

УДК 631.6+581.5

**МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛИСТЬЕВ В ЦЕНОПОПУЛЯЦИЯХ
AEGOPIDIUM PODAGRARIA L. (APIACEAE, APIALES)
ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ
ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

А. Б. Савинов, Е. А. Ерофеева, Ю. Д. Никитин

*Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, корп. 1
E-mail: sabcor@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.01.2018 г., после доработки 24.04.2018 г., принята 24.06.2018 г.

Савинов А. Б., Ерофеева Е. А., Никитин Ю. Д. Морфологическая изменчивость и биохимические показатели листьев в ценопопуляциях *Aegopodium podagraria* L. (Apiaceae, Apiales) при разных уровнях загрязнения почв тяжелыми металлами // Поволжский экологический журнал. 2018. № 3. С. 315 – 326. DOI: <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-3-315-326>

Исследована морфологическая изменчивость, интенсивность перекисного окисления липидов (ПОЛ) и содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) в листьях сныти *Aegopodium podagraria* L. из четырех ценопопуляций, произрастающих в урбоэкосистемах, почвы которых в разной степени загрязнены тяжелыми металлами (ТМ): Pb, Zn, Cu, Cr. В градиенте загрязнения почв ТМ у сныти уменьшается размер терминального листочка, среднее число фен (различных вариантов формы листа) и увеличивается доля редких фен листьев, в них также уменьшается содержание хлорофилла *b*. Параллельно снижается интенсивность ПОЛ, что не характерно для стрессовых ситуаций. Содержание хлорофилла *a* и каротиноидов снижается только при среднем уровне загрязнения и нормализуется при максимальном. Полученные данные свидетельствуют о том, что морфологические и биохимические параметры листьев сныти по-разному характеризуют состояние этого вида растений при увеличении уровня загрязнения почвы ТМ. В таких условиях обедняются фенофонды ценопопуляций *A. podagraria* и преимущественно развиваются особи с меньшими размерами листьев. Но при этом у них интенсивность ПОЛ и содержание отдельных пигментов могут оставаться близкими к норме. Результаты исследования свидетельствуют о том, что *A. podagraria* является видом, способным поддерживать биохимический гомеостаз в условиях загрязнения почв тяжелыми металлами. Таким образом, в отличие от изученных биохимических показателей, морфологические параметры точнее характеризовали негативные изменения в ценопопуляциях *A. podagraria* по градиенту химического загрязнения почв, что важно в аспекте биоиндикации экосистем при антропогенном загрязнении окружающей среды.

Ключевые слова: *Aegopodium podagraria*, ценопопуляции, морфологические признаки листа, фены, перекисное окисление липидов, фотосинтетические пигменты, тяжелые металлы.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-3-315-326>

ВВЕДЕНИЕ

В экосистемах растения испытывают воздействие многих стрессоров как природного, так и антропогенного происхождения, в частности, вынуждены адаптиро-

ваться к повышенным концентрациям тяжелых металлов (ТМ), которые существенно модифицируют обменные процессы растений (Репкина и др., 2013; Серегин, Иванов, 2001). Эти адаптации проявляются у растений на различных уровнях, в том числе на генном, морфологическом и физиолого-биохимическом (Савинов, 1998, 2003; Савинов и др., 2007; Ерофеева и др., 2009; Ерофеева, Наумова, 2010; Репкина и др., 2013), поскольку организм реагирует на внешние воздействия как единое целое (Шмальгаузен, 1982).

Морфологическая изменчивость растений в ценопопуляциях регистрируется по количественным и качественным признакам, т.е., как правило, по морфометрическим параметрам и фенам соответственно (Злобин, 1989; Савинов, 1998, 2003; Соколова, Камалдинова, 2010), что позволяет достаточно эффективно и экономично осуществлять индикацию состояния ценопопуляций.

Наряду с этим перспективны биоиндикационные и мониторинговые исследования реакций растений на стрессовые воздействия на клеточном и субклеточном уровнях (Савинов и др., 2007; Ерофеева, Наумова, 2010; Ерофеева, Шаповалова, 2015). Это связано с тем, что, например, процессы перекисного окисления липидов (ПОЛ) характеризуют состояние важнейших клеточных структур – биомембран, которые одними из первых испытывают воздействия стрессирующих факторов (Барабой, 2006; Shalini, Durbey, 2003).

Представляются важными одновременные исследования морфологической изменчивости, ПОЛ и содержания фотосинтетических пигментов у растений в условиях техногенеза, что в сравнительном аспекте даст возможность объективнее осуществлять биоиндикацию и мониторинг состояния экосистем. В качестве объекта таких исследований нами были выбраны ценопопуляции сныти *Aegopodium podagraria* L. (1753) (сем. Ариáceае), которые произрастали в биотопах, в разной степени загрязненных ТМ (Pb, Zn, Cu, Cr).

