

Эколого-фитохимические особенности *Crataegus fallacina* Klokov в условиях техногенного загрязнения

Н. А. ВИНОГРАДОВА, А. З. ГЛУХОВ

Государственное учреждение “Донецкий ботанический сад”
283059, Донецк, просп. Ильича, 110
E-mail: Arina0@meta.ua

Статья поступила 02.02.2020

После доработки 20.03.2020

Принята к печати 20.03.2020

АННОТАЦИЯ

Проанализировано влияние техногенного загрязнения на содержание основных групп биологически активных веществ (флавоноидов, антоцианов, оксикоричных кислот, процианидинов, дубильных веществ, каротиноидов, аскорбиновой и свободных органических кислот) в плодах и листьях представителя природной флоры Донецкого региона *Crataegus fallacina* Klokov. Определено содержание таких тяжелых металлов, как кадмий, свинец, ртуть в почве (подвижные формы) и растительном сырье, оценена экологическая безопасность сырья. Наиболее значительно в условиях техногенной среды изменяется содержание дубильных веществ в листьях *C. fallacina* и процианидинов в плодах, что обуславливает возможность использования этих показателей для скрининга степени воздействия урбанизированной среды на растения. Оценено соответствие сырья *C. fallacina* требованиям нормативной документации по содержанию действующих веществ. Показано, что данное сырье обладает значительной антиоксидантной активностью, которая повышается в условиях загрязнения.

Ключевые слова: *Crataegus fallacina* Klokov, техногенное загрязнение, антиоксидантная активность, тяжелые металлы, биологически активные вещества.

В настоящее время наблюдается сокращение количества территорий, не испытывающих техногенной нагрузки. К индустриальным регионам относится и Донбасс, в структуре промышленности которого доминируют отрасли со значительным количеством выбросов поллютантов в окружающую среду: электроэнергетика, угольная, металлургическая, машиностроительная и коксохимическая отрасли. Для населенных пунктов региона характерно загрязнение воздушного бассейна более чем 20 антропогенными ксенобиотиками. Промышленные предприятия, а также автотранспорт, на долю которого приходится каж-

дая четвертая тонна выбросов в г. Донецке, являются источником поступления в окружающую среду тяжелых металлов [Глухов и др., 2016; Охотникова, 2017]. Это одни из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды из-за их высокой токсичности для живых организмов в относительно низких концентрациях, способности к биоаккумуляции и невозможности биологического разложения [Скворцова, 2017]. Из них основными фитотоксикантами считаются свинец, кадмий и ртуть [Галина, 2013].

В антропогенно трансформированной среде одним из важнейших элементов оптимиза-

ции территории являются древесные растения. Большое значение имеет изучение комплексного воздействия техногенной среды на различные виды растений. Имеются многочисленные исследования, посвященные динамике содержания биологически активных веществ (БАВ) в растениях в зависимости от техногенного загрязнения окружающей среды. Однако результаты этих исследований часто неоднозначны и зависят от многих факторов: вида и состояния растений, состава и интенсивности загрязнителей, природно-климатических и погодных условий, фазы вегетации. Противоречивые результаты встречаются даже для одних и тех же видов. Например, одни авторы отмечали уменьшение содержания аскорбиновой кислоты в листьях *Betula pendula* Roth [Ханина и др., 2015], хвое *Picea pungens* Engelm [Кригер, 2013] и *Pinus sylvestris* L. [Зубарева, 2017] и каротиноидов в листьях *Tilia cordata* Mill. [Неверова, Цандекова, 2007] в условиях техногенного загрязнения, другие, напротив, – повышение количества этих веществ в данном сырье [Рябухина, 2011; Бухарина и др., 2013; Кригер и др., 2013; Скочилова, Закамская, 2013; Зарипова, Кузьмин, 2015; Параскевопуло и др., 2017]. Вероятно, это можно объяснить с помощью немонотонных ответов биосистем на действие различных доз токсиканта (гормезис, парадоксальные эффекты) [Nadacek et al., 2011; Ерофеева, 2016]. Данные явления достаточно часто описываются в токсикологии, радиобиологии и фармакологии, однако до последнего времени в экологии растений им уделялось мало внимания, хотя считается, что они относятся к общебиологическим и присущи всем живым организмам [Calabrese et al., 2009; Ерофеева, 2016]. Это приобретает особое значение в связи с тем, что содержание различных групп БАВ в растениях достаточно часто рекомендуют использовать для скрининга качества окружающей среды. Необходимо учитывать, что в качестве биоиндикаторов можно использовать только те метаболиты, концентрация которых изменяется однонаправленно при усилении техногенной нагрузки, иначе проявление немонотонных ответов у растений-биоиндикаторов может привести к неправильной оценке степени загрязнения среды.

Большинство исследований посвящено изучению содержания БАВ в листьях в ус-

ловиях загрязнения, при этом данные литературы указывают на неодинаковую реакцию разных органов одних и тех же растений при воздействии токсикантов [Ерофеева, 2016]. В этой связи необходима комплексная оценка химического состава разных видов растительного сырья для каждого конкретного вида растения в условиях индустриальной среды.

