор растений провели в трех городах Ржевско-Старицкого Поволжья: Ржев (ПО 1–7), Зубцов (ПО 8–12) и Старица (ПО 13–15). По результатам АЭС-ИСП-анализа в почвенных пробах этих ПО обнаружено 12 ТМ: As, Cd, Cr, Co, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, W (Мейсурова, 2016; Еремеева, Мейсурова, 2022).

Уровень содержания ТМ не превышает нормативных значений, за исключением, мышьяка, сурьмы и свинца.

В каждом ПО были заложены пробные площадки размером 20x20м, где осуществляли случайную выборку листьев у 50 генеративных растений каждого вида. Всего было собрано и обработано 2250 растительных образцов. Фенетический анализ провели в лабораторных условиях путем регистрации фенотипов и морфометрических особенностей по стандартным методикам: у *A. podagraria* регистрировали фены терминальных листочков (Савинов и др., 2018; Мейсурова и др., 2021); *P. major* – фены на нижней стороны листьев (Савинов, Новожилов, 2021; Еремеева, Мейсурова, 2022); *Ch. majus* – фены верхней доли листьев (Савинов и др., 2022). Все выявленные фенотипы растений фотографировали и сушили для гербария.

Фенетическое разнообразие растений (среднее число фенотипов, долю редких фенотипов, стандартные ошибки) оценивали с использованием формул Л.А. Животовского (1991):

$$\mu = (\sum \sqrt{p_i})^2,$$

где: μ – среднее число фенотипов; p_i – частоты фенотипов.

$$S\mu = \sqrt{\frac{\mu(m-\mu)}{N}},$$

где: $S\mu$ – стандартная ошибка μ ; m – число выявленных фенотипов; N – объем выборки.

$$h = 1 - \frac{\mu}{m},$$

где: h – доля редких фенотипов.

$$Sh = \sqrt{\frac{h(m-h)}{N}},$$

где: Sh – стандартная ошибка h .

Для оценки фенотипической гетерогенности популяций использовали коэффициент Cph , представляющий собой отношение доли редких фенотипов (h) к среднему числу фенотипов (μ) в популяции (Савинов, Новожилов, 2021):

$$Cph = \frac{h}{\mu}.$$

Статистическая обработка данных и определение параметров проведены стандартными методами с использованием лицензионных программных продуктов Microsoft Office Excel.

Результаты и их обсуждение. Известно, что морфологическая изменчивость листьев растений носит видоспецифический характер, а разнообразие фенотипов во многом обусловлено спецификой строения листьев (Савинов и др., 2021 б). Анализ фенотипов ценопопуляций сравниваемых видов, собранных в городах Ржевско-

Старицкого Поволжья (Ржев, Старица, Зубцов) показал, что высокое фенетическое разнообразие листьев характерно для *A. podagraria* (табл. 1). Среднее число обнаруженных фенотипов (μ) у этого растения составило 5,66, что существенно выше, чем у других видов. У *Ch. majus* и *P. major* значение μ составило 3,21 и 3,02 соответственно. У изученных видов обнаружены доминирующие фены, которые встречаются у растений почти во всех биотопах (ПО 1–15). Высокую частоту встречаемости у *A. podagraria* имеют фены А1 и А2, у *P. major* – Р5 и Р7, у *Ch. majus* – Т, 2Т и Д (рис. 1).

Доля редких фенов (h) не превышает 5–8% от среднего числа обнаруженных фенотипов в ценопопуляциях растений. Наибольшее значение h зарегистрировано у *A. podagraria* – 0,32 (5% от значения μ), наименьшее у *P. major* – 0,22 (7,3% от значения μ). Единично встречающимися фенами у *A. podagraria* являются А3В2, АМ2; у *P. major* – РР8; у *Ch. majus* – 2Д, ДП (рис. 2).