С учетом всего вышесказанного мы впервые исследовали в ценопопуляциях сныти *A. podagraria* L., произрастающих по градиенту загрязнения почв ТМ, одновременно морфологическую изменчивость листьев, интенсивность ПОЛ, а также содержание фотосинтетических пигментов в листьях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сныть *A. podagraria* L. – один из наиболее широко распространенных доминантов травяного покрова фактически всех широколиственных лесов Евразии, широколиственных сосняков, выходит в степь, в горы и, что особенно актуально, часто проявляет себя как сорное растение (Смирнова, 1974). Вследствие такой экологической пластичности возрастает обилие ценопопуляций сныти в антропогенно нарушенных лесах, в парковых и садовых экосистемах (Сокольская и др., 2010; Невидомова, 2014; Невидомова и др., 2016, 2017). Но сведения о морфологической и биохимической адаптации сныти в экосистемах крайне скудны (Невидомова и др., 2016; Olsson, Falkengren-Grerup, 2000; Eneström et al., 2009).

В качестве условно-контрольного рассматривался биотоп № 1, расположенный на окраине города и удаленный от городских автомагистралей на 0.5 км, являющийся ландшафтным памятником природы «Щелоковский хутор» – естест-

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

венным массивом широколиственного леса на серых лесных почвах с неморальным широколиственным богатым видового состава (Экология. ..., 2008). Биотопы № 2–4 расположены в городских рекреационных зонах с искусственными насаждениями на техноземах. Биотопы № 1–4 отстоят друг от друга на 0.5 – 3 км, по периметрам биотопов № 2–4 (в 3–5 м от них) проходят городские автомагистрали, являющиеся источниками загрязнения экосистем парков продуктами автотранспортных выбросов, в том числе соединениями ТМ.

С площадок в биотопах № 1–4 по методу конверта были взяты образцы почвы (из горизонта А1) для определения валового содержания в них ТМ. Анализы на содержание ТМ (Cu, Pb, Zn, Cr) в почвах выполнены в НИИХимии при ННГУ методом атомно-адсорбционной спектроскопии (для экстракции из почвы ТМ использовали 1 М HNO₃). Показатель суммарной токсической нагрузки (Z) на почвы (Безель и др., 1998; Жуйкова и др., 2015) биотопов № 2–4 был почти в 2–3 раза выше, чем на почвы контрольного биотопа № 1 (табл. 1).

Таблица 1

Содержание тяжелых металлов (ТМ) в почвах биотопов парков

Номер биотопа	Содержание ТМ, мг/кг почвы				Z, отн. ед.
	Zn	Pb	Cr	Cu	
1 (контроль)	34.1±8.5	10.0±2.5	15.2±3,0	7.0±1.7	1.00
2	71.6±16.4	18.2±4.6**	19.4±4.1	15.9±4.0*	1.86
3	72,1±18.2*	31.1±7.4*	20.1±3.9	22.1±5.5**	2.07
4	142.0±35.3**	42.3±10.3**	22.3±4.2	16.4±4.1*	2.79
ПДК	100	32	6	55	–

Примечание. Z – суммарная токсическая нагрузка; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$ по отношению к показателям биотопа 1 (условный контроль).

В мае 2016 г. в пределах пробных площадок размером 20×20 м для исследования отбирали листья сныти в биотопах № 1 – 4. В пределах пробных площадок, во-первых, регистрировали морфометрические параметры терминальных листочков сныти и фены в случайной выборке у 50 генеративных растений (g1) на основе предварительного анализа фенофондов сныти (Савинов и др., 2015) (рис. 1), оценивали фенетическое разнообразие ценопопуляций сныти (среднее число фенов, долю редких фенов) с использованием формул Л. А. Животовского (1991); во-вторых, закладывали 10 пробных площадок (размером 1 × 1 м), с каждой из них отбирали 20 листьев с разных растений и объединяли в одну биологическую повторность для исследования ПОЛ (1 площадка – биологическая повторность, 10 повторностей для каждого биотопа). Интенсивность ПОЛ оценивали: 1) по содержанию ТБК-активных продуктов липопероксидации, среди которых наиболее массовым является малоновый диальдегид (МДА) (Камышников, 2002); 2) по уровню диеновых конъюгатов по методике И. Д. Стальной (1977) и 3) по содержанию оснований Шиффа – по методике И. А. Волчегорского и А. Г. Налимова (1989) с незначительными модификациями. Содержание хлорофиллов и каротиноидов определяли в тех же листьях, что и продукты ПОЛ, согласно общепринятой методике, для экстрагирования пигментов использовали 80%-ный ацетон (Шлык, 1971).

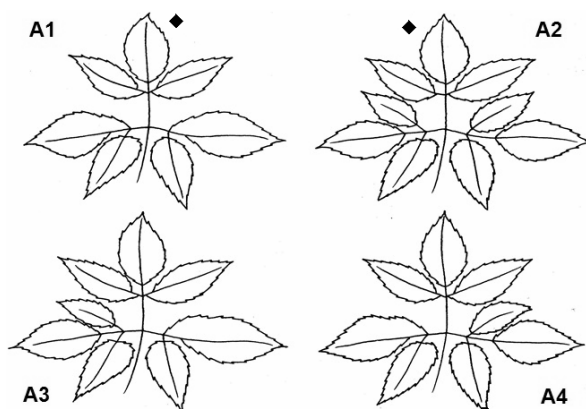


Рис. 1. Фены (A1 – A4) *Aegopodium podagraria*: ♦ – терминальные листочки (Савинов и др., 2015)

Статистический анализ результатов исследований проводили с помощью программ Microsoft Excel, Биостатистика 4.03, используя однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), критерий Стьюдента с поправкой Бонферрони для количественных признаков, в том числе для содержания ТМ в почве. Кроме того, был проведен корреляционный анализ по Пирсону для выявления связи между содержанием ТМ в почве и биохимическими показателями листа сънги.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что с повышением загрязнения почв ТМ в ценопопуляциях сънги значительно уменьшается размер листочка (табл. 2). Одновременно в фенондах снижается частота встречаемости фена А2, но возрастает частота встречаемости фена А1, в результате снижается среднее число фенов, но возрастает доля редких фенов (табл. 3).

Таблица 2

Изменчивость признаков терминального листочка в ценопопуляциях сънги обыкновенной из биотопов с разными нагрузками тяжелыми металлами (2016 г.)

Номер биотопа	Величины признаков, см			
	Дл	Дч	Шлч	Шпч
1 (контроль)	11.0 ± 0.17 11.1	2.7 ± 0.07 20.0	3.4 ± 0.08 17.0	3.4 ± 0.08 16.5
2	$9.0 \pm 0.14^{***}$ 11.1	$2.2 \pm 0.06^{***}$ 18.6	$2.6 \pm 0.05^{***}$ 13.1	$2.6 \pm 0.05^{***}$ 12.1
3	$10.3 \pm 0.13^{**}$ 8.6	2.6 ± 0.05 12.8	$2.6 \pm 0.03^{***}$ 8.4	$2.5 \pm 0.03^{***}$ 8.5
4	$8.4 \pm 0.13^{***}$ 11.0	$2.0 \pm 0.06^{***}$ 22.3	$2.4 \pm 0.05^{***}$ 15.0	$2.3 \pm 0.05^{***}$ 14.6

Примечание. Дл – длина листа, Дч – длина черешка, Шлч – ширина левой части листа, Шпч – ширина правой части листа; под чертой – CV,%; ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$.

Полученные результаты согласуются с данными о том, что наличие в почве комплекса ТМ (Pb, Zn, Cu, Cd) в дозах 1–5 ПДК приводит к ухудшению биометрических параметров растений, сокращению площади фотосинтезирующей поверхности и может многократно снижать первичную продукцию (Щелчкова и др., 2010); при этом с усилением загрязнения почв ТМ тормозятся морфогенетические процессы и снижается жизнеспособность аборигенных видов растений (Воробейчик, Хантемирова, 1994; Дуля и др., 2013).

Таблица 3

Фенетическое разнообразие ценопопуляций сныти обыкновенной из биотопов с разными нагрузками тяжелыми металлами (2016 г.)

Номер биотопа	Частоты фенов				Среднее число фенов, μ	Доля редких фенов, h
	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄		
1 (контроль)	0.28	0.60	0.04	0.08	3.19±0.23	0.20±0.06
2	0.74	0.14	0.04	0.08	2.95±0.25	0.26±0.06
3	0.88	0.04	0.06	0.02	2.32±0.28*	0.42±0.07*
4	0.88	–	0.04	0.08	2.02±0.28**	0.50±0.07**

Примечание. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

При увеличении уровня загрязнения почвы ТМ в листьях снижалось содержание хлорофилла *b*, что соответствует данным других авторов о негативном влиянии ТМ на уровень зеленых пигментов у растений (Титов и др., 2007). В то же время содержание хлорофилла *a* и каротиноидов уменьшалось только у растений в биотопах 2 и 3, а при наиболее высоком уровне загрязнения (биотоп 4) не отличалось от контроля (рис. 2).

В биотопах с повышенным содержанием ТМ в почвах не было выявлено увеличения у растений интенсивности ПОЛ (рис. 3), характерного для стрессового состояния (Барабой, 2006; Полесская, 2007). Наоборот, содержание в листьях всех изученных продуктов ПОЛ уменьшалось относительно контрольного уровня или соответствовало ему (см. рис. 3).

Корреляция была отмечена только между содержанием меди в почве (в отличие от других металлов), уровнем хлорофиллов, а также оснований Шиффа (хлорофилл *a*: $r = -0.97$, $p = 0.030$; хлорофилл *b*: $r = -0.98$, $p = 0.016$; основания Шиффа: $r = -0.98$, $p = 0.016$). При этом именно валовое содержание меди в биотопах было наименьшим

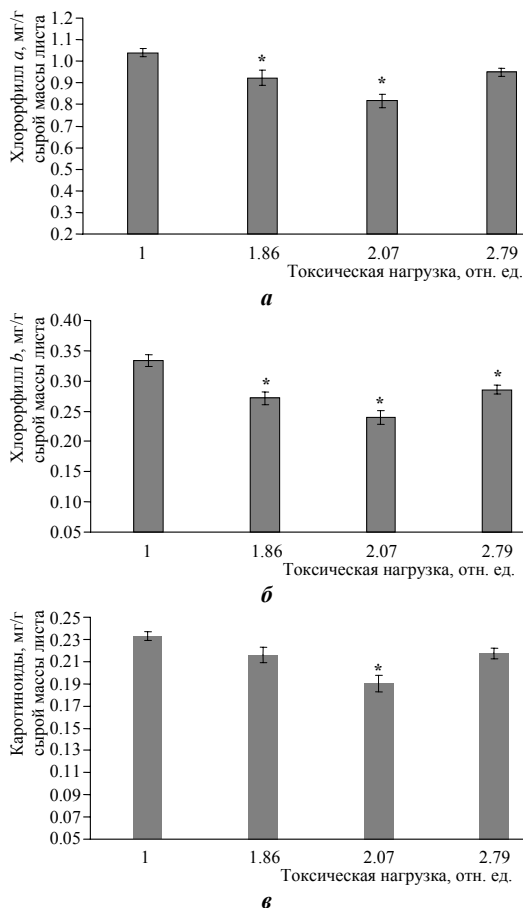


Рис. 2. Содержание хлорофилла *a* (а), хлорофилла *b* (б) и каротиноидов (в) в листьях *Aegopodium podagraria* (* – статистически значимые различия по сравнению с данным показателем у растений в контрольном биотопе при $p < 0.05$)

среди учтенных ТМ (см. табл. 1), а медь относится к микроэлементам растений и является кофактором некоторых антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутаза) (Полесская, 2007). Поэтому можно предположить, что при отмеченных отно-

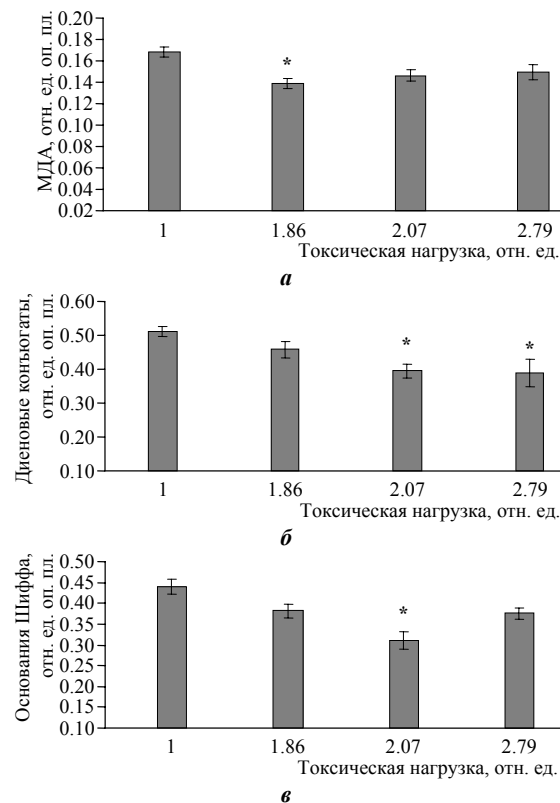


Рис. 3. Содержание продуктов ПОЛ в листьях *Aegopodium podagraria*: МДА (а), дневных конъюгатов (б) и оснований Шиффа (в) (* – статистически значимые различия по сравнению с данным показателем у растений в контрольном биотопе при $p < 0.05$)

воздействия поллютантов может быть связана с повышением общей активности пероксидаз (Ерофеева, 2015 б), являющихся наиболее важными компонентами антиоксидантной системы и участвующих в регуляции уровня ПОЛ (Полесская, 2007). Отсутствие однозначного негативного изменения содержания фотосинтетических пигментов и уровня липопероксидации в листьях *A. podagraria* свидетельствует, очевидно, об относительно высокой устойчивости изученных биохимических показателей у данного вида растений к загрязнению почв ТМ.

сительно невысоких концентрациях в почве медь стимулировала синтез супероксиддисмутаза и таким путем снижала интенсивность ПОЛ в листьях сныти (см. рис. 3). Очевидно, именно поэтому была выявлена сильная отрицательная корреляция между содержанием оснований Шиффа в листе и уровнем меди в почве. Но одновременно, по-видимому, содержания меди в сочетании с другими ТМ в почвах биотопов было достаточно для понижения уровней хлорофиллов а и b, что наблюдается у растений в подобных ситуациях на загрязненных ТМ почвах (Коротченко, 2011).

Ранее нами были получены экспериментальные данные о сохранении у различных видов растений в ряде случаев нормального уровня ПОЛ, содержания фотосинтетических пигментов (Ерофеева, 2014 а, 2015 а) и величин некоторых других биохимических показателей (Ерофеева, 2012, 2014 б) при действии поллютантов, в том числе ТМ. При этом нами было установлено, что нормализация интенсивности ПОЛ при высоком уровне

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что морфологические и биохимические параметры листьев сняты по-разному характеризуют состояние этого вида растений при увеличении уровня загрязнения почвы ТМ. В таких условиях обедняются фенофонды ценопопуляций *A. podagraria* и преимущественно развиваются особи с меньшими размерами листьев. Но при этом у них интенсивность ПОЛ и содержание отдельных пигментов могут оставаться близкими к норме. По-видимому, это свидетельствует о том, что *A. podagraria* является видом, способным поддерживать биохимический гомеостаз в условиях загрязнения почв ТМ. Аналогично, например, у *Vicia cracca* L. (сем. Fabaceae): в отличие от *Taraxacum officinale* Wigg. (сем. Asteraceae), перекисный гомеостаз фактически не нарушается по градиенту загрязнения почв ТМ (Савинов и др., 2007), что, очевидно, обусловлено высоким содержанием у бобовых растений белков и пептидов, в том числе металлотионеинов и фитохелатинов, позволяющих в значительной степени нейтрализовать токсическое действие ТМ (Серегин, Иванов, 2001).

Полученные данные позволяют предположить, что состояние *A. podagraria* по градиенту химического загрязнения почв параметры морфологической изменчивости характеризуют корректнее, чем ее биохимические показатели, в частности уровень липопероксидации и содержание фотосинтетических пигментов в листьях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барбой В. А. Стресс : природа, биологическая роль, механизмы, исходы. Киев : Фито-социоцентр, 2006. 424 с.
- Безель В. С., Жуйкова Т. В., Позолотина В. Н. Структура ценопопуляций одуванчика и специфика накопления тяжелых металлов // Экология. 1998. № 5. С. 376 – 382.
- Волчегорский И. А., Налимов А. Г. Сопоставление различных подходов к определению продуктов перекисного окисления липидов в гептан-изопропанольных экстрактах крови // Вопр. мед. химии. 1989. Т. 35, № 1. С. 52 – 60.
- Воробейчик Е. Л., Хантемирова Е. В. Реакция лесных фитоценозов на техногенное загрязнение: зависимости доза – эффект // Экология. 1994. № 3. С. 31 – 43.
- Дуля О. В., Микрюков В. С., Воробейчик Е. Л. Стратегии адаптации *Deschampsia caespitosa* и *Lycchnis flosculi* к обитанию в условиях промышленного загрязнения : анализ с использованием зависимостей доза – эффект // Экология. 2013. № 4. С. 243 – 253.
- Ерофеева Е. А., Наумова М. М. Влияние сульфата кадмия в широком диапазоне концентраций на физиолого-биохимические показатели проростков пшеницы // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2010. № 2 (2). С. 508 – 512.
- Ерофеева Е. А., Шаповалова К. В. Многолетний сравнительный анализ устойчивости *Betula pendula* (Betulaceae, Fagales) и *Tilia cordata* (Malvaceae, Malvales) к автотранспортному загрязнению // Поволж. экол. журн. 2015. № 4. С. 390 – 399.
- Ерофеева Е. А., Сухов В. С., Наумова М. М. Двухфазная зависимость некоторых эколого-морфологических и биохимических параметров листовой пластинки берёзы повислой от уровня автотранспортного загрязнения // Поволж. экол. журн. 2009. № 4. С. 288 – 295.
- Животовский Л. А. Популяционная биометрия. М. : Наука, 1991. 271 с.
- Жуйкова Т. В., Мелинг Э. В., Кайгородова С. Ю., Безель В. С., Гордеева В. А. Особенности почв и травянистых растительных сообществ в условиях техногенеза на Среднем Урале // Экология. 2015. № 3. С. 163 – 172.

- Злобин Ю. А. Принципы и методы изучения ценоотических популяций растений. Казань : Изд-во Казан. ун-та, 1989. 147 с.
- Камышиников В. С. Справочник по клинико-биохимической лабораторной диагностике. Минск : Беларусь, 2002. Т. 2. 495 с.
- Коротченко И. С. Влияние тяжелых металлов на содержание фотосинтетических пигментов в листьях моркови // Вестн. Красноярск. гос. аграрн. ун-та. 2011. Вып. 4. С. 86 – 91.
- Невидомова Е. В. Морфологическая характеристика экологических ареалов дубрав природоохранной территории Нижегородского мегаполиса «Стригинский Бор» // Modern Phytomorphology. 2014. № 6. С. 181 – 188.
- Невидомова Е. В., Невидомов А. М., Поликова И. А. Экология сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.) в сосняках памятника природы «Дмитриевское» Краснобаковского района Нижегородской области // Биологические особенности лекарственных и ароматических растений и их роль в медицине М. : ФГБНУ ВИЛАР, 2016. С. 127 – 130.
- Невидомова Е. В., Невидомова М. А., Невидомов А. М., Поликова И. А., Юрасова Г. Ш. Влияние антропогенных факторов на экологию *Aegopodium podagraria* L. в сосняках памятника природы «Дмитриевское» Краснобаковского района Нижегородской области // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии. 2017. Т. 20, № 3. С. 44 – 48.
- Полесская О. Г. Растительная клетка и активные формы кислорода. М. : Изд-во КДУ, 2007. 140 с.
- Репкина Н. С., Таланова В. В., Титов А. Ф. Влияние тяжелых металлов на экспрессию генов у растений // Тр. Карельск. науч. центра РАН. 2013. № 3. С. 31 – 45.
- Савинов А. Б. Анализ фенотипической изменчивости одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Wigg.) из биотопов с разными уровнями техногенного загрязнения // Экология. 1998. № 5. С. 362 – 365.
- Савинов А. Б. Фенотипическая индикация ценопопуляций растений в условиях техногенеза // Экологический мониторинг. Методы биологического и физико-химического мониторинга. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та, 2003. Ч. 5. С. 300 – 323.
- Савинов А. Б., Курганова Л. Н., Шекунов Ю. И. Интенсивность перекисного окисления липидов у *Taraxacum officinale* Wigg. и *Vicia cracca* L. в биотопах с разными уровнями загрязнения почв тяжелыми металлами // Экология. 2007. № 3. С. 191 – 197.
- Савинов А. Б., Никитин Ю. Д., Тарасова М. П. Особенности изменчивости листьев растений в городских фитоценозах разного состава (информационный аспект активности сообществ) // XXIX Люблинские чтения. Современные проблемы эволюции и экологии. Ульяновск : Изд-во Ульян. гос. пед. ун-та, 2015. С. 479 – 484.
- Серёгин И. В., Иванов В. Г. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48, № 4. С. 606 – 630.
- Смирнова О. В. Сныть обыкновенная // Биологическая флора Московской области. М. : Изд-во МГУ, 1974. Вып. 1. С. 131 – 141.
- Соколова Г. Г., Камалтдинова Г. Т. Морфогенетический полиморфизм листьев клевера ползучего // Изв. Алтайск. гос. ун-та. 2010. Т. 1, № 3. С. 48 – 51.
- Сокольская О. Б., Шитова Е. Ю., Кузнецова Е. А., Жильцова О. К. Роль *Aegopodium podagraria* в исторических садово-парковых экосистемах Приволжской возвышенности // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2010. № 25. С. 126 – 128.
- Стальная И. Д. Метод определения диеновой конъюгации ненасыщенных кислот // Современные методы в биохимии. М. : Медицина, 1977. С. 63 – 64.
- Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2007. 172 с.
- Шлык А. А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений. М. : Наука, 1971. С. 154 – 170.

МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Шмальгаузен И. И. Организм как целое в индивидуальном и историческом развитии. М. : Наука, 1982. 383 с.

Щелчкова М. В., Стручкова Л. К., Федоров И. А. Комплексное влияние тяжелых металлов на ферментативную активность и эффективное плодородие мерзлотной лугово-черноземной почвы // Вестн. Сев.-Вост. Федер. ун-та им. М. К. Аммосова. 2010. Т. 7, № 4. С. 16 – 21.

Экология Нижнего Новгорода. Н. Новгород : Изд-во ННГАСУ, 2008. 530 с.

Eneström J., Andersson S., D'Hertefeldt T. Partitioning of genetic variation in the weedy clonal herb *Aegopodium podagraria* (Apiaceae) in Sweden // Nordic J. of Botany. 2009. Vol. 27, № 5. P. 437 – 443.

Erofeeva E. A. Developmental stability of a leaf of *Pisum sativum* L. under the influence of formaldehyde in a wide range of doses // Russ. J. of Developmental Biology. 2012. Vol. 42, № 5. P. 259 – 263.

Erofeeva E. A. Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses // Dose Response. 2014 a. Vol. 12, № 1. P. 121 – 135.

Erofeeva E. A. Dependence of dandelion (*Taraxacum officinale* Wigg.) seed reproduction indices on intensity of motor traffic pollution // Dose Response. 2014 b. Vol. 12, № 4. P. 540 – 550.

Erofeeva E. A. Hormesis and paradoxical effects of drooping birch (*Betula pendula* Roth) parameters under motor traffic pollution // Dose Response. 2015 a. Vol. 13, № 2. P. 1 – 12.

Erofeeva E. A. Dependence of guaiacol peroxidase activity and lipid peroxidation rate in drooping birch (*Betula pendula* Roth) and tillet (*Tilia cordata* Mill.) leaf on motor traffic pollution intensity // Dose Response. 2015 b. Vol. 13, № 2. P. 1 – 6.

Olsson M. O., Falkengren-Grerup U. Potential nitrification as an indicator of preferential uptake of ammonium or nitrate by plants in an oak woodland understory // Annals of Botany. 2000. Vol. 85, № 3. P. 299 – 305.

Shalini V., Durbey R. S. Lead toxicity induces peroxidation and alters the activities of anti-oxidant enzymes in growing rice plants // Plant Science. 2003. Vol. 164, № 4. P. 645 – 655.

А. Б. Савинов, Е. А. Ерофеева, Ю. Д. Никитин

**MORPHOLOGICAL VARIABILITY AND BIOCHEMICAL INDICES
OF LEAVES IN COENOPOPULATIONS OF *AEGOPODIUM PODAGRARIA* L.
(APIACEAE, APIALES) UNDER VARIOUS LEVELS
OF SOIL POLLUTION WITH HEAVY METALS**

Alexsander B. Savinov, Elena A. Erofeeva, and Yuriy D. Nikitin

*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod
23 Prospekt Gagarina, Nizhnij Novgorod 603950, Russia
E-mail: sabcor@mail.ru*

Received 16 January 2018, revised 24 April 2018, accepted 24 June 2018

Savinov A. B., Erofeeva E. A., Nikitin Yu. D. Morphological Variability and Biochemical Indices of Leaves in Coenopopulations of *Aegopodium podagraria* L. (Apiaceae, Apiales) under Various Levels of Soil Pollution with Heavy Metals. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2018, no. 3, pp. 315 – 326 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-3-315-326>