Перспективными объектами для исследования влияния техногенной нагрузки на химический состав являются растения рода Боярышник (*Crataegus* L.) семейства Rosaceae Juss. Они обладают высоким адаптивным потенциалом к неблагоприятным абиотическим и биотическим факторам [Козаева, 2014]. Ценность растений данного рода заключается в том, что они содержат большое количество разнообразных групп БАВ, в том числе фенольных соединений, которые считаются одними из наиболее чувствительных к загрязнению среды [Никитина и др., 2016]. На Донбассе представителем природной флоры является боярышник обманчивый (*Crataegus fallacina* Klokov). Он типичен для склонов степных балок и характеризуется значительной семенной продуктивностью [Лысенко, Яровый, 2019]. Его химический состав практически не изучен. В частности, имеются данные о значительном содержании хлорофиллов в листьях *C. fallacina*, что может быть показателем адаптационного потенциала данного растения [Юхименко, 2018].

Универсальной неспецифической реакцией на стресс является избыточное образование активных форм кислорода [Гончарук, Загоскина, 2017]. В результате в клетках может произойти окисление липидов, углеводов, белков, повреждение ДНК и РНК, дезорганизация цитоскелета [Масленников, Мельник, 2018]. Устойчивость растений к урбанизированной среде во многом определяется активностью многокомпонентной антиоксидантной системы [Радюкина, 2016]. В условиях техногенной нагрузки происходит быстрая инактивация конститутивного пула ферментов свободными радикалами, а для их индукции и синтеза необходимо значительное время. Поэтому большое значение имеют низкомолекулярные антиоксиданты клеток растений [Бухарина и др., 2013; Радюкина, 2016]. Важно не только проследить динамику содержания отдельных веществ, обладаю-

щих антиоксидантным действием, но и оценить суммарную антиоксидантную активность растительного сырья в условиях загрязнения, которая зависит не только от содержания антиоксидантов различной природы, но и от их взаимного влияния друг на друга.

Целью работы является анализ влияния техногенного загрязнения на содержание биологически активных веществ и антиоксидантную активность плодов и листьев *C. fallacina*, а также оценка экологической безопасности данного лекарственного растительного сырья.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись плоды и листья *C. fallacina*. Сбор сырья проводили в местах Донецкого региона, значительно отличающихся интенсивностью техногенной нагрузки: в природной экосистеме урочища “Балка Певчая” (относительно экологически чистая территория, выбранная в качестве контроля), в искусственной экосистеме Донецкого ботанического сада, расположенного на окраине г. Донецка (фоновый уровень загрязнения), а также в аллейном насаждении вдоль городской автотрассы с интенсивным движением г. Донецка (высокий уровень загрязнения). Заготовку сырьевой части растений проводили по мере достижения ими соответствующего фенологического состояния, согласно требованиям Государственной фармакопеи РФ [Государственная фармакопея..., 2015]. Сырье сушили естественной сушкой (воздушно-теневой). Все расчеты по содержанию различных групп БАВ приведены на абсолютно сухую массу.

Для определения содержания дубильных веществ (в пересчете на танин) в растительном сырье использовали фармакопейный титриметрический метод, количество антоцианов (в пересчете на цианидина-3-О-глюкозид) и оксикоричных кислот (в пересчете на хлорогеновую кислоту) определяли спектрофотометрически, влажность – гравиметрически [Государственная фармакопея..., 2015]. Количество флавоноидов (в пересчете на гиперозид) и каротиноидов (в пересчете на β -каротин) оценивали спектрофотометрическим методом [Куркин и др., 2017], содержание аскорбиновой и свободных органических кислот (в пересчете на лимонную кислоту) – ти-

тиметрическими методами [Государственная фармакопея..., 2008], количество процианидинов (в пересчете на цианидина хлорид) – модифицированным методом Porter [Шишова, Бузук, 2006].

О суммарной антиоксидантной активности исследуемого сырья судили по его способности ингибировать аутоокисление адреналина *in vitro* в щелочной среде и тем самым предотвращать образование активных форм кислорода [Хасанова и др., 2007]. Образцы почв отбирали из корнеобитаемого слоя на глубине 0–10 см. Экстракцию подвижных форм металлов проводили ацетатно-аммонийным буферным раствором с рН 4,8. Содержание тяжелых металлов в растительном сырье и почве определяли методом атомно-абсорбционной спектрометрии [Государственная фармакопея..., 2015]. Полученные данные обработаны статистически и представлены в виде средних арифметических значений и их стандартных ошибок. Статистическую значимость различий между содержанием БАВ в плодах и листьях *C. fallacina*, произрастающих в условиях умеренной и сильной техногенной нагрузки, с контролем определяли с помощью *t*-критерия Стьюдента. Для оценки интенсивности и степени опасности загрязнения почвы были рассчитаны коэффициент техногенной концентрации элемента (K_c) и суммарный показатель загрязнения (Z_c) [Самойленко, 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты определения содержания основных групп БАВ в плодах и листьях растений *C. fallacina*, произрастающих в условиях различного уровня промышленной нагрузки, представлены в табл. 1.