Таблица 1

Характеристики фенофондов ценопопуляций изученных растений в биотопах Ржевско-Старицкого Поволжья (ПО 1–15)

| Фены | г. Ржев | | | | | | г. Старица | | | | | | г. Зубцов | | |
|----------------------|---------|------|------|------|------|------|------------|------|------|------|------|------|-----------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| <i>A. podagraria</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| А1 | 0,58 | 0,48 | 0,34 | 0,68 | 0,34 | 0,76 | 0,78 | 0,64 | 0,04 | 0,64 | 0,4 | 0,76 | 0,4 | 0,46 | 0,54 |
| А2 | 0,16 | 0,08 | 0,24 | 0,02 | 0,5 | 0,08 | 0,06 | 0,1 | 0,68 | - | 0,2 | - | 0,1 | 0,12 | 0,16 |
| А3 | 0,04 | 0,06 | 0,02 | - | 0,04 | 0,06 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,06 |
| А4 | 0,06 | 0,06 | 0,14 | - | 0,08 | - | 0,02 | 0,04 | - | - | - | - | 0,02 | - | 0,02 |
| АR1 | - | - | - | 0,06 | - | 0,02 | 0,02 | - | - | - | - | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,02 |
| АR2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,04 | - | 0,02 | - | - | 0,02 | - |
| АR3 | 0,04 | - | 0,04 | - | - | - | 0,02 | 0,04 | 0,08 | 0,02 | 0,24 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | - |
| АR4 | - | 0,04 | - | 0,08 | - | - | - | 0,06 | 0,04 | 0,02 | 0,08 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,06 |
| АL1 | - | 0,04 | - | 0,02 | - | 0,02 | 0,04 | - | - | 0,06 | - | 0,04 | - | 0,04 | 0,02 |
| АD1 | - | 0,1 | 0,06 | 0,04 | - | 0,06 | 0,04 | - | - | 0,22 | 0,02 | 0,12 | 0,34 | 0,14 | 0,04 |
| АМ2 | 0,04 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| АМL | - | - | - | - | - | - | - | 0,06 | - | - | - | - | - | 0,02 | - |
| АВ2 | 0,06 | 0,12 | 0,08 | 0,02 | - | - | - | - | 0,02 | - | - | - | - | 0,02 | - |
| А2С | - | 0,02 | - | 0,02 | 0,02 | - | - | - | 0,1 | - | - | - | 0,02 | 0,04 | 0,02 |
| АS1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 | 0,02 | - | - | - | - |
| АSР1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 | - | - | - | 0,02 |
| АSЛ1 | 0,02 | - | - | 0,02 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 |
| АСS | - | - | 0,02 | 0,04 | - | - | 0,02 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| А2SЛ | - | - | 0,06 | - | 0,02 | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 | - | - |
| А3В2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 | - | - | - | - | - |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| A2B | - | - | - | - | - | - | - | 0,06 | - | - | - | - | - | 0,04 | 0,02 |
| <i>N</i> | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| <i>m</i> | 8 | 9 | 9 | 10 | 6 | 6 | 8 | 7 | 7 | 7 | 8 | 6 | 9 | 12 | 12 |
| μ | 5,73 ±0,51 | 7,13 ±0,52 | 7,30 ±0,50 | 5,37 ±0,71 | 4,23 ±0,39 | 3,71 ±0,41 | 4,38 ±0,56 | 5,07 ±0,44 | 4,69 ±0,47 | 4,33 ±0,48 | 6,55 ±0,44 | 3,61 ±0,42 | 6,24 ±0,59 | 8,71 ±0,76 | 7,92 ±0,80 |
| <i>h</i> | 0,28 ±0,06 | 0,21 ±0,06 | 0,19 ±0,06 | 0,46 ±0,07 | 0,30 ±0,06 | 0,38 ±0,07 | 0,45 ±0,07 | 0,28 ±0,06 | 0,33 ±0,07 | 0,38 ±0,07 | 0,18 ±0,05 | 0,40 ±0,07 | 0,31 ±0,07 | 0,27 ±0,06 | 0,34 ±0,07 |
| <i>Cph</i> | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,09 | 0,07 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,03 | 0,11 | 0,05 | 0,03 | 0,04 |