The morphological variability, lipid peroxidation rate (LPR) and photosynthetic pigment content in the leaves of *Aegopodium podagraria* L. were studied in four coenopopulations growing in urban ecosystems whose soils were contaminated, to varying degrees, with heavy metals (HM): Pb, Zn, Cu, Cr. The increase of the HM level in the soil induced a decrease in the terminal leaflet size, the average number of phens (i.e. various variants of the leaf shape), and the chlorophyll content *b* in leaves but the percentage of rare phens increased. At the same time, the LPR intensity decreased, which is not typical for stress situations in plants. The level of chlorophyll *a* and carotenoids reduced at the medium contamination level and normalized at the highest one. The data obtained indicate that the morphological and biochemical parameters of sweeps leaves characterize differently the status of this plant species with an increase in the level of soil contamination with HM. In such conditions, the phenofonds of *A. podagraria* coenopopulations are depleted and individuals with smaller leaf sizes develop predominantly. But at the same time, their intensity of LPR and the content of individual pigments may remain close to normal. The results of our study suggest that *A. podagraria* is a species capable of maintaining biochemical homeostasis under the conditions of soil contamination with heavy metals. Thus, in contrast to the studied biochemical indicators, the morphological parameters more accurately characterized the adverse changes in the coenopopulations of goutweed, which is important in the aspect of bio-indication of ecosystems under anthropogenic environmental pollution.

Key words: *Aegopodium podagraria*, coenopopulations, leaf morphological features, phens, lipid peroxidation, photosynthetic pigments, heavy metals.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1684-7318-2018-3-315-326>

REFERENCES

- Barabov V. A. *Stress: nature, biological role, mechanisms, outcomes*. Kiev, Phytosociocenter Publ., 2006. 424 p. (in Russian).
- Bezel V. S., Zhuikova T. V., Pozolotina V. N. The structure of dandelion cenopopulations and specific features of heavy metal accumulation. *Russian J. Ecology*, 1998. vol. 29, no. 5, pp. 331–337.

Volchegorsky I. A., Nalimov A. G. Comparison of different approaches to determination of lipid peroxidation products in heptane-isopropanol extracts of blood. *Voprosy Meditsinskoj Khimii*, 1989, vol. 35, no. 1, pp. 52–60 (in Russian).

Vorobeichik E. L., Khantemirova E. V. Reaction of forest phytocenoses to technogenic pollution: dose-effect dependences. *Russian J. Ecology*, 1994, vol. 25, no. 3, pp. 171–180.

Dulya O. V., Mikryukov V. S., Vorobeichik E. L. Strategies of adaptation to heavy metal pollution in *Deschampsia caespitosa* and *Lychnis flos-cuculi*: Analysis based on dose-response relationship. *Russian J. Ecology*, 2013, vol. 44, no. 4, pp. 271–281.

Erofeeva E. A., Naumova M. M. Influence of cadmium sulfate in a wide range of concentrations on physiological and biochemical parameters of wheat seedlings. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2010, no. 2 (2), pp. 508–512 (in Russian).

Erofeeva E. A., Shapovalova K. V. Long-term comparative analysis of the resistance of *Betula pendula* (Betulaceae, Fagales) and *Tilia cordata* (Malvaceae, Malvales) to motor transport contamination. *Povolzhskiy J. of Ecology*, 2015, no. 4, pp. 390–399 (in Russian).

Erofeeva E. A., Sukhov V. S., Naumova M. M. Two-phase dependence of some ecological-morphological and biochemical parameters of birch leaf sheet affected by the level of motor transport contamination. *Povolzhskiy J. of Ecology*, 2009, no. 4, pp. 288–295 (in Russian).

Zhivotovsky L. A. *Population Biometry*. Moscow, Nauka Publ., 1991. 271 p. (in Russian).

Zhuykova T. V., Meling E. V., Kaygorodova S. Y., Bezel V. S., Gordeeva V. A. Specific features of soils and herbaceous plant communities in industrially polluted areas of the Middle Urals. *Russian J. Ecology*, 2015, vol. 46, no. 3, pp. 213–221.

Zlobin Y. A. *Principles and Methods for Studying Cenotic Plant Populations*. Kazan, Izdatelstvo Kazanskogo universiteta, 1989. 147 p. (in Russian).

Kamyshnikov V. S. *Reference Book on Clinical and Biochemical Laboratory Diagnostics*. Minsk, Belarus Publ., 2002, vol. 2. 495 p. (in Russian).

Korotchenko I. S. Influence of heavy metals on the content of photosynthetic pigments in carrot leaves. *Bulletin of KrasGAU*, 2011, iss. 4, pp. 86–91 (in Russian).

Nevidomova E. V. Morphological characteristics of ecological areas to oak forests in the nature protection area of the Nizhny Novgorod megacity “Striginsky Bor”. *Modern Phytomorphology*, 2014, no. 6, pp. 181–188 (in Russian).

Nevidomova E. V., Nevidomov A. M., Polshkova I. A. Ecology of the goutweed (*Aegopodium podagraria* L.) in the pine forests of nature monument “Dmitrievskoe” of Krasnobakovsky district of Nizhny Novgorod region. In: *Biological Features of Medicinal and Aromatic Plants and Their Role in Medicine*. Moscow, FGBNU VILAR, 2016, pp. 127–130 (in Russian).

Nevidomova E. V., Nevidomova M. A., Nevidomov A. M., Polshkova I. A., Yurasova G. Sh. Influence of anthropogenic factors on the ecology of *Aegopodium podagraria* L. in pine forests of the monument of nature “Dmitrievskoe” of Krasnobakovsky district of Nizhny Novgorod region. *Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 44–48 (in Russian).

Polesskaya O. G. *Plant Cell and Active Oxygen Species*. Moscow, Izdatelstvo KDU, 2007. 140 p. (in Russian).

Repkina N. S., Talanova V. V., Titov A. F. Influence of heavy metals on gene expression in plants. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2013, no. 3, pp. 31–45 (in Russian).

Savinov A. B. The analysis of phenotypic variation in common dandelion (*Taraxacum officinale* Wigg.) from biotopes with different levels of technogenic pollution. *Russian J. Ecology*, 1998, vol. 29, no. 5, pp. 318–321.

Savinov A. B. Phenotypic indication of coenopopulations of plants in the conditions of technogenesis. In: *Environmental monitoring. Methods of biological and physico-chemical monitoring*. Nizhnij Novgorod, Izdatelstvo Nizhegorodskogo universiteta, 2003, vol. 5, pp. 300–323 (in Russian).

Savinov A. B., Kurganova L. N., Shekunov Yu. I. Intensity of lipid peroxidation in *Taraxacum officinale* Wigg. and *Vicia cracca* L. in biotopes with different levels of heavy metals pollution in soil. *Russian J. Ecology*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 174–180.

Savinov A. B., Nikitin Yu. D., Tarasova M. P. Features of the plant leaves variability in urban phytocenoses of different composition (information aspect of plants activity). *XXIX Lyubischevskie chteniya. Sovremennye problemy evolyucii i ekologii*. Ulianovsk, Izdatelstvo Ulianovskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta, 2015, pp. 479–484 (in Russian).

Seregin I. V., Ivanov V. G. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects in higher plants. *Russian J. Plant Physiology*, 2001, vol. 48, no. 4, pp. 606–630.

Smirnova O. V. Goutweed. *Biological Flora of the Moscow Region*. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1974, iss. 1, pp. 131–141 (in Russian).

Sokolova G. G., Kamaltdinova G. T. Morphogenetic polymorphism of leaves the creeping clover. *Izvestiya of Altai State University*, 2010, vol. 1, no. 3, pp. 48–51 (in Russian).

Sokolskaya O. B., Shitova E. Y., Kuznetsova E. A., Zhiltsova O. K. The role of *Aegopodium podagraria* in historical landscape park ecosystems of the Volga Upland. *Aktualnyye Problemy Lesnogo Kompleksa*, 2010, no. 25, pp. 126–128 (in Russian).

Stal'naya I. D. Method for determination of diene conjugation of unsaturated acids. In: *Sovremennye metody v biokhimi*. Moscow, Medicina Publ., 1977, pp. 63–64.

Titov A. F., Talanov V. V., Kaznina N. M., Laidinen G. F. *Plants Resistance to heavy metals*. Petrozavodsk, Karelian Research Centre RAS, 2007. 172 p. (in Russian).

Shlyk A. A. Determination of chlorophylls and carotenoids in extracts of green leaves. In: *Biochemical Methods in Plant Physiology*. Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 154–170 (in Russian).

Shmalgauzen I. I. *The Organism as a Whole in Individual and Historical Development*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 383 p. (in Russian).

Schelchkova M. V., Struchkova L. K., Fedorov I. A. Heavy metals complex influence on enzymatic activity and effective fertility of the cryosolic meadow-chernozem soil. *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2010, vol. 7, no. 4, pp. 16–21 (in Russian).

Ecology of Nizhny Novgorod. Nizhnij Novgorod, Izdatelstvo NNGASU, 2008. 530 p. (in Russian).

Eneström J., Andersson S., D'Hertefeldt T. Partitioning of genetic variation in the weedy clonal herb *Aegopodium podagraria* (Apiaceae) in Sweden. *Nordic J. of Botany*, 2009, vol. 27, no. 5, pp. 437–443.

Erofeeva E. A. Developmental stability of a leaf of *Pisum sativum* L. under the influence of formaldehyde in a wide range of doses. *Russ. J. of Developmental Biology*, 2012, vol. 42, no. 5, pp. 259–263.

Erofeeva E. A. Hormesis and paradoxical effects of wheat seedling (*Triticum aestivum* L.) parameters upon exposure to different pollutants in a wide range of doses. *Dose Response*. 2014 a, vol. 12, no. 1, pp. 121–135.

Erofeeva E. A. Dependence of dandelion (*Taraxacum officinale* Wigg.) seed reproduction indices on intensity of motor traffic pollution. *Dose Response*, 2014 b, vol. 12, no 4, pp. 540–550.

Erofeeva E. A. Hormesis and paradoxical effects of drooping birch (*Betula pendula* Roth) parameters under motor traffic pollution. *Dose Response*, 2015 a, vol. 13, no 2, pp. 1–12.

Erofeeva E. A. Dependence of guaiacol peroxidase activity and lipid peroxidation rate in drooping birch (*Betula pendula* Roth) and tillet (*Tilia cordata* Mill.) leaf on motor traffic pollution intensity. *Dose Response*, 2015 b, vol. 13, no. 2, pp. 1–6.

Olsson M. O., Falkengren-Grerup U. Potential nitrification as an indicator of preferential uptake of ammonium or nitrate by plants in an oak woodland understory. *Annals of Botany*, 2000, vol. 85, no. 3, pp. 299–305.

Shalini V., Durbey R. S. Lead toxicity induces peroxidation and alters the activities of anti-oxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, 2003, vol. 164, no. 4, pp. 645–655.