Выявлено, что в условиях техногенного загрязнения в плодах *C. fallacina* уменьшается по сравнению с контролем количество дубильных веществ, процианидинов, аскорбиновой, оксикоричных и свободных органических кислот. При этом содержание оксикоричных, аскорбиновой и свободных органических кислот максимально снижается в условиях фонового уровня загрязнения среды, а процианидинов и дубильных веществ – в условиях высокого уровня. Зависимость количества антоцианов и каротиноидов в плодах *C. fallacina* от степени техногенной нагрузки является

Влияние уровня загрязнения на содержание основных групп биологически активных веществ в плодах и листьях *Crataegus fallacina* Klokov (в %, в пересчете на абсолютно сухое сырье)

Группа биологически активных веществ	Место сбора сырья		
	Высокий уровень загрязнения	Фоновый уровень загрязнения	Контроль
Плоды			
Флавоноиды (в пересчете на гиперозид)	0,40 ± 0,02***	0,37 ± 0,01***	0,24 ± 0,02
Дубильные вещества (в пересчете на танин)	5,62 ± 0,30***	7,08 ± 0,30***	12,81 ± 0,50
Свободные органические кислоты (в пересчете на лимонную кислоту)	11,96 ± 0,21*	10,00 ± 0,18***	12,78 ± 0,25
Аскорбиновая кислота	0,12 ± 0,01**	0,060 ± 0,003***	0,17 ± 0,01
Процианидины (в пересчете на цианидина хлорид)	0,66 ± 0,03***	1,99 ± 0,04***	2,41 ± 0,04
Оксикоричные кислоты (в пересчете на хлорогеновую кислоту)	0,72 ± 0,03***	0,16 ± 0,01***	1,14 ± 0,02
Антоцианы (в пересчете на цианидина-3-О-глюкозид)	5,46 ± 0,10*	2,34 ± 0,30***	4,99 ± 0,10
Каротиноиды (в мг%, в пересчете на β-каротин)	0,080 ± 0,005**	0,040 ± 0,002***	0,060 ± 0,001
Листья			
Флавоноиды (в пересчете на гиперозид)	2,03 ± 0,05***	1,83 ± 0,03***	1,53 ± 0,02
Дубильные вещества (в пересчете на танин)	15,65 ± 0,30***	8,57 ± 0,10***	6,53 ± 0,10
Свободные органические кислоты (в пересчете на лимонную кислоту)	14,00 ± 0,33***	15,02 ± 0,11***	10,75 ± 0,28
Аскорбиновая кислота	0,54 ± 0,02	0,72 ± 0,02***	0,50 ± 0,02
Процианидины (в пересчете на цианидина хлорид)	0,46 ± 0,02	0,72 ± 0,03***	0,43 ± 0,02
Оксикоричные кислоты (в пересчете на хлорогеновую кислоту)	3,43 ± 0,08***	3,10 ± 0,10***	1,56 ± 0,10
Антоцианы (в пересчете на цианидина-3-О-глюкозид)	4,30 ± 0,20	5,10 ± 0,20**	4,02 ± 0,10
Каротиноиды (в мг%, в пересчете на β-каротин)	0,14 ± 0,01**	0,16 ± 0,01	0,19 ± 0,01

П р и м е ч а н и е. Достоверность различий с контролем: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$.

неоднозначной. В условиях умеренного загрязнения содержание данных веществ снижается, в условиях высокого – достоверно превышает контроль. В отличие от остальных исследуемых соединений, содержание флавоноидов в плодах *C. fallacina* с усилением техногенного загрязнения достоверно повышается (в условиях высокого уровня загрязнения – в 1,7 раза превышает контроль).

В листьях *C. fallacina* содержание всех исследуемых БАВ, за исключением каротиноидов, повышается в условиях урбанизированной среды по сравнению с контролем, что, вероятно, обусловлено участием данных метаболитов в адаптации растений к условиям загрязнения.

Для оценки комплексного воздействия городской среды на *C. fallacina* проведена оценка суммарной антиоксидантной активности вод-

ных извлечений из данного сырья, которая зависит не только от содержания антиоксидантов различной природы, но и от их взаимного влияния друг на друга. Антиоксидантную активность выражали в процентах ингибирования аутоокисления адреналина (табл. 2). Согласно литературным данным, если данный показатель превышает 10 %, можно говорить о наличии антиоксидантной активности у исследуемого сырья [Рябинина и др., 2011].

Как видно из табл. 2, все исследуемое сырье обладает высокой антиоксидантной активностью, которая повышается в условиях техногенного загрязнения. Максимальная активность выявлена для листьев растений *C. fallacina*, произрастающих в условиях фонового уровня загрязнения, минимальная – для плодов и листьев *C. fallacina* зоны условного контроля.

Антиоксидантная активность сырья *Crataegus fallacina* Клоков в зависимости от времени экспозиции

Исследуемое сырье	Уровень загрязнения	Антиоксидантная активность, %		
		3 мин	5 мин	7 мин
Листья	Контроль	36,01 ± 0,33	38,18 ± 0,30	44,84 ± 0,28
	Фоновый	48,54 ± 0,11***	51,48 ± 0,92***	55,92 ± 0,40***
	Высокий	43,13 ± 0,24***	49,75 ± 0,41***	52,00 ± 0,14***
Плоды	Контроль	32,28 ± 0,52	36,86 ± 0,34	39,91 ± 0,13
	Фоновый	45,62 ± 0,37***	48,92 ± 0,21***	49,25 ± 0,82***
	Высокий	43,51 ± 0,40***	49,64 ± 0,72***	51,33 ± 0,71***

Примечание. Достоверность различий с контролем: *** – $p < 0,001$.

В соответствии с требованием нормативной документации Российской Федерации для оценки экологической безопасности лекарственного растительного сырья в нем определяют содержание таких тяжелых металлов, как свинец, кадмий и ртуть [Государственная фармакопея..., 2015]. Содержание данных токсикантов в растениях во многом зависит от концентрации их подвижных форм в почве. В табл. 3 представлены результаты определения содержания подвижных форм тяжелых

металлов в почвах исследуемых зон Донецкого региона.

В табл. 4 приведены результаты определения содержания тяжелых металлов в плодах и листьях *C. fallacina*.

Концентрация тяжелых металлов в сырье *C. fallacina* увеличивается в условиях техногенного загрязнения. Следует отметить, что содержание всех анализируемых тяжелых металлов в листьях *C. fallacina* значительно превышает их содержание в плодах. Наиболь-

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах исследуемых зон Донецкого региона

Уровень загрязнения	Содержание тяжелых металлов в почве, мг/кг		
	Pb	Cd	Hg
Контроль	0,1 ± 0,001	0,3 ± 0,002	Менее 0,01
Фоновый уровень загрязнения	0,3 ± 0,001	0,6 ± 0,002	»
Высокий уровень загрязнения	1,6 ± 0,002	0,9 ± 0,006	»
Предельно допустимое содержание [Гигиенические нормативы..., 2006]	6,0	–	–

Содержание тяжелых металлов в сырье *Crataegus fallacina* Клоков

Исследуемое сырье	Уровень загрязнения	Содержание тяжелых металлов, мг/кг		
		Pb	Cd	Hg
Листья	Контроль	Менее 0,1	0,030 ± 0,001	0,036 ± 0,001
	Фоновый	»	0,050 ± 0,002	0,041 ± 0,002
	Высокий	0,3 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,041 ± 0,001
Плоды	Контроль	Менее 0,1	0,020 ± 0,001	0,022 ± 0,001
	Фоновый	»	0,030 ± 0,002	0,025 ± 0,002
	Высокий	»	0,100 ± 0,005	0,024 ± 0,001
Предельно допустимое содержание тяжелых металлов в лекарственном растительном сырье [Государственная фармакопея..., 2015]		6,0	1,0	0,1

шая разница с контролем отмечена для содержания кадмия как для листьев (в условиях высокого уровня загрязнения – в 4 раза превышает контроль), так и для плодов (в условиях высокого уровня загрязнения – в 5 раз превышает контроль).

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленное снижение в условиях техногенного загрязнения концентрации таких БАВ, как дубильные вещества, процианидины, аскорбиновая, оксикоричные и свободные органические кислоты в плодах *C. fallacina*, вероятно, можно объяснить угнетением биосинтеза данных метаболитов, а также их расходованием на нейтрализацию свободных радикалов, что согласуется с литературными данными [Sandre et al., 2014; Hellenbrand et al., 2015]. Наиболее значительно уменьшается количество процианидинов в листьях *C. fallacina* при возрастании степени загрязнения, что обуславливает возможность использования данного показателя для скрининга уровня техногенной нагрузки на растения.

Выявленная двухфазная зависимость для концентрации антоцианов и каротиноидов в плодах *C. fallacina* в условиях загрязнения среды (снижение их содержания при умеренной техногенной нагрузке и увеличение – при сильной), по-видимому, обусловлена способностью растений функционировать в нескольких адаптационных режимах в зависимости от силы стрессового фактора. Аналогичная зависимость описана Е. А. Ерофеевой для содержания фотосинтетических пигментов *Betula pendula* Roth, *Taraxacum officinale* Wigg., *Triticum aestivum* L. в условиях загрязнения [Ерофеева, 2016]. По мнению автора, немонотонные зависимости более характерны для веществ, непосредственно участвующих в адаптации растений к условиям среды.

Повышение концентрации флавоноидов в плодах *C. fallacina* при усилении уровня техногенного загрязнения согласуется с литературными данными, характеризующими увеличение количества флавоноидов как неспецифическую защитную реакцию растения на стресс [Петухов и др., 2019; Santiago et al., 2000]. Вероятно, это связано с антиоксидантными свойствами флавоноидов, а также их способностью сорбироваться на мембранах

клеток, создавая стерические затруднения для их дальнейшего окисления под действием тяжелых металлов. Выявленное увеличение количества флавоноидов может быть связано и с гидролизом их гликозидной формы в условиях загрязнения [Петухов и др., 2019].

В листьях *C. fallacina* максимальное количество аскорбиновой кислоты, свободных органических кислот и таких фенольных соединений, как процианидины и антоцианы, выявлено в условиях фонового уровня техногенной нагрузки, при дальнейшем возрастании степени загрязнения концентрация данных метаболитов уменьшается. По-видимому, это обусловлено исчерпанием адаптационных возможностей систем с участием данных веществ. Максимальное количество других фенольных соединений (флавоноидов, оксикоричных кислот и дубильных веществ) выявлено в листьях растений *C. fallacina*, произрастающих на территории, испытывающей сильную техногенную нагрузку. Вероятно, в данных условиях эти метаболиты компенсируют недостаток других эндогенных низкомолекулярных антиоксидантов. В отличие от других исследуемых соединений, количество каротиноидов в листьях *C. fallacina* в условиях загрязнения уменьшается, что согласуется с литературными данными, свидетельствующими об угнетении биосинтеза фотосинтетических пигментов под действием тяжелых металлов [Неверова и др., 2007; Бухарина и др., 2013].

Растения рода *Crataegus* L. достаточно часто используются в медицине, препараты на основе сырья боярышника известны как седативные и сердечно-сосудистые средства [Orhan, 2018; Морозова, 2019; Moustafa et al., 2019]. Для оценки перспективности использования сырья *C. fallacina* для изготовления лекарственных препаратов нами проанализировано соответствие данного сырья требованиям нормативной документации разных стран. Так как до сих пор нет единого мнения, какая группа БАВ боярышника является основной действующей, в разных странах нормируются различные группы веществ в его сырье. Выявлено, что все исследуемые образцы плодов *C. fallacina* соответствуют требованиям Государственной фармакопеи Российской Федерации (не менее 0,06 % флавоноидов), Европейской (не менее 1 % процианидинов)

и Китайской фармакопей (не менее 5 % суммы органических кислот) [Pharmacopoeia..., 2005; European pharmacopoeia..., 2010; Государственная фармакопея..., 2015]. Исключение составляют плоды, собранные в условиях высокого уровня загрязнения, – они не удовлетворяют требованиям Европейской фармакопей по содержанию процианидинов.

Хотя в Российской Федерации разрешенным сырьем боярышника являются только плоды, за рубежом также разрешены к применению его листья, преимущество которых является возможность более длительного сбора сырья [Монографии ВОЗ..., 2010; Куркин и др., 2017; Orhan, 2018]. Выявлено, что все исследуемые образцы листьев *S. fallacina* удовлетворяют требованиям Европейской фармакопей и Монографии ВОЗ (не менее 1,5 % флавоноидов), а также Китайской фармакопей (не менее 0,05 % флавоноидов) [Pharmacopoeia..., 2005; Монографии ВОЗ..., 2010; European pharmacopoeia..., 2010]. Кроме того, экспериментально выявлено, что плоды и листья содержат значительное количество и других БАВ, таких как дубильные вещества, антоцианы и оксикоричные кислоты, сравнимое с содержанием данных веществ в растениях, используемых в официальной медицине Российской Федерации в качестве их источников. Следовательно, можно прогнозировать противовоспалительное, вяжущее, антимикробное и иммуностимулирующее действие для лекарственных препаратов, изготовленных на основе листьев и плодов *S. fallacina*.

Значительный вклад в лечебное действие растительного сырья вносит его антиоксидантная активность. Полученные результаты оценки суммарной антиоксидантной активности листьев и плодов *S. fallacina* обуславливают перспективность их использования в качестве источника пищевых антиоксидантов. Выявленное повышение антиоксидантной активности в условиях промышленной трансформации среды, вероятно, результат активизации антиоксидантной системы растений для нейтрализации последствий окислительного стресса. По всей видимости, это свидетельствует о достаточной устойчивости *S. fallacina* к условиям техногенного загрязнения, чем объясняется отсутствие видимых повреждений у исследуемых растений.

Как видно из табл. 3, содержание подвижных форм свинца в почвах урбанизированной территории значительно выше содержания данного токсиканта в почве условного контроля (для умеренного уровня загрязнения – в 3 раза, высокого – в 16 раз). При этом концентрация данного токсиканта во всех исследуемых образцах соответствует первой группе по загрязненности почв, т. е. не превышает 0,5 ПДК [Методические указания..., 2003]. Это может быть обусловлено тем, что исследуемые почвы являются черноземами, именно этот тип почвы наиболее прочно связывает тяжелые металлы и характеризуется низким значением содержания подвижных форм.

На данный момент отсутствуют общепринятые ПДК для подвижных форм кадмия и ртути. Различными авторами предлагаются следующие значения ПДК для кадмия: 0,2 мг/кг [Шабанова, Занозина, 2016]; 0,3 мг/кг [Забашта и др., 2019]; 0,5 мг/кг [Троц, Троц, 2014]; 0,7 мг/кг [Лукин и др., 2000]. В таком случае для оценки степени загрязнения почв тяжелыми металлами целесообразно проводить сравнение с фоновым содержанием. Данные по фоновому содержанию подвижной формы кадмия в почвах Донецкого региона в доступной литературе отсутствуют, поэтому сравнивали с зоной условного контроля. Содержание подвижной формы кадмия в почвах городской среды превышает контрольное значение в 2 (умеренная техногенная нагрузка) и 3 (сильная техногенная нагрузка) раза. Ю. Н. Водяницкий для оценки загрязнения почв в России теми элементами, для которых нормативов ПДК для подвижных форм нет, предлагает использовать вычисленные нидерландскими экологами значения ПДП (предельно допустимое превышение) [Водяницкий, 2012]. Для Cd этот показатель составляет 0,76 мг/кг. Содержание кадмия в почве автотрассы г. Донецка с интенсивным движением превышает данный показатель.

Были рассчитаны коэффициенты техногенной концентрации, которые показывают особенности накопления тяжелых металлов в почвах. Чем больше Кс превышает единицу – тем выше опасность загрязнения. Данный коэффициент значительно возрастает с усилением техногенной нагрузки (Кс по кадмию в условиях умеренной техногенной нагрузки составляет 2, в условиях сильной техноген-

ной нагрузки – 3; по свинцу – 3 и 16 соответственно). Суммарный показатель загрязнения для почв в условиях умеренной техногенной нагрузки равен 4, что позволяет отнести данные почвы к категории допустимых по степени загрязнения. Данный показатель для почв в условиях сильной техногенной нагрузки составляет 18, что соответствует категории умеренно опасных (средний уровень загрязнения).

Более высокое содержание тяжелых металлов в листьях *C. fallacina* по сравнению с плодами, по всей видимости, объясняется тем, что листья являются более метаболически активными органами растений, имеют широкую поверхность обмена с окружающим воздухом и более проницаемы для атмосферных примесей, чем плоды. Однако и в листьях, и в плодах растений *C. fallacina*, произрастающих в условиях различного уровня техногенного загрязнения в Донецком регионе, содержание тяжелых металлов находится в пределах допустимых значений для лекарственного растительного сырья, что свидетельствует об его экологической безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях урбанизированной среды в листьях *C. fallacina* выявлено повышение содержания всех изученных биологически активных веществ, за исключением каротиноидов. В плодах *C. fallacina* в условиях загрязнения обнаружено снижение содержания дубильных веществ, процианидинов, аскорбиновой, оксикоричных и свободных органических кислот и, напротив, повышение количества флавоноидов. Для содержания каротиноидов и антоцианов в плодах выявлены неоднозначные зависимости от уровня загрязнения: их концентрация при умеренной техногенной нагрузке уменьшается, а при сильной – достоверно превышает контроль. Вероятно, это обусловлено способностью *C. fallacina* функционировать в нескольких адаптационных режимах в зависимости от степени загрязнения. Наиболее существенно в условиях загрязнения изменяется содержание в листьях дубильных веществ (более чем в 2,1 раза), а в плодах – процианидинов (более чем в 3,5 раза). Это свидетельствует о целесообразности применения данных показателей в биоиндикационных целях.

Выявлена высокая антиоксидантная активность плодов и листьев растений *C. fallacina*, произрастающих в Донецком регионе, причем она повышается в условиях техногенной среды. Максимальная антиоксидантная активность характерна для листьев *C. fallacina*, собранных в условиях фонового уровня загрязнения.

Плоды и листья растений ранее малоизученного вида *C. fallacina*, произрастающих на Донбассе, соответствуют требованиям нормативной документации по содержанию действующих веществ (процианидинов, флавоноидов, органических кислот). Кроме того, в исследуемом сырье выявлено значительное содержание дубильных веществ, антоцианов и оксикоричных кислот. Полученные результаты обуславливают его ценность в медицинской практике. Содержание тяжелых металлов в плодах и листьях *C. fallacina* не превышает предельно допустимые концентрации (в соответствии с требованиями безопасности, принятыми в Российской Федерации). Это делает возможным его использование для нужд фармации нашего региона с целью импортозамещения.

ЛИТЕРАТУРА

- Бухарина И. Л., Кузьмин П. А., Гибадулина И. И. Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях древесных растений в условиях городской среды (на примере г. Набережные Челны) // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2013. № 1. С. 20–25.
- Водяницкий Ю. Н. Нормативы содержания тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Почвоведение. 2012. № 3. С. 368–379.
- Галина А. Т. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астрахан. вестн. экол. образования. 2013. № 1 (23). С. 182–192.
- Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. (Утв. Гл. гос. сан. врачом Российской Федерации 23.01.2006 г.). [Электронный ресурс] http://www.nr-ciz.ru/userfiles/2_1_7_2041-06.pdf (дата обращения: 24.03.2020).
- Глухов А. З., Хархота Л. В., Пастернак Г. А., Лихацкая Е. Н. Современное состояние дендрофлоры города Донецка // Самар. науч. вестн. 2016. № 2 (15). С. 20–24.
- Гончарук Е. А., Загоскина Н. В. Тяжелые металлы: поступление, токсичность и защитные механизмы растений (на примере ионов кадмия) // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія Біологія. 2017. Вып. 1 (40). С. 35–49.
- Государственная фармакопея Республики Беларусь. Т. 2 / УП “Центр экспертиз и испытаний в здравоохранении” / под общ. ред. А. А. Шерякова. Молодечино: Победа, 2008. 472 с.

- Государственная фармакопея Российской Федерации: XIII изд. ФЭМБ. Москва, 2015. URL: <http://pharmacopoeia.ru/gosudarstvennaya-farmakopeya-xiii-online-gf-13-online/> (дата обращения: 17.09.2019).
- Ерофеева Е. А. Гормезис и парадоксальные эффекты у растений в условиях автотранспортного загрязнения и при действии поллютантов в эксперименте: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Нижний Новгород, 2016. 45 с.
- Забашта А. В., Забашта Н. Н., Лисовицкая Е. П. Накопление тяжелых металлов в почвах предгорных районов Краснодарского края // Вест. Казан. ГАУ. 2019. № 1 (52). С. 22–26.
- Зарипова Р. С., Кузьмин П. А. Влияние антропогенного стресса на динамику аскорбиновой кислоты в растениях // Инновац. наука. 2015. № 5. С. 24–27.
- Зубарева Е. В. Влияние автотранспорта на содержание аскорбиновой кислоты в хвое сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях г. Красноярска // Вестн. КрасГАУ. 2017. № 5 (128). С. 131–136.
- Козаева М. И. Адаптационная способность различных видов *Crataegus* и *Amelanchier* в условиях абиотических и биотических стрессов // Aust. J. Techn. Nat. Sci. 2014. N 7–8. С. 84–85.
- Кригер Н. В., Козлов М. А., Баранов Е. С. Влияние техногенной нагрузки на содержание аскорбиновой кислоты в листьях древесных растений, произрастающих в разных районах города Красноярска // Вестн. КрасГАУ. 2013. № 10 (85). С. 116–119.
- Куркин В. А., Морозова Т. В., Правдивцева О. Е. Исследования по разработке методики стандартизации листьев боярышника кроваво-красного // Химия раст. сырья. 2017. № 3. С. 169–173. DOI: 10.14258/jcprm.2017031286 [Kurkin V. A., Morozova T. V., Pravdivtseva O. Ye. Studies on the development of the methodic of standardization of leaves of *Crataegus sanguinea* Pall. // Rus. J. Bioorg. Chem. 2017. N 3. P. 169–173. doi: 10.14258/jcprm.2017031286].
- Лукин С. В., Лисецкий Ф. Н., Явтушенко В. Е. Нормирование содержания тяжелых металлов в черноземе // Вестн. Рос. акад. с.-х. наук. 2000. № 4. С. 68–69.
- Лысенко Г. Н., Яровый С. С. Динамика растительного покрова петрофитных (на гранитах) разнотравно-типчаково-ковыльных степей “Каменных могил” (Донецкая область, Украина) в условиях абсолютной заповедности // Вопр. степеведения. 2019. № XV. С. 189–191. doi: 10.2441/9999-006A-2019-11529
- Масленников П. В., Мельник А. С. Роль полифенолов в формировании антиоксидантного потенциала городских растений в условиях техногенного почвенного загрязнения // Фенольные соединения: функциональная роль в растениях: сб. науч. ст. по материалам X Междунар. симп. “Фенольные соединения: фундаментальные и прикладные аспекты”. М., 2018. С. 278–282.
- Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения / под ред. Л. М. Державина, Д. С. Булгакова. М.: ФГНУ “Росинформарготех”, 2003. 240 с.
- Монографии ВОЗ о лекарственных растениях, широко используемых в Новых независимых государствах (ННГ). Франция: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data; Всемирная организация здравоохранения, 2010. 455 с.
- Морозова Т. В. Фармакогностическое исследование некоторых видов боярышника (*Crataegus* L.): автореф. дис. ... канд. фарм. наук. Самара, 2019. 23 с.
- Неверова О. А., Цандекова О. Л. Оценка возможности использования количественных характеристик пигментного комплекса древесных растений в индикации загрязнения городской среды // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2007. № 6. С. 103–105.
- Никитина В. С., Аюпова Р. Н., Яминева Э. З. Фенольные соединения высших растений и диагностика состояния окружающей среды // Вестн. Башкир. ун-та. 2016. Т. 21, № 2. С. 303–307.
- Охотникова М. В. Гигиеническая оценка экологической среды городов индустриализированного региона и ее роли в формировании здоровья населения: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Донецк, 2017. 23 с.
- Параскевопуло М. Ф., Сунцова Л. Н., Иншаков Е. М. Изучение пигментного состава некоторых видов древесных растений в условиях техногенного загрязнения города Красноярска // Хвойные бореальной зоны. 2017. Том XXXV, № 1–2. С. 54–59.
- Петухов А. С., Хритохин Н. А., Петухова Г. А., Кремлева Т. А. Фенольная система защиты растений в условиях загрязнения среды г. Тюмени тяжелыми металлами // Уч. зап. Казан. ун-та. Серия. Естественные науки. 2019. Т. 161, кн. 1. С. 93–107. doi: 10.26907/2542-064X.2019.1.93-107 [Petukhov A. S., Khritokhin N. A., Petukhova G. A., Kremleva T. A. Phenolic plant defense system under conditions of environment pollution by heavy metals in Tyumen // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki. 2019, vol. 161. P. 93–107. doi: 10.26907/2542-064X.2019.1.93-107].
- Радюкина Н. Л. Функционирование антиоксидантной системы дикорастущих видов растений при кратковременном действии стрессоров: дис. ... д-ра биол. наук. Нижний Новгород, 2016. 207 с.
- Рябинина Е. И., Зотова Е. Е., Ветрова Е. Н., Пономарева Н. И., Илюшина Т. Н. Новый подход к оценке антиоксидантной активности растительного сырья при исследовании процесса аутоокисления адреналина // Химия раст. сырья. 2011. № 3. С. 117–121.
- Рябухина М. В. Содержание аскорбиновой кислоты – информативный показатель мониторинга окружающей среды крупных промышленных центров (на примере г. Оренбурга) // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2011. № 2 (30). С. 231–233.
- Самойленко Г. Ю. Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в почвах, сопряженных средах и дикорастущих растениях из экосистем в условиях урбанизированной территории Восточного Забайкалья: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Томск, 2020. 20 с.
- Скворцова Т. А. Содержание тяжелых металлов в плодах *Rosa majalis* Herrm., произрастающего в парковых зонах города Оренбурга // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. 2017. № 8 (208). С. 80–83.
- Скочилова Е. А., Закамская Е. С. Изучение биохимических показателей *Betula pendula* Roth. в условиях городской среды // Изв. Самар. науч. центра РАН. 2013. Т. 15, № 3 (2). С. 782–784.
- Троц В. Б., Троц Н. М. Аккумуляция тяжелых металлов черноземами самарского Заволжья // Изв. Оренбург. гос. аграр. ун-та. 2014. № 1 (45). С. 141–144.
- Ханина М. А., Гусельников Е. Н., Родин А. П., Лигостаева Ю. В. Загрязнение окружающей среды и биологически активные вещества листьев березы // J. Sib. Med. Sci. 2015. № 6. P. 121–132.

- Хасанова С. Р., Плеханова Т. И., Гашимова Д. Т., Галиахметова Э. Х., Клыш Е. А. Сравнительное изучение антиоксидантной активности растительных сборов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2007. № 1. С. 163–166.
- Хишова О. М., Бузук Г. Н. Количественное определение процианидинов плодов боярышника // Хим.-фармацевт. журн. 2006. Т. 40, № 2. С. 19–21. doi: 10.30906/0023-1134-2006-40-2-20-21 [Khishova O. M., Buzuk G. N. Quantitative determination of procyanidins in hawthorn fruit // Pharmac. Chem. J. 2006. N 2. P. 19–21. doi: 10.30906/0023-1134-2006-40-2-20-21].
- Шабанова И. В., Занозина О. Д. К вопросу об актуальности эколого-токсикологического обследования чернозема выщелоченного Кубани на загрязнение тяжелыми металлами // Науч. альманах. 2016. № 4-4(18). С. 35–38. doi: 10.17117/na.2016.04.04.035
- Юхименко Ю. С. Сезонная динамика содержания пигментов в листьях растений рода *Crataegus* L. в Криворожье (Днепропетровская область, Украина) // Sci. and World. 2018. Vol. 2, N 2 (54). С. 14–17.
- Calabrese E. J., Robyn B., Blain R. B. Hormesis and plant biology // Environ. Pollut. 2009. Vol. 157. P. 42–48. doi: 10.1016/j.envpol.2008.07.028
- European pharmacopoeia: 7-th ed. Vol. 1. Strasbourg, France, 2010. 1297 p.
- Hadacek F., Bachmann G., Engelmeier D., Chobot V. Hormesis and chemical raison d'être for secondary plant metabolites // Dose-response: a publication of International Hormesis Society. 2011. Vol. 9. P. 79–116. doi: 10.2203/dose-response.09-028.Hadacek
- Hellenbrand N., Sendker J., Lechtenberg M., Peterleit F., Hensel A. Isolation and quantification of oligomeric and polymeric procyanidins in leaves and flowers of Hawthorn (*Crataegus* spp.) // Fitoterapia. 2015. Vol. 104. P. 14–22. doi: 10.1016/j.fitote.2015.04.010
- Moustafa A. A., Zaghrou M. S., Mansour S. R., Alotaibi M. Conservation Strategy for protecting *Crataegus* x *sinica* against climate change and anthropologic activities in South Sinai Mountains, Egypt // CATRINA. Int. J. Environ. Sci. 2019. N 18 (1). P. 1–6. doi: 10.12816/CAT.2019.28577
- Orhan I. E. Phytochemical and pharmacological activity profile of *Crataegus oxyacantha* L. (hawthorn) – a cardiotonic herb // Cur. Med. Chem. 2018. Vol. 25, N 37. P. 4854–4865. doi: 10.2174/0929867323666160919095519
- Pharmacopoeia of the people's republic of China. Vol. 1. Peoples medical publishing house, 2005. 975 p.
- Sandre A. A., Pina J. M., Moraes R. M., Furlan C. M. Anthocyanins and tannins: is the urban air pollution an elicitor factor? // Brazilian J. Bot. 2014. N 37 (9). P. 1–11. doi: 10.1007/s40415-013-0043-0
- Santiago L. J., Louro R. P., Oliveira D. E. Compartmentation of phenolic compounds and phenylalanine ammonia-lyase in leaves of *Phyllanthus tenellus* Roxb. and their induction by copper sulphate // Ann. Bot. 2000. Vol. 86. P. 1023–1032. doi: 10.1006/anbo.2000.1271

Ecological and phytochemical features of *Crataegus fallacina* Klov in conditions of technogenic pollution

N. A. VINOGRADOVA, A. Z. GLUKHOV

State Institution “Donetsk Botanical Garden”
283059, Donetsk, Ilyich av., 110
E-mail: Arina0@meta.ua

The article presents an analysis of the influence of technogenic pollution on the content of the main groups of biologically active substances (flavonoids, anthocyanins, oxycinnamic acids, procyanidins, tannins, carotenoids, ascorbic and free organic acids) in the fruits and leaves of the representative of the natural flora of Donetsk region *Crataegus fallacina* Klov. The content of heavy metals such as cadmium, lead, mercury in the soil (mobile forms) and plant materials was determined, and the environmental safety of the raw materials was evaluated. It was revealed that a significant increase in the content of tannins in the leaves of *C. fallacina*, as well as a decrease in the content of procyanidins in the fruits in anthropogenic conditions, can be recommended for screening the degree of impact of an urbanized environment on plants. The conformity of the raw materials of *C. fallacina* to the requirements of the regulatory documents for the content of active substances was evaluated. It was shown that this raw material has a high antioxidant activity, which increases in conditions of pollution.

Key words: *Crataegus fallacina* Klov; technogenic pollution; antioxidant activity, heavy metals; biologically active substances.