| <i>P. major</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| P3 | 0,04 | - | 0,02 | 0,06 | - | - | 0,02 | - | - | 0,02 | - | - | 0,02 | 0,06 | 0,18 |
| P5 | 0,68 | 0,24 | 0,36 | 0,62 | 0,62 | 0,8 | 0,32 | 0,42 | 0,26 | 0,18 | 0,24 | 0,36 | 0,62 | 0,6 | 0,44 |
| P7 | 0,28 | 0,64 | 0,64 | 0,26 | 0,38 | 0,2 | 0,66 | 0,56 | 0,6 | 0,72 | 0,54 | 0,44 | 0,32 | 0,3 | 0,28 |
| P9 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,06 | 0,08 | 0,08 | 0,16 | - | - | 0,02 |
| PL6 | - | 0,06 | - | 0,06 | - | - | - | - | 0,08 | - | - | 0,02 | 0,02 | - | - |
| PR4 | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 | - | - | 0,02 | 0,02 | - | 0,02 | 0,06 |
| PR6 | - | 0,06 | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,08 | - | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| PR8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,04 | - | - | - | - |
| <i>N</i> | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| <i>m</i> | 3 | 4 | 3 | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 6 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| μ | 2,41 ±0,17 | 3,17 ±0,23 | 2,34 ±0,18 | 3,19 ±0,23 | 1,97 ±0,03 | 1,80 ±0,08 | 2,31 ±0,18 | 2,36 ±0,17 | 3,28 ±0,22 | 2,88 ±0,25 | 4,54 ±0,36 | 3,79 ±0,30 | 3,16 ±0,34 | 3,42 ±0,33 | 4,60 ±0,36 |
| <i>h</i> | 0,20 ±0,06 | 0,21 ±0,06 | 0,22 ±0,06 | 0,20 ±0,06 | 0,01 ±0,02 | 0,10 ±0,04 | 0,23 ±0,06 | 0,21 ±0,06 | 0,18 ±0,05 | 0,28 ±0,06 | 0,24 ±0,06 | 0,24 ±0,06 | 0,37 ±0,07 | 0,32 ±0,07 | 0,23 ±0,06 |
| <i>Cph</i> | 0,08 | 0,07 | 0,09 | 0,06 | 0,01 | 0,06 | 0,10 | 0,09 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 0,06 | 0,12 | 0,09 | 0,05 |
| <i>Ch. majus</i> | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | 0,78 | 0,9 | 0,8 | 0,66 | 0,68 | 0,8 | 0,7 | 0,66 | 0,48 | 0,74 | 0,48 | 0,28 | 0,8 | 0,54 | 0,78 |
| 2T | 0,08 | 0,06 | - | 0,06 | 0,12 | 0,14 | 0,2 | - | 0,28 | 0,04 | 0,14 | 0,5 | 0,04 | 0,2 | 0,08 |
| ТЛ | 0,06 | 0,02 | 0,08 | 0,12 | 0,12 | - | 0,06 | - | 0,12 | - | 0,26 | 0,04 | - | 0,06 | 0,02 |
| ТП | - | 0,02 | 0,04 | 0,04 | - | 0,04 | - | 0,04 | 0,12 | 0,02 | 0,06 | 0,16 | 0,06 | 0,18 | 0,08 |
| Д | 0,08 | - | 0,08 | 0,12 | 0,08 | 0,02 | 0,04 | 0,3 | - | 0,18 | 0,04 | 0,02 | 0,1 | 0,02 | 0,04 |
| 2Д | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 | - | - | - | - |
| ДП | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,02 | - | - | - | - | - |
| <i>N</i> | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| <i>m</i> | 4 | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| μ | 2,87 ±0,25 | 2,18 ±0,28 | 2,76 ±0,26 | 3,80 ±0,30 | 3,24 ±0,22 | 2,59 ±0,27 | 2,99 ±0,25 | 2,43 ±0,17 | 3,67 ±0,16 | 3,12 ±0,34 | 4,68 ±0,35 | 3,91 ±0,29 | 2,74 ±0,26 | 3,97 ±0,29 | 3,21 ±0,34 |
| <i>h</i> | 0,28 ±0,06 | 0,46 ±0,07 | 0,31 ±0,07 | 0,24 ±0,06 | 0,19 ±0,06 | 0,35 ±0,07 | 0,25 ±0,06 | 0,19 ±0,06 | 0,08 ±0,04 | 0,38 ±0,07 | 0,22 ±0,06 | 0,22 ±0,06 | 0,31 ±0,07 | 0,21 ±0,06 | 0,36 ±0,07 |
| <i>Cph</i> | 0,10 | 0,21 | 0,11 | 0,06 | 0,06 | 0,14 | 0,08 | 0,08 | 0,02 | 0,12 | 0,05 | 0,06 | 0,11 | 0,05 | 0,11 |

