

УДК 550.47, 911, 504.062, 581.143

DOI 10.63874/2218-0311-2025-1-54-65

Александр Петрович Колбас¹,**Александр Васильевич Левый², Николай Васильевич Михальчук³**¹канд. биол. наук, доц., старший науч. сотрудник Полесского аграрно-экологического института Национальной академии наук Беларуси,

докторант Института природопользования Национальной академии наук Беларуси

²канд. биол. наук, старший науч. сотрудник Полесского аграрно-экологического института Национальной академии наук Беларуси³канд. биол. наук, доц., директор Полесского аграрно-экологического института Национальной академии наук Беларуси**Aliaksandr Kolbas¹, Aliaksandr Levy², Mikalai Mikhhalchuk³**¹Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belarus,

Doktoral Student of the Institute of Nature Management of National Academy of Sciences of Belarus

²Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher of the Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belarus³Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Director of the Polesie Agrarian Ecological Institute of National Academy of Sciences of Belaruse-mail: ¹kolbas77@mail.ru, ²a30413@mail.ru, ³info@paei.by

ОЦЕНКА БИОРЕМЕДИАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РАСТЕНИЙ *SILPHIUM PERFOLIATUM* L., ПОЛУЧЕННЫХ КЛОНАЛЬНЫМ МИКРОРАЗМНОЖЕНИЕМ В УСЛОