

АНТРОПОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА РАСТИТЕЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ

ВЛИЯНИЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ НА РАСТЕНИЯ *PHLEUM PRATENSE* (POACEAE) В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОЙ КАРЕЛИИ

© 2021 г. Г. Ф. Лайдинен¹, Н. М. Казнина¹, *, Ю. В. Батова¹, А. Ф. Титов¹

¹ Институт биологии ФИЦ “Карельский научный центр Российской академии наук”, г. Петрозаводск, Россия

*e-mail: kaznina@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 29.03.2021 г.

После доработки 14.04.2021 г.

Принята к публикации 14.09.2021 г.

Изучено влияние промышленного загрязнения почвы тяжелыми металлами на растения *Phleum pratense* L., произрастающих на разном расстоянии (0.5, 4 и 8 км) от Костомукшского горнообогатительного комбината (Костомукшского ГОКа), находящегося в северной части Республики Карелия. Определено содержание меди, никеля, свинца, цинка в корнях и побегах растений. Установлено, что в условиях Севера вид *P. pratense* способен успешно произрастать на территориях с высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами, сохраняя свое положение содоминанта в растительном сообществе. Успешный рост и развитие растений в этих условиях обеспечивается рядом адаптационных механизмов, среди которых: увеличение содержания фотосинтетических пигментов при уменьшении площади листьев, что обеспечивает поддержание активной работы фотосинтетического аппарата; сохранение размеров соцветия даже на наиболее загрязненных участках, гарантирующее высокую семенную продуктивность растений. На уровне ценопопуляций зафиксировано усиление их гетерогенности, которое, в частности, находит свое выражение в высоком уровне внутрипопуляционной изменчивости таких признаков, как площадь листа и длина соцветия. При этом растения *P. pratense* способны накапливать высокие концентрации тяжелых металлов в корнях, превышающие их содержание у других видов растений. В целом полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности и перспективности использования *P. pratense* для восстановления загрязненных тяжелыми металлами северных территорий, включая территории, относящиеся к Арктической зоне.

Ключевые слова: *Phleum pratense*, тяжелые металлы, рост, внутрипопуляционная изменчивость морфологических признаков, фотосинтетические пигменты, адаптация

DOI: 10.31857/S0033994621040063

Промышленное загрязнение почв тяжелыми металлами является одной из наиболее острых экологических проблем современности. Накапливаясь в окружающей среде, они не только оказывают сильное отрицательное воздействие на живые организмы, но и наносят серьезный ущерб состоянию целых биоценозов, иногда приводя к их полной деградации [1–3]. У растений тяжелые металлы замедляют рост и развитие, нарушают протекание основных физиологических процессов, тормозят накопление биомассы подземных и надземных органов. В результате на загрязненных территориях снижается продуктивность фитоценозов, уменьшается видовое разнообразие из-за утраты менее металлоустойчивых видов. Особую актуальность вопросы промышленного загрязнения тяжелыми металлами приобретают в условиях Севера, поскольку северные фитоценозы отличаются высокой чувствительностью к различным за-

грязнителям, а их естественное восстановление происходит очень медленно и в нем участвует ограниченное число видов растений [4, 5].

Известно, что в восстановлении растительности на загрязненных тяжелыми металлами почвах важную роль играют многолетние злаки, которые характеризуются высокой ценотической активностью и повышенной устойчивостью к различным неблагоприятным факторам внешней среды [6, 7]. Обычно на загрязненных участках в роли доминантов и содоминантов выступают представители родов *Alopecurus*, *Calamagrostis*, *Deschampsia*, *Festuca* и *Poa* [8]. Способность этих злаков к кушению и формированию дернины позволяет им успешно осваивать нарушенные загрязнением территории [9]. Тимофеевка луговая *Phleum pratense* L. также способна успешно расти на загрязненных участках [10–12]. Помимо низкой требовательности к плодородию почв она харак-

теризуется еще и высокой холодо- и морозоустойчивостью, а ее семена способны к прорастанию уже при температуре 4–5 °С, что особенно важно для условий Севера [13]. Однако данных о состоянии *P. pratense* на загрязненных тяжелыми металлами территориях, расположенных в северных регионах, практически нет, хотя такого рода сведения представляют большой интерес с точки зрения возможного использования этого вида для восстановления северных территорий, загрязненных тяжелыми металлами, в том числе территорий, входящих в Арктическую зону.

Для Республики Карелия в целом характерно относительно низкое загрязнение почв тяжелыми металлами. Однако вблизи промышленных предприятий и крупных транспортных магистралей их содержание в воздухе, воде и почве заметно повышается [14]. На севере Карелии в Арктической зоне Российской Федерации расположен один из крупнейших комбинатов по переработке железорудного сырья – Костомукшский горно-обогательный комбинат ОАО “Карельский окатыш” (Костомукшский ГОК). В его атмосферных выбросах значительную часть составляют диоксид серы и полиметаллическая пыль с повышенным содержанием железа, кобальта, меди, никеля и цинка [15–17]. Кроме того, вблизи и на территории предприятия обнаружено загрязнение свинцом.

Исходя из этого, задача данного исследования состояла в изучении содержания тяжелых металлов в подземных и надземных органах *Phleum pratense* и оценке состояния растений на участках, расположенных на разном расстоянии от Костомукшского ГОКа.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на участках, расположенных на расстоянии 0.5, 4 и 8 км к северо-востоку от Костомукшского ГОКа по направлению господствующих ветров. На всех изученных участках растительный покров является вторичным и представляет собой луговидные сообщества, сформировавшиеся на месте нарушенных северотаежных хвойных лесов на иллювиально-гумусово-железистых подзолах [15]. В 0.5 и 4 км от ГОКа луговидные сообщества являются злаково-бобово-разнотравными, а в 8 км – разнотравно-злаковыми. Общее проективное покрытие составляет 70–83%. *P. pratense* произрастает на всех участках и занимает содоминирующее положение. В качестве содоминантов выступают также – *Dactylis glomerata* L., *Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv., *Poa pratensis* L. (Poaceae), *Lotus corniculatus* L. и *Trifolium pratense* L. (Fabaceae), *Tussilago farfara* L. (Asteraceae), *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. (Onagraceae), *Galium album* Mill. (Rubiaceae).

Для анализа содержания меди, никеля, свинца и цинка в почвенных образцах и в органах растений на каждом участке методом конверта закладывали по 5 учетных площадок (1 × 1 м). С каждой учетной площадки отбирали индивидуальные почвенные пробы, взятые на глубину до 10 см, из которых затем составляли один почвенный образец [18]. Для определения содержания тяжелых металлов в органах *P. pratense* с каждой учетной площадки отбирали по 4 растения, из которых были составлены смешанные образцы корней и побегов. Для оценки способности *P. pratense* к накоплению тяжелых металлов по сравнению с растениями других видов на наиболее загрязненном участке (в 0.5 км от ГОКа) оценивали содержание тяжелых металлов у представителей семейства Asteraceae – *T. farfara* L. и *Taraxacum officinale* Wigg. и семейства Fabaceae – *Lathyrus pratensis* L. Растительные образцы для химического анализа отбирались на тех же учетных площадках. Анализ почвенных и растительных образцов проводили атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре AA-6800 (Shimadzu, Япония).

Для оценки состояния растений *P. pratense* на каждом участке в фазу цветения отбирали по 20 растений (по 4 с каждой учетной площадки), у которых измеряли высоту наиболее развитого генеративного побега, площадь подфлагового листа, длину соцветия, а также оценивали уровень изменчивости этих признаков. Помимо этого, в листьях определяли содержание фотосинтетических пигментов. Площадь листовой пластинки вычисляли по формуле:

$$S = 2/3ld ,$$

где l – длина, d – ширина листовой пластинки [19]. Уровень изменчивости оценивали по величине коэффициента вариации (V , %) в соответствии со шкалой С.А. Мамаева [20]. Содержание хлорофиллов (a и b) и каротиноидов определяли с помощью спектрофотометра СФ-2000 (“Спектр”, Россия), экстрагируя их 80% ацетоном [21].

Математическую обработку полученных результатов проводили с помощью программы “Excel”. В табл. 1 и 2 представлены средние значения и их относительная погрешность, в табл. 3 и 4 – средние значения и их стандартные ошибки. Для определения достоверности различий использовали коэффициент Стьюдента. Достоверными считались различия при $P < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что в 8 км от комбината только содержание в почве никеля превышало региональный фон, характерный для этого района [16], тогда как содержание меди, свинца и цинка практически не отличалось от фоновых значений. По мере приближения к предприятию

Таблица 1. Валовое содержание тяжелых металлов (мг/кг сухого веса) в почвах участков, расположенных на разном расстоянии от Костомукшского ГОКа**Table 1.** Gross content of heavy metals (mg/kg dry weight) in soils at different distances from the Kostomuksha mining and processing plant

Металл Metal	Региональный фон, мг/кг сухого веса почвы* Regional background level, mg/kg soil dry weight*	Расстояние от комбината, км Distance from the plant, km		
		8.0	4.0	0.5
Медь, Cu	9.1	9.1 ± 0.9	15.2 ± 1.6	25.2 ± 3.8
Никель, Ni	3.6	9.0 ± 2.3	12.8 ± 3.2	17.8 ± 4.7
Свинец, Pb	5.9	7.4 ± 0.8	9.6 ± 1.0	15.8 ± 1.6
Цинк, Zn	19.2	22.7 ± 3.7	42.1 ± 6.8	43.7 ± 7.0

Примечание. * – региональный фон для иллювиально-гумусово-железистых подзолистых песчаных почв (горизонт А2 (E)) в районе исследований [16].

Note. * – regional background level for ferrous illuvio-humi-podzolic sandy soils (horizon A2 (E)) in the study area [16].

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов (мг/кг сухого веса) в корнях и побегах *Phleum pratense*, произрастающих на участках, расположенных на разном расстоянии от Костомукшского ГОКа**Table 2.** Content of heavy metals (mg/kg dry weight) in roots and shoots of *Phleum pratense* growing at different distances from the Kostomuksha mining and processing plant

Металл Metal	Расстояние от комбината, км Distance from the plant, km		
	8.0	4.0	0.5
Корень Root			
Медь, Cu	11.9 ± 3.0	25.2 ± 6.3*	20.4 ± 5.1
Никель, Ni	15.6 ± 3.9	19.2 ± 4.8	24.1 ± 6.0
Свинец, Pb	2.9 ± 0.3	5.1 ± 0.5*	5.1 ± 0.5*
Цинк, Zn	33.5 ± 5.4	33.2 ± 5.3	33.5 ± 5.4
Побег Shoot			
Медь, Cu	2.1 ± 0.5	2.7 ± 0.7	2.5 ± 0.6
Никель, Ni	0.9 ± 0.2	2.2 ± 0.6	2.9 ± 0.7*
Свинец, Pb	0.6 ± 0.1	3.3 ± 0.3*	2.0 ± 0.2*
Цинк, Zn	16.2 ± 2.6	17.4 ± 2.8	25.5 ± 4.1

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4 * – различия по отношению к участкам, расположенным в 8 км от источника загрязнения, достоверны при $P < 0.05$.

Note. Here and in table. 3, 4 * – differences in relation to areas located 8 km from the source of pollution are significant at $P < 0.05$.

содержание в почве всех изученных металлов возросло, достигая наибольших величин на участке, расположенном в 0.5 км от источника загрязнения (табл. 1).

Как правило, повышение концентрации тяжелых металлов в почве приводит к увеличению их содержания в растениях [22–24]. В нашем случае на участках, расположенных в 4 и 0.5 км от комбината, в корнях *P. pratense* достоверно возросло (по сравнению с участком, расположенным в 8 км) содержание меди и свинца, а в побегах – никеля и свинца (табл. 2). При этом концентрация всех изученных металлов в корнях оказалась выше,

чем в побегах, что характерно для многолетних злаков. Способность растений накапливать тяжелые металлы преимущественно в корнях считается одним из важных механизмов их металлоустойчивости [25, 26].

Сравнительный анализ показал, что *P. pratense* накапливает в корнях гораздо больше металлов, чем растения других семейств, произрастающих на этом же участке. Так, содержание меди в корнях *P. pratense* оказалось более чем в 2 раза выше по сравнению с *T. farfara*, а содержание никеля – в 4 и в 3.5 раза выше, чем у *T. officinale* и *T. farfara*, соответственно (рис. 1). В побегах различия меж-

Таблица 3. Морфологические признаки генеративного побега и их вариабельность у растений *Phleum pratense*, произрастающих на участках, расположенных на разном расстоянии от Костомукшского ГОКа
Table 3. Morphological parameters of the generative shoots and their variability in *Phleum pratense* growing at different distances from the Kostomuksha mining and processing plant

Признак Parameter	Расстояние от комбината, км Distance from the plant, km					
	8.0		4.0		0.5	
	$M \pm m$	$V, \%$	$M \pm m$	$V, \%$	$M \pm m$	$V, \%$
Высота побега, см Height of shoot, cm	111.4 ± 3.1	10.6	87.6 ± 1.9*	16.0	77.3 ± 3.2*	18.4
Площадь листа, см ² Area of leaf, cm ²	9.9 ± 0.7	27.4	8.8 ± 0.6*	28.6	7.7 ± 0.6*	26.9
Длина соцветия, см Length of inflorescence, cm	4.6 ± 0.3	30.5	4.7 ± 0.3	28.9	5.2 ± 0.3	24.9

Таблица 4. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений *Phleum pratense*, произрастающих на участках, расположенных на разном расстоянии от Костомукшского ГОКа
Table 4. Photosynthetic pigments content in leaves of *Phleum pratense* growing at different distances from the Kostomuksha mining and processing plant

Показатель Parameter	Расстояние от комбината, км Distance from the plant, km		
	8.0	4.0	0.5
Суммарное содержание хлорофиллов ($a + b$), мг/г сырой массы Total chlorophyll content ($a + b$), mg/g dry weight	1.266 ± 0.002	1.319 ± 0.02	1.568 ± 0.023*
Соотношение хлорофиллов (a/b) Proportion of chlorophylls (a/b)	3.92 ± 0.08	4.09 ± 0.07	3.98 ± 0.03
Содержание каротиноидов, мг/г сырой массы Carotenoid content, mg/h dry weight	0.499 ± 0.002	0.474 ± 0.009	0.565 ± 0.003*

ду разными видами отмечались лишь для меди, содержание которой у *P. pratense* оказалось в 3.5 раза ниже, чем у *T. officinale*. Отметим, что сходные данные приводятся в работах и других авторов. Например, содержание свинца в корнях *D. glomerata* L. вблизи крупной автомагистрали было в 2–3 раза выше, чем в корнях *Trifolium repens* L. и *Vicia cracca* (Fabaceae), *Plantago maior* L. (Plantaginaceae) и *Matricaria inodora* L. (Asteraceae), произрастающих на этих же участках [27]. В промышленной зоне г. Саранска растения *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth. накапливали в корнях и в побегах гораздо более высокие концентрации никеля по сравнению с *T. officinale* (Asteraceae) [12]. Эта способность многолетних злаков к значительному накоплению тяжелых металлов в корнях важна с точки зрения возможного их использования для стабилизации и очистки загрязненных почв.

В многочисленных работах показано, что увеличение содержания тяжелых металлов в растениях негативно отражается на их росте, развитии

и накоплении биомассы [26]. Поскольку это может приводить к изменению видового состава и выпадению из фитоценоза менее устойчивых к металлам видов, необходимо осуществлять многолетний мониторинг состояния растений, произрастающих на территориях, испытывающих постоянное техногенное воздействие. Среди индикаторов состояния растений наиболее простыми с точки зрения учета и достаточно информативными являются морфологические признаки побега [28, 29]. В наших исследованиях у растений *P. pratense* с приближением к источнику загрязнения достоверно уменьшались высота наиболее развитого генеративного побега и площадь листовой пластинки подфлагового листа (табл. 3). Так, в 0.5 км от комбината оба эти показателя были почти на 30% меньше, чем у растений, произрастающих в 8 км. Уменьшение высоты побега и размера листьев у растений в зонах промышленного загрязнения тяжелыми металлами уже отмечалось ранее у других видов растений, например, у *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. [30],

P. major [31], *Matricaria chamomilla* L. [32]. Основными причинами этого является прямое действие металлов на процессы деления и растяжения клеток [33, 34], а также их косвенное влияние, связанное с нарушениями основных физиологических процессов [35, 26].

В отличие от этого, такой признак как длина соцветия не зависел в нашем случае от степени загрязнения территорий и был практически одинаковым на всех изученных нами участках (табл. 3). Сведений о влиянии тяжелых металлов на репродуктивную сферу травянистых растений крайне мало, и они довольно противоречивы. Так, у *M. chamomilla* на загрязненных территориях снижалось количество соцветий [32], тогда как у *T. officinale* высокие концентрации металлов в почве не вызывали каких-либо изменений в формировании соцветия [36]. Относительно многолетних злаков данных в известной нам литературе нет, но показано, что параметры соцветия у них являются одними из наиболее стабильных морфологических признаков, которые изменяются в неблагоприятных условиях внешней среды лишь незначительно [37, 38].

Помимо оценки состояния отдельных растений, растущих на загрязненных территориях, важно определить устойчивость к этим условиям ценопопуляций вида. О состоянии ценопопуляций можно, в частности, судить на основании оценки внутривидовой изменчивости морфологических признаков. Проведенный нами анализ изменчивости морфологических признаков генеративного побега *P. pratense* показал, что при приближении к источнику загрязнения возрастает вариабельность высоты генеративного побега, указывая на усиление изменчивости растений по этому признаку. Так, если в 8 км от комбината он соответствовал низкому уровню изменчивости, то в 4 и 0.5 км – среднему (табл. 3). Значения коэффициентов вариации для таких признаков, как площадь листа и длина соцветия на всех участках, даже в 8 км от комбината, свидетельствуют о высоком уровне их изменчивости. В целом усиление уровня внутривидовой изменчивости признаков говорит об увеличении гетерогенности популяции, которое отмечено и в других работах, выполненных на многолетних злаках, находящихся в условиях промышленного загрязнения [39–41]. Благодаря этому создается основа для естественного отбора наиболее устойчивых генотипов, повышается адаптивный потенциал вида и соответственно расширяются возможности его существования в неблагоприятных условиях.

Известно, что не только продуктивность, но и устойчивость растений к тяжелым металлам во многом зависит от эффективной работы их фотосинтетического аппарата (ФСА). Поэтому пара-

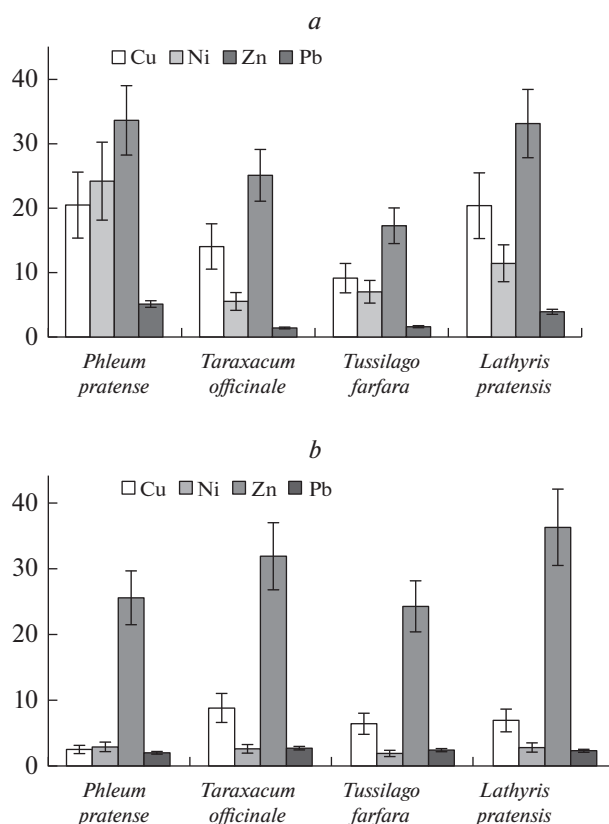


Рис. 1. Содержание тяжелых металлов в корнях и побегах растений разных видов, произрастающих на участках, расположенных в 0.5 км от Костомукшского ГОКа. а – корни; б – побеги.

По вертикали – содержание металла, мг/кг сухой массы.
Fig. 1. The heavy metals content in the roots and shoots of various plant species growing 0.5 km from the Kostomuksha mining and processing plant. а – roots; б – shoots.
Y-axis – metal content, mg/kg dry weight.

метры, характеризующие ФСА, также могут быть использованы при оценке состояния растений на загрязненных металлами территориях. В наших исследованиях определялось содержание фотосинтетических пигментов в листьях *P. pratense*, поскольку пигментный аппарат является одной из основных “мишеней” воздействия тяжелых металлов на растения [42, 26]. Обнаружено, что при приближении к источнику загрязнения содержание хлорофиллов и каротиноидов несколько возрастает и оказывается достоверно более высоким на участке, расположенном в непосредственной близости от комбината (табл. 4). По-видимому, увеличение количества пигментов в стрессовых условиях является защитно-приспособительной реакцией, направленной на поддержание необходимой скорости фотосинтеза. Отметим, что при этом каротиноиды гораздо менее подвержены воздействию тяжелых металлов, чем хлорофиллы [43, 44], поэтому повышение их содержания, очевидно, связано с выполняемой ими

защитной ролью, в том числе как антиоксидантов. Явно выраженных изменений соотношения хлорофиллов *a/b* не наблюдалось, что свидетельствует об отсутствии серьезных нарушений в распределении зеленых пигментов между фотосистемами и светособирающими комплексами.

Сведений о содержании фотосинтетических пигментов в листьях дикорастущих видов растений, растущих вблизи промышленных предприятий, в литературе относительно немного, и в целом они согласуются с нашими данными. Так, увеличение содержания фотосинтетических пигментов обнаружено в листьях *Tilia cordata* Mill., растущей вблизи металлургического комплекса в г. Набережные Челны [45], а также в хвое *Larix sukaczewii* Dyl. в условиях полиметаллического загрязнения в районе Стерлитамакского промышленного центра (Республика Башкортостан) [46]. Авторы рассматривают подобный результат как проявление одного из механизмов адаптации растений к данному стресс-фактору. Хотя нельзя не отметить, что имеются данные и о снижении содержания пигментов у растений на загрязненных территориях, например у *Tanacetum vulgare* L. [47] или у *Solidago virgaurea* L. и *Calluna vulgaris* (L.) Hull [48], что, по-видимому, в большей степени характерно для менее устойчивых к тяжелым металлам видов, а также для сильно загрязненных территорий.

риториях, в том числе и в северных регионах. Поддержание высокой жизнеспособности растений в этих условиях обеспечивается функционированием целого ряда адаптивных механизмов, действующих как на уровне организма, так и на уровне ценопопуляции. Среди них: увеличение в условиях загрязнения содержания фотосинтетических пигментов при уменьшении площади листа и сохранение обычного соотношения хлорофиллов (обеспечивает поддержание активной работы ФСА); формирование у растений на загрязненных территориях соцветий, не отличающихся по размеру от таковых на относительно чистых территориях (гарантирует семенное возобновление растений в этих условиях), и, наконец, высокий уровень внутривоупуляционной изменчивости, расширяющий адаптивные возможности и позволяющий ценопопуляции успешно расти и сохранять содоминирующее положение в условиях техногенного стресса. При этом растения *P. pratense* способны накапливать довольно большое количество тяжелых металлов в корнях, по сравнению с другими видами.

В целом полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности и перспективности использования *P. pratense* в восстановлении загрязненных тяжелыми металлами территорий, в том числе в условиях Севера, включая территории, относящиеся к Арктической зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные нами исследования показали, что вид *P. pratense* способен успешно произрастать на загрязненных тяжелыми металлами тер-

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 0218-2019-0074) ИБ КарНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черненко Т.В. 2002. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. М. 191 с.
2. Ярмишко В.Т., Ярмишко М.А. 2005. Воздействие атмосферного промышленного загрязнения на структуру и продуктивность растений нижних ярусов северотаежных сосновых лесов. — В кн.: Проблемы экологии растительных сообществ Севера. СПб. Р. 130–139.
3. Лянгузова И.В. 2016. Тяжелые металлы в северотаежных экосистемах России. Пространственно-временная динамика при аэротехногенном загрязнении. Saarbrücken, Германия. 264 с.
4. Жиров В.К., Голубева Е.И., Говорова А.Ф., Хаитбаев А.Х. 2007. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем Севере. М. 166 с.
5. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Смирнова И.В., Кудрявцева А.Д., Турбабина К.А. 2016. Реакция лесных экосистем на сокращение атмосферных выбросов в Кольской Субарктике. — Журн. общей биологии. 77(2): 145–163. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25800896>
6. Безель В.С., Жуйкова Т.В. 2007. Химическое загрязнение среды: вынос химических элементов надземной фитомассой травянистой растительности. — Экология. 4: 259–267. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9517276>
7. Казнина Н.М. 2016. Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства Роасеае к тяжелым металлам: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб. 48 с.
8. Дружинина О.А., Мяло Е.Г. 1990. Охрана растительного покрова Крайнего Севера. М. 175 с.
9. Маджугина Ю.Г., Кузнецов Вл.В., Шевякова Н.И. 2008. Растения полигонов захоронения бытовых отходов мегалополисов как перспективные виды для фиторемедиации. — Физиология растений. 55(3): 453–463. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9953098>

10. Жуйкова Т.В., Мордвинова Е.С., Баймашева А.О., Фриз О.А. 2002. Фитоиндикация и промышленный регион. – В сб.: Биота горных территорий: история и современное состояние: Материалы конф. молодых ученых. Екатеринбург. С. 53–65. https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/0216_2002_sbornikMK_1.pdf
11. Atabaeva S.D., Sarsenbayev B.A. 2004. Contamination of soils and plants by heavy metals around metallurgic enterprises in east Kazakhstan. – В сб.: Проблемы физиологии растений Севера: Тезисы докл. междунар. конф. Петрозаводск. С. 218.
12. Башмаков Д.И., Лукаткин А.С. 2009. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений. Саранск. 236 с.
13. Медведев П.Ф., Сметанникова А.И. 1981. Кормовые растения европейской части СССР: Справочник. Л. 336 с.
14. Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2019 г. 2020. Петрозаводск. 248 с.
15. Лазарева И.П. 1992. К вопросу о химическом загрязнении почв. – В сб.: Почвенные ресурсы Карелии, их рациональное использование и охрана (экологические проблемы). Петрозаводск. С. 102–131.
16. Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Солодовников А.Н., Морозов А.К. 2008. Почвы Карелии: геохимический атлас. М. 47 с.
17. Федорец Н.Г., Солодовников А.Н. 2013. Воздействие эмиссий Костомукшского горно-обогатительного комбината на лесные подстилки сосняков в северотаежной подзоне Карелии. – Труды КарНЦ РАН, серия Экологические исследования. 6: 143–152. <http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?plang=r&id=11420>
18. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв и растений при контроле загрязнения окружающей среды металлами. 1981. М. 109 с.
19. Аникиев В.В., Кутузов Ф.Ф. 1961. Новый способ определения площади листовой поверхности у злаков. – Физиология растений. 8(3): 375–377.
20. Мамаев С.А. 1975. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений. – Индивидуальная и эколого-географическая изменчивость растений. Труды Института экологии растений и животных. Свердловск. 94: 3–14. https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/0968_1975_Vol_94.pdf
21. Шлык А.А. 1971. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев. – В кн.: Биологические методы в физиологии растений. М. С. 154–170.
22. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. Пер. с англ. М. 440 с.
23. Кашулина Г.М., Салтан Н.В. 2008. Химический состав растений в экстремальных условиях локальной зоны комбината “Североникель”. Апатиты. 239 с.
24. Ильин В.Б. 2012. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение. Новосибирск. 220 с.
25. Antosiewicz D. M. 1992. Adaptation of plants to an environment polluted with heavy metals. – Acta Soc. Bot. Pol. 61(2): 281–299. <https://doi.org/10.5586/asbp.1992.026>
26. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. 2007. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск. 172 с.
27. Хаданович А.В., Свириденко В.Г., Дроздова Н.И. 2010. Распределение ионов свинца и кадмия в системе почва–растение в условиях Гомельского района. – Веснік Магілёўскага дзяржаўнага ўніверсітэта, сер. В. 2(36): 76–84.
28. Злобин Ю.А. 1985. О некоторых параметрах для оценки реакции ценопопуляций на влияние антропогенных факторов. – В кн.: Антропогенные процессы в растительности. Уфа. С. 89–101.
29. Магомедмирзаев М.М. 1990. Введение в количественную морфогенетику. М. 228 с.
30. Pietrini F., Iannelli M.A., Pasqualini S., Massacci A. 2003. Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. – Plant Physiol. 133(2): 829–937. <https://doi.org/10.1104/pp.103.026518>
31. Kosobrukhov A., Knyazeva I., Mudrik V. 2004. *Plantago major* plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis – Plant Growth Regul. 42(2): 145–151. <https://doi.org/10.1023/B:GROW.0000017490.59607.6b>
32. Прокопьев И.А., Филиппова Г.В., Шейн А.А., Габышев Д.В. 2014. Влияние городского техногенного загрязнения на морфологические, биохимические характеристики и семенную продуктивность ромашки аптечной. – Экология. 1: 22–29. <https://elibrary.ru/item.asp?id=21092702>
33. Van Assche F., Clijsters H. 1990. Effects of metals on enzyme activity in plants. – Plant Cell Environ. 13(1): 195–206. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1990.tb01304.x>
34. Haag-Kerwer A., Schäfer H.J., Heiss S., Walter C., Rausch Th. 1999. Cadmium exposure in *Brassica juncea* causes a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis. – J. Exp. Bot. 50(341): 1827–1835. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.341.1827>

35. *Burzyński M., Kłobus G.* 2004. Changes of photosynthetic parameters in cucumber leaves under Cu, Cd and Pb stress. — *Photosynthetica*. 42(4): 505–510. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-0005-2>
36. *Северюхина О.А., Жуйкова Т.В.* 2002. Реакция генеративной сферы *Taraxacum officinale* s. l. на действие факторов окружающей среды. — В сб.: Биота горных территорий: история и современное состояние: Материалы конф. молодых ученых. Екатеринбург. С. 189–193. https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/0216_2002_sbornikMK_1.pdf
37. *Олимпиев Г.С., Титов А.Ф., Николаевская Т.С.* 1982. Генетические эффекты отбора у многолетних трав. Л. 112 с.
38. *Калинина С.И., Лайдинен Г.Ф.* 1997. Морфологические изменения природных популяций *Alopecurus pratensis* (РОАСЕАЕ) при интродукции. — *Бот. журн.* 82(10): 38–48. <http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19971010>
39. *Karatagli S.S.* 1980. Differential tolerance of *Agrostis tenuis* populations growing at two mine soils to Cu, Zn, Pb. — *Phyton*. 20(1–2): 15–22. https://www.zobodat.at/pdf/PHY_20_1_2_0015-0022.pdf
40. *Cox R.M., Hutchinson T.C.* 1981. Multiple and co-tolerance to metals in the grass *Deschampsia caespitosa*: adaptation, preadaptation and “cost”. — *J. Plant Nutr.* 3(1–4): 731–741. <https://doi.org/10.1080/01904168109362875>
41. *Лайдинен Г.Ф., Казнина Н.М., Батова Ю.В., Титов А.Ф.* 2011. Состояние травянистой растительности в условиях промышленного загрязнения (на примере южной Карелии). — *Раст. ресурсы*. 47(4): 50–61. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16985302>
42. *Krupa Z., Baszyński T.* 1995. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus — direct and indirect effects on light and dark reactions. — *Acta Physiol. Plant.* 17: 177–190.
43. *Khudsar T., Mahmooduzzafar, Iqbal M.* 2001. Cadmium-induced changes in leaf epidermis, photosynthetic rate and pigment concentrations in *Cajanus cajan*. — *Biol. Plant.* 44(1): P. 59–64. <https://doi.org/10.1023/A:1017918320697>
44. *Таланова В.В., Титов А.Ф., Боева Н.П.* 2001. Влияние свинца и кадмия на проростки ячменя. — *Физиология и биохимия культ. растений*. 33(1): С. 33–37.
45. *Bukharina I.L., Kuzmin P.A., Sharifullina A.M.* 2013. Analysis of physiological and biochemical characteristics of *Tilia cordata* Mill. in conditions of technogenic pollution (on example of the city Naberezhnye Chelny) — *Modern scientific research and their practical application*. 21301-001. <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j21301.pdf>
46. *Кулагин А.А., Юсупов А.А.* 2008. О содержании фотосинтетических пигментов в хвое лиственницы Сукачевы (*Larix sukaczewii* Dyl.) при развитии в условиях аэротехногенного полиметаллического загрязнения окружающей среды. — *Изв. Самарского НЦ РАН*. 10(2): 617–620. http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2008/2008_2_617_620.pdf
47. *Stevović S., Surčinski Mikovilović V., Čalić-Dragosavac D.* 2010. Environmental impact on morphological and anatomical structure of Tansy. — *Afr. J. Biotechnol.* 9(16): 2413–2421. <https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/78476>
48. *Костюк В.И., Мельник Н.А., Шмакова Н.Ю.* 2009. Состояние ассимилирующих органов растений в условиях техногенного загрязнения. Апатиты. 82 с.

Effect of Industrial Heavy Metal Soil Contamination on *Phleum pratense* (Poaceae) in the Northern Karelia

G. F. Laidinen^a, N. M. Kaznina^{a,*}, Yu. V. Batova^a, and A. F. Titov^a

^a*Institute of Biology of Karelian Research Centre of Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia*

^{*}*e-mail: kaznina@krc.karelia.ru*

Abstract—The effect of heavy metal contaminated soils on *Phleum pratense* L. was studied. The specimens were collected at different distances (0.5, 4 and 8 km) from the Kostomuksha mining and processing plant, in the north-west of the Republic of Karelia. The content of copper, nickel, lead and zinc in the roots and shoots of plants has been determined. It has been established that under northern conditions, *P. pratense* can successfully grow in areas with a high heavy metal contamination level, while maintaining its codominant position in the plant community. The successful plant growth and development is ensured by a number of adaptive mechanisms. Among them: an increase of the photosynthetic pigments content with a decrease in leaf area, which ensures the maintenance of the photosynthetic apparatus activity; maintaining of the inflorescence size even in the most polluted areas, which guarantees high seed productivity of plants. At the coenopopulation level, an increase in their heterogeneity was recorded, which, in particular, is expressed in a high intrapopulation variability of such traits as leaf area and inflorescence length. At the same

time, *P. pratense* is able to accumulate high concentrations of heavy metals in the roots, exceeding their content in other plant species. The obtained results indicate that it is possible and promising to use *P. pratense* for the recovery of the northern territories contaminated by heavy metals, including territories located in the Arctic region.

Keywords: *Phleum pratense*, heavy metals, growth, intrapopulation variability of morphological parameters, photosynthetic pigments, adaptation

ACKNOWLEDGMENTS

The present study was carried out within the framework of the institutional research project (n. 0218-2019-0074) of the Institute of Biology Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

REFERENCES

1. *Chernen'kova T.V.* 2002. [Response of forest vegetation to industrial pollution]. Moscow. 191 p. (In Russian)
2. *Yarmishko V.T., Yarmishko M.A.* 2005. [Effect of the atmospheric industrial pollution on structure and productivity of understory vegetation in the northern pine forests]. — In: [Environmental problems of the northern plant communities]. St. Petersburg. P. 130–139. (In Russian)
3. *Lyanguzova I.V.* 2016. Heavy metals in the Russian northern taiga ecosystems. Spatial-temporal dynamics of airborne industrial pollution. Saarbrücken, Germany. 264 p. (In Russian)
4. *Zhirov V.K., Golubeva E.I., Govorova A.F., Khaitbaev A.Kh.* 2007. [Structural and functional changes of vegetation under the technogenic pollution in the Far North]. Moscow. 166 p. (In Russian)
5. *Koptsik G.N., Koptsik S.V., Smirnova I.V., Kudryavtseva A.D., Turbabina K.A.* 2016. The response of forest ecosystems to reduction in industrial atmospheric emission in the Kola Subarctic. — *Zhurnal obshchej biologii*. 77 (2): 145–163. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25800896>
6. *Bezel' V.S., Zhuikova T.V.* 2007. Chemical pollution: Transfer of chemical elements to the above-ground phytomass of herbaceous plants. — *Russ. J. Ecol.* 38(4): 238–246. <https://doi.org/10.1134/S1067413607040042>
7. *Kaznina N.M.* 2016. [Physiological-biochemical and molecular genetic mechanisms of the resistance to heavy metals in some species of the Poaceae family: Abstr. ... Dis. Doct. (Biology) Sci.]. St. Petersburg. 48 p. (In Russian)
8. *Druzhinina O.A., Myalo E.G.* 1990. [Protection of the vegetation cover in the Far North.]. Moscow. 175 p. (In Russian)
9. *Magzhudina Yu.G., Kuznetsov V.I., Shevyukova N.I.* 2008. Plants inhabiting polygons for megapolis waste as promising species for phytoremediation. — *Russ. J. Plant Physiol.* 55(3): 410–419. <https://doi.org/10.1134/S1021443708030187>
10. *Zhujkova T.V., Mordvinova E.S., Bajmasheva O.A., Friz O.A.* 2002. [Phytoindication and industrial region]. — In: [Biota of mountain territories: history and contemporary condition. Proceedings of the conference for young scientists]. Ekaterinburg. 2002. P. 53–65. (In Russian) https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/0216_2002_sbornikMK_1.pdf
11. *Atabaeva S.D., Sarsenbayev B.A.* 2004. Contamination of soils and plants by heavy metals around metallurgic enterprises in east Kazakhstan. — In: [Issues of the physiology of northern plants: Proceedings of international scientific conference]. Petrozavodsk. P. 218.
12. *Bashmakov D.I., Lukatkin A.S.* 2009. [Ecophysiological aspects of heavy metal accumulation and distribution in higher plants]. Saransk. 236 p. (In Russian)
13. *Medvedev P.F., Smetannikova A.I.* 1981. [Forage plants of the European part of the USSR: Handbook]. Leningrad. 336 p.
14. [State report on the state of the Republic of Karelia environment in 2019]. 2020. Petrozavodsk. 248 p. (In Russian)
15. *Lazareva I.P.* 1992. [On the issue of chemical contamination of soils.]. — In: [Soil resources of Karelian, their rational utilization and protection: (environmental issues)]. Petrozavodsk. P. 102–131. (In Russian)
16. *Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Solodovnikov A.N., Morozov A.K.* 2008. [Soils of Karelia: geochemical atlas]. Moscow. 47 p. (In Russian)
17. *Fedorets N.G., Solodovnikov A.N.* 2013. Impact of the Kostomuksha mining and processing plant emissions on the forest litters in pine forests of the northern taiga subzone of Karelia. — *Transactions of the Karelian Research Centre RAS. Ecological studies Series*. 6: 143–152. (In Russian) <http://transactions.krc.karelia.ru/publ.php?lang=e&id=11420>
18. [Methodological recommendations for field and laboratory studies of soils and plants in the environmental metal pollution control]. 1981. Moscow. 109 p. (In Russian)
19. *Anikiev V.V., Kutuzov F.F.* 1961. A new method for determining leaf surface area of cereals — *Sov. Pl. Physiol.* 8: 193–197.

20. Mamaev S.A. 1975. [Basic principles of the method for studying intraspecific variability in woody plants]. – In: [Individual and ecologico-geographically specific variation in plants]. Trudy Instituta ekologii rastenij i zhivotnykh. Sverdlovsk. 94: 3–14. (In Russian) https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/0968_1975_Vol_94.pdf
21. Shlyk A.A. 1971. [Determination of chlorophylls and carotenoids in green leaf extracts]. – In: [Biological methods of plant physiology]. Moscow. P. 154–170.
22. Kabata-Pendias A., Pendias H. 1989. Trace elements in soils and plants. Transl. from English. Moscow. 440 p. (In Russian)
23. Kashulina G.M., Saltan N.V. 2008. [Chemical composition of plants under extreme conditions of Severonickel smelter local impact zone]. Apatity. 239 p. (In Russian).
24. Ilyin V.B. 2012. [Heavy metals and non-metals in the soil-plant system]. Novosibirsk. 220 p. (In Russian)
25. Antosiewicz D.M. 1992. Adaptation of plants to an environment polluted with heavy metals. – Acta Soc. Bot. Pol. 61(2): 281–299. <https://doi.org/10.5586/asbp.1992.026>
26. Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Lajdinen G.F. 2007. [Heavy metal tolerance of plants]. Petrozavodsk. 170 p. (In Russian)
27. Khadanovich A.V., Sviridenko V.G., Drozdova N.I. 2010. [Distribution of lead and cadmium ions in the soil-plant system in the Gomel region]. – Vesnik Mogilevskaga dzjarzhaunaga universiteta. Seriya B. 2(36): 76–84. (In Russian)
28. Zlobin Yu A. 1985. [On some parameters for assessing ceonopopulations response to human impact]. – In: [Man-induced processes in plants]. Ufa, P. 89–101. (In Russian)
29. Magomedmirzaev M.M. [Introduction to quantitative morphogenetics]. Moscow. 1990. 228 p. (In Russian)
30. Pietrini F., Iannelli M.A., Pasqualini S., Massacci A. 2003. Interaction of cadmium with glutathione and photosynthesis in developing leaves and chloroplasts of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. – Plant Physiol. 133(2): 829–937. <https://doi.org/10.1104/pp.103.026518>
31. Kosobrukhov A., Knyazeva I., Mudrik V. 2004. *Plantago major* plants responses to increase content of lead in soil: Growth and photosynthesis – Plant Growth Regul. 42(2): 145–151. <https://doi.org/10.1023/B:GROW.0000017490.59607.6b>
32. Prokop'ev I.A., Filippova G.V., Shein A.A., Gabyshev D.V. 2014. Impact of urban technogenic pollution on seed production, morphological and biochemical characteristics of chamomile, *Matricaria chamomila* L. – Russ. J. Ecol. 45(1): 18–23. <https://doi.org/10.1134/S106741361306009X>
33. Van Assche F., Clijsters H. 1990 Effects of metals on enzyme activity in plants. – Plant Cell Environ. 13(1): 195–206. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1990.tb01304.x>
34. Haag-Kerwer A., Schäfer H.J., Heiss S., Walter C., Rausch Th. 1999. Cadmium exposure in *Brassica juncea* causes a decline in transpiration rate and leaf expansion without effect on photosynthesis. – J. Exp. Bot. 50(341): 1827–1835. <https://doi.org/10.1093/jxb/50.341.1827>
35. Burzyński M., Kłobus G. 2004. Changes of photosynthetic parameters in cucumber leaves under Cu, Cd and Pb stress. – Photosynthetica. 42(4). P. 505–510. <https://doi.org/10.1007/S11099-005-0005-2>
36. Severyukhina O.A., Zhuykova T.V. 2002. [Response of *Taraxacum officinale* s.l. generative sphere to the impact of environmental factors]. – In: [Biota of mountain territories: history and contemporary condition. Proceedings of the conference for young scientists]. Ekaterinburg. 2002. P. 189–193. (In Russian) https://ipae.uran.ru/sites/default/files/publications/ipae/0216_2002_sbornikMK_1.pdf
37. Olimpienko G.S., Titov A.F., Nikolaevskaya T.S. 1982. [Genetic effects of selection in perennial grasses]. Leningrad. 112 p. (In Russian)
38. Kalinina S.I., Lajdinen G.F. 1997. Morphological modifications of natural populations of *Alopecurus pratensis* (Poaceae) during introduction. – Botanicheskij zhurnal. 82(10). P. 38–48. (In Russian) <http://arch.botjournal.ru/?t=issues&id=19971010>
39. Karataglis S.S. 1980. Differential tolerance of *Agrostis tenuis* populations growing at two mine soils to Cu, Zn, Pb. – Phytion. 20(1–2): 15–22. https://www.zobodat.at/pdf/PHY_20_1_2_0015-0022.pdf
40. Cox R.M., Hutchinson T.C. 1981. Multiple and co-tolerance to metals in the grass *Deschampsia caespitosa*: adaptation, preadaptation and “cost”. – J. Plant Nutr. 3(1–4): P. 731–741. <https://doi.org/10.1080/01904168109362875>
41. Lajdinen G. F., Kaznina N.M., Batova Yu. V., Titov A. F. 2011. State of herbaceous vegetation under industrial pollution (example of South Karelia). – Rastitel'nye resursy. 47(4): 50–61. (In Russian) <https://elibrary.ru/item.asp?id=16985302>
42. Krupa Z., Baszyński T. 1995. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus – direct and indirect effects on light and dark reactions. – Acta Physiol. Plant. 17: 177–190.

43. *Khudsar T., Mahmooduzzafar, Iqbal M.* 2001. Cadmium-induced changes in leaf epidermis, photosynthetic rate and pigment concentrations in *Cajanus cajan*. – Biol. Plant. 44(1): 59–64.
<https://doi.org/10.1023/A:1017918320697>
44. *Talanova V.V., Titov A.F., Boeva N.P.* 2001. The effect of lead and cadmium on barley seedlings. – Fiziologiya i biokhimiya kul'turnykh rastenij. 33(1): 33–37. (In Russian)
45. *Bukharina I.L., Kuzmin P.A., Sharifullina A.M.* 2013. Analysis of physiological and biochemical characteristics of *Tilia cordata* Mill. in conditions of technogenic pollution (on example of the city Naberezhnye Chelny). – In: Modern scientific research and their practical application. 21301-001. <http://www.sworld.com.ua/e-journal/j21301.pdf>
46. *Kulagin A.A., Yusupov A.A.* 2008. About the content of photosynthetic pigments in larch needles (*Larix sukaczewii* Dyl.) at development under aerotechnogenic polymetal pollution conditions of an environment – Izvestia RAS SamSC. 10(2): 617–620. (In Russian) http://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2008/2008_2_617_620.pdf
47. *Stevović S., Surčinski Mikovilović V., Čalić-Dragosavac D.* 2010. Environmental impact on morphological and anatomical structure of Tansy. – Afr. J. Biotechnol. 9(16): 2413–2421.
<https://www.ajol.info/index.php/ajb/article/view/78476>
48. *Kostyuk V.I., Melnik N.A., Shmakova N. Yu.* 2019. [The state of assimilating plant organs under technogenic pollution.]. Apatity. 82 p. (In Russian)