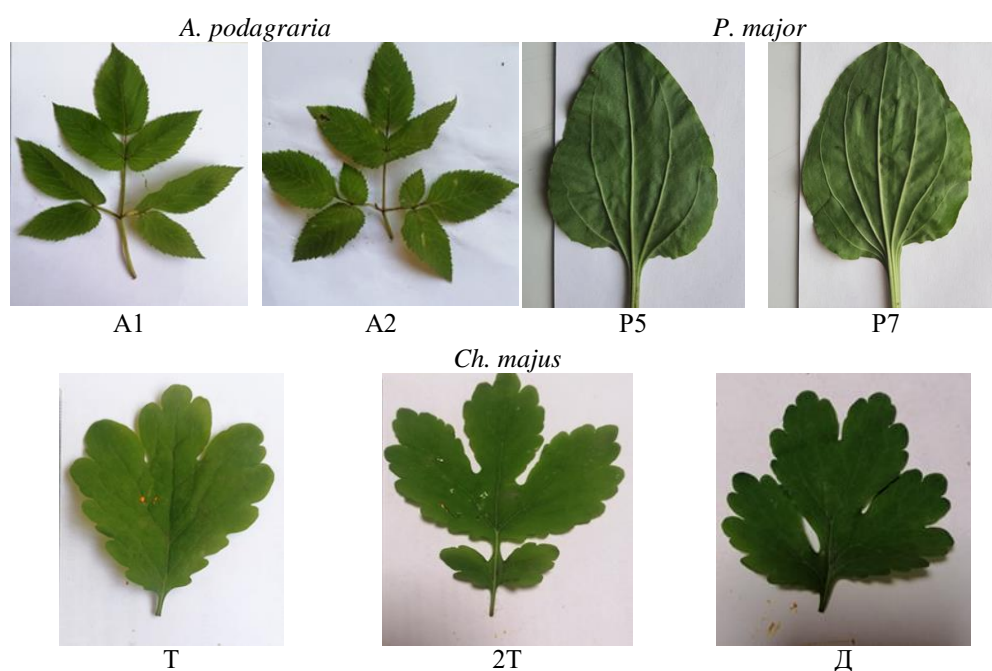


Рис. 1. Доминирующие фенотипы у изученных растений

Сравнительный анализ фенофондов изученных растений показал различия в зависимости от мест сбора в городах Ржевско-Старицкого Поволжья. Так в крупном и промышленно развитом г. Ржеве уровень фенетического разнообразия изученных растений отличается в зависимости от уровня антропогенной нагрузки и загрязнения окружающей среды. Минимальные величины \square отмечены в ценопопуляциях из ПО 5–6. Значения \square совпадают в ценопопуляциях из ПО 6 у *A. podagraria* ($\square=3,71\pm 0,41$), *Ch. majus* ($\square=2,59\pm 0,27$) и *P. major* ($\square=1,80\pm 0,08$); ПО 5 – у *A. podagraria* ($\square=4,23\pm 0,39$) и *P. major* ($\square=1,97\pm 0,03$) (табл. 1). В данных местообитаниях доминирующими фенами у *A. podagraria* являются А1 и А2; у *P. major* – Р5 и Р7; у *Ch. majus* – Т (рис. 1). Доля редких фенов (h) у растений в этих пунктах отбора низкая. Тенденция к резкому снижению доли редких фенов особенно выражена у *P. major* ($h=0,01\pm 0,02$). Ценопопуляции этого вида в ПО 5 отличаются низкой гетерогенностью ($Sph=0,01$) (рис. 2; табл. 1). Отметим, что в почвенных пробах ПО 5–6 зарегистрировано наибольшее число металлов с максимальными значениями концентраций ТМ (Cd, Cr, Ti, V, Ni, Co) (Еремеева, Мейсунова, 2022). Данные пункты являются придорожными участками региональных автомобильных трасс с интенсивным движением автотранспорта. Кроме того, в непосредственной близости к этим пунктам располагаются крупные машиностроительные предприятия (Мейсунова, 2016).

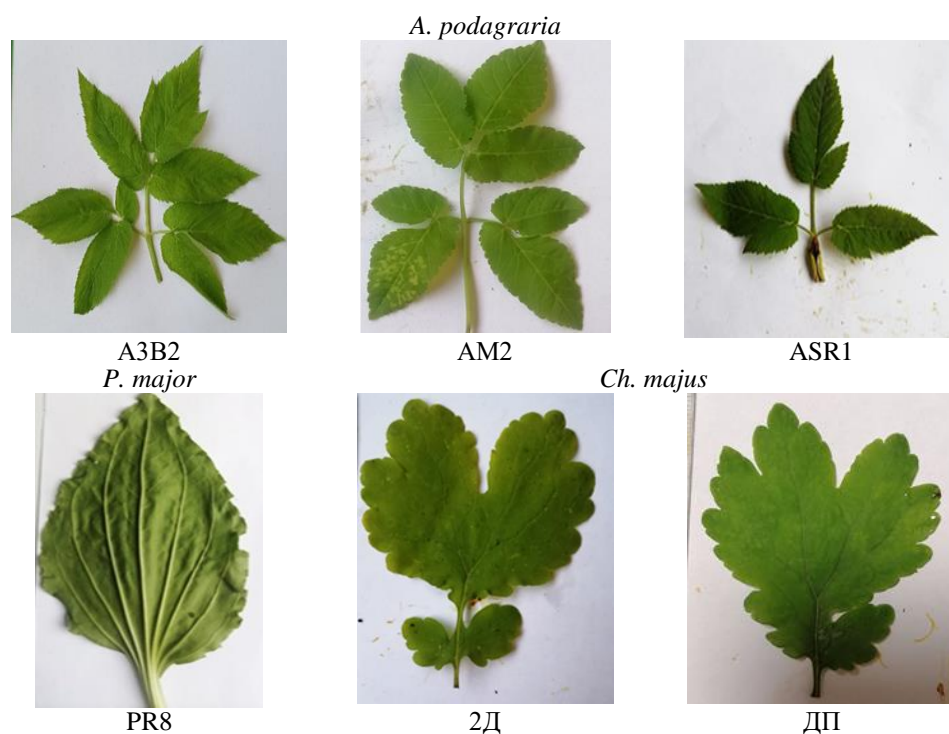


Рис. 3. Редкие фенотипы у изученных видов растений

Высокое фенетическое разнообразие в г. Ржеве выявлено в ПО 2–4. Максимальные величины \square совпадают в ценопопуляциях из ПО 2 у *A. podagraria* ($\square=7,13\pm0,52$) и *P. major* ($\square=3,17\pm0,23$); ПО 4 – у *P. major* ($\square=3,19\pm0,23$) и *Ch. majus* ($\square=3,80\pm0,30$) (табл. 1). Отмечена тенденция к возрастанию доли редких фенов (h) у *A. podagraria* (ПО 4) и *Ch. majus* (ПО 2). Популяция последнего вида в ПО 2 характеризуется наибольшей гетерогенностью ($Chr = 0,21$). По результатам АЭС-ИСП-анализа, в почвенных пробах данных биотопов концентрации большинства элементов минимальные (Еремеева, Мейсунова, 2022).

Другие города Ржевско-Старицкого Поволжья (Зубцов, Старица) не столь крупные по размерам, имеют существенно меньше промышленных предприятий и общую численность населения. В биотопах этих городов абсолютное число выявленных фенов у всех изученных растений выше, чем в г. Ржеве. В биотопах г. Зубцов высокий уровень фенетического разнообразия у всех изученных видов выявлен в ПО 11 (табл. 1). Данный пункт располагается на окраине города, вдали от крупных автомагистралей. Большинство металлов в почвенных пробах имеют низкие значения концентраций (Еремеева, Мейсунова, 2022). Максимальные величины \square у *A. podagraria* составляют $6,5\pm0,44$; *P. major* – $4,54\pm0,36$; *Ch. majus* – $4,68\pm0,35$. Однако доля редких фенов в этом

биотопе не высокая. Например, у *P. major* отмечен единично встречающийся PR8, у *Ch. majus* – 2Д (рис. 2). Значительную долю редких фенотипов можно встретить в ПО 10, где максимальные величины h отмечены у *P. major* и *Ch. majus*. Данный биотоп характеризуется наибольшей разнородностью. Величины Chp в популяциях ПО 10 у всех изученных растений имеют максимальные значения (рис. 2; табл. 1).

В г. Старице фенетическое разнообразие в ПО 14–15 выше, чем в ПО 13, где в почвенных пробах выявлено превышение нормативных значений по свинцу (1,5 ОДК) (Еремеева, Мейсурова, 2022). Наибольшие значения основных параметров фенетического разнообразия (μ и h) обнаружены в популяциях *A. podagraria* и *P. major* из ПО 15.

Анализ фенотипов разных растений показал, что чем выше уровень фенетического разнообразия растений на исследуемой территории, тем чаще совпадают максимальные и минимальные значения их фенетических параметров (μ , h , Chp) в биотопах. Например, в г. Старица, где уровень фенетического разнообразия высокий у всех изученных растений, максимальные и минимальные величины параметров, косвенно отражающие состояние биотопов, совпадали у всех трех видов растений одновременно. В г. Зубцове, где уровень фенетического разнообразия высокий в ценопопуляциях у *P. major* ($\mu=3,60$) и *Ch. majus* ($\mu=3,31$), но низкий у *A. podagraria* ($\mu=4,9$), максимальные и минимальные значения фенетических параметров преимущественно совпадали в биотопах у пары видов *P. major* и *Ch. majus*. В отличие от г. Зубцова, в г. Ржеве уровень фенетического разнообразия низкий в ценопопуляциях у *P. major* ($\mu=2,46$) и *Ch. majus* ($\mu=2,9$), но высокий у *A. podagraria* ($\mu=5,4$), поэтому значения максимальных и минимальных величин параметров в биотопах совпадали либо в паре *A. podagraria* и *P. major*, либо в паре *P. major* и *Ch. majus*. В этой связи, несмотря на значительное богатство фенотипов у *A. podagraria*, в биомониторинге состояния среды с помощью фенетического анализа целесообразно использовать виды *P. major* и *Ch. majus*. Виды более объективно отражают экологическое состояние биотопов, демонстрируют наибольшее сходство значений фенетических параметров на территориях с разной антропогенной нагрузкой. Редкие фенотипы у *P. major* (PR8) и *Ch. majus* (2Д) можно использовать в качестве маркеров экологического благополучия изучаемых территорий в биомониторинговых исследованиях с использованием данных видов.

Таким образом, фенетическое богатство растений видоспецифично. Высокий уровень фенетического разнообразия листьев демонстрирует *A. podagraria* ($\mu=5,66$). Среднее число

фенотипов у других видов растений ниже в 1,8 раза. Доля редких фенотипов в составе ценопопуляций всех растений не превышает 5-8%. Для каждого вида растений определены, как доминирующие, так и редкие фенотипы.

Выяснено, что фенетическое разнообразие изученных растений меняется в зависимости от степени антропогенной нагрузки и загрязнения окружающей среды. Анализ фенотипов ценопопуляций в городах Ржевско-Старицкого Поволжья (Ржев, Старица, Зубцов) показал, что по мере увеличения уровня загрязнения среды снижается уровень фенетического разнообразия листьев и, наоборот, повышается в местах с низким уровнем загрязнения среды.

Сравнение индикаторных возможностей изученных растений показало, что в мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды на основе фенетического анализа целесообразно использовать виды *P. major* и *Ch. majus*. Виды демонстрируют наибольшее сходство максимальных и минимальных значений фенетических параметров (μ , h , Cph) в одних и тех же биотопах, что свидетельствует о более широких индикаторных возможностях данных видов. Редкие фены PR8 у *P. major* и 2Д у *Ch. majus* – маркеры экологического благополучия изучаемых территорий.

Заключение. Фенетические показатели достаточно объективно отражают экологическое состояние биотопов. Установлено, что фенетическое разнообразие листьев изученных растений снижается по мере увеличения уровня загрязнения среды и, наоборот, повышается в местах низкого уровня загрязнения. Среди изученных видов, наилучшие индикаторные возможности имеют виды *P. major* и *Ch. majus*. Редкие фены этих видов (PR8, 2Д) можно использовать в качестве маркеров экологического благополучия изучаемых территорий.

Список литературы

- Бекузарова С.А. 2017. Растения-индикаторы загрязнения почв тяжелыми металлами // Успехи современной науки. Т.1. № 9. С. 111-115.
- Гусев А.П. 2022. Комплексирование фитоиндикации и геоэлектрического метода для оценки загрязнения геологической среды (на примере полигона химических отходов) // Вектор геонаук. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова Т. 5. № 1. С. 65-73.
- Еремеева О.А., Мейсунова А.Ф. 2022. Фитоиндикация биотопов в Ржевско-Старицком Поволжье с помощью фенетического анализа подорожника большого // Охрана окружающей среды – основа безопасности страны: сб. статей по материалам Междунар. науч. экол. конф. Краснодар: КубГАУ. С. 345-348.

- Мейсурова А.Ф. 2014. Биомониторинг атмосферного загрязнения с использованием ИК-спектрального анализа индикаторных видов лишайников (на примере Тверской обл.): автореф. дис. ... доктора биологических наук: 03.02.08 / Мейсурова Александра Федоровна [Место защиты: Белгород. гос. нац. исслед. ун-т]. Тверь. 42 с.
- Мейсурова А.Ф. 2016. Содержимые металлов в слоевищах *Parmelia sulcata* в городах Ржевско-Старицкого Поволжья (Тверская область) // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. № 3. С. 185-196.
- Мейсурова А.Ф., Савинов А.Б., Янсон А.Н. 2021. Комплексный анализ фенотипических изменений и элементного состава сныти обыкновенной в городских условиях // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. Краснодар: КубГАУ. С. 670-673.
- Мейсурова А.Ф., Цветков В.П., Цветков И.В., Нотов А.А. 2022. Анализ фрактальных параметров листьев сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria*) в рекреационных зонах города Твери методами мультифрактальной термодинамики // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. № 1(65). С. 180-193.
- Мурашко Ю.В., Рышкель И.В. 2017. Анализ методик биоиндикации по определению загрязнения окружающей среды // Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века: материалы 17-й международной научной конференции, 18–19 мая 2017 г. Минск: ИВЦ Минфина. Ч. 2. С. 37-38.
- Мынбаева Б.Н., Макеева А.Ж., Сейдалина А.Б. 2012. Потенциальные возможности плевела многолетнего для фитоиндикации городских почв // Экология. № 3. С. 236.
- Назаренко Н.Н., Похлебаев С.М., Малаев А.В., Третьякова И.А., Ходжаев А.К. 2020. Эколого-ценотические группы флоры сосудистых растений Оренбургской области и фитоиндикация биотопов // Самарский науч. вестн. Т. 9. №4. С. 109–120.
- Наумова А.А., Стрельцов А.Б. 2021. Исследование загрязнения окружающей среды методом фитоиндикации // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения. Краснодар: КубГАУ им. И.Т. Трубилина. С. 642-644.
- Оказова З.П., Мажеева П.И. 2018. Фитоиндикация - информативный метод оценки окружающей среды // Извест. Чеченск. гос. пед. ун-та. Естественные и технические науки. Сер.2. Т. 15. № 18. С. 102-108.
- Пестова О.А. 2017. Применение метода биоиндикации для контроля загрязнения почв рекреационно-оздоровительных зон города Омска // Безопасность городской среды: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. конф. Омск: ОмГТУ. С. 89-91.
- Савинов А.Б., Ерофеева Е.А., Никитин Е.А. 2018. Морфологическая изменчивость и биохимические показатели листьев в ценопопуляциях *Aegopodium podagraria* L. (Ariaceae, Apiales) при разных уровнях загрязнения почв тяжелыми металлами // Поволжский экологический

- журнал. № 3. С. 315-326.
- Савинов А.Б., Новожилов Д.А. 2021. Анализ фенофондов *Plantago major* L. в рекреационных экосистемах Нижнего Новгорода // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации*. Пенза: Наука и Просвещение. С. 20-23.
- Савинов А.Б., Новожилов Д.А., Басуров В.А. 2021а. Биоиндикационный аспект анализа фенофондов *Aegopodium podagraria* L. в рекреационных экосистемах Нижнего Новгорода // *Современные научные исследования*. Пенза: Наука и просвещение. С. 18-22.
- Савинов А.Б., Мейсурова А.Ф., Нотов А.А., Новожилов Д.А. 2021б. Фенетическая фитоиндикация и биотестирование почв в рекреационных зонах г. Твери // *Вестн. ТвГУ. Серия: Биология и экология*. № 3 (63). С. 114-126.
- Савинов А.Б., Новожилов Д.А., Мейсурова А.Ф., Нотов А.А. 2022. Биоиндикационный аспект анализа фенофондов *Chelidonium majus* L. в городских рекреационных зонах // *Актуальные научные исследования. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции*. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.). С. 24-28.

INDICATOR OF PLANT SPECIES CAPABILITIES IN BIOMONITORING THE STATE OF THE ENVIRONMENT ACCORDING TO THE DATA OF THE PHENETIC ANALYSIS

A.F. Meysurova¹, O.A. Eremeeva¹, A.B. Savinov²

¹Tver State University, Tver

²N.I. Lobachevsky Nizhny Novgorod State University, Nizhny Novgorod

The fenetic diversity of *Aegopodium podagraria*, *Plantago major* and *Chelidonium majus* in three cities of Rzhevsk-Staritsky Volga area of Tver region was studied. The data characterizing the changes of fenetic diversity in plants by the gradient of environmental pollution are given. It was been found that among the examined species, it is reaonable to use *P. major* and *Ch. majus* in biomonitoring the assessment of the environment quality by means of phenotic analysis. Species show the greatest similarity between the maximum and minimum values of (μ , h , Cph) in the same biotopes, indicating their broader indicative capabilities. Rare hair dryers have been identified in *P. major* (PR8) and *Ch. majus* (2D), which can be used as markers of the ecological well-being of the studied territories.

Keywords: *Plantago major*, *Aegopodium podagraria*, *Chelidonium majus*, leaf phenes, heavy metals, pollution, phenotic analysis, phenofunds, Tver region, city of Rzhev, city of Zubtsov, city of Staritsa.

Об авторах:

МЕЙСУРОВА Александра Федоровна – доктор биологических наук, декан биологического факультета, заведующая кафедрой ботаники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: alexandrauraz@mail.ru.

ЕРЕМЕЕВА Олеся Александровна – магистрант 2 года обучения по направлению 06.04.01 Биология (профиль Экология), ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: eremeeva.lesia1806@yandex.ru.

САВИНОВ Александр Борисович – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии Института биологии и биомедицины, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ), 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23, корп. 1, e-mail: sabcor@mail.ru.

Мейсурова А.Ф. Индикаторные возможности некоторых видов растений в биомониторинге состояния среды по данным фенетического анализа / А.Ф. Мейсурова, О.А. Еремеева, А.Б. Савинов // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2023. № 3(71). С. 127-138.

Дата поступления рукописи в редакцию: 27.05.23

Дата подписания рукописи в печать: 04.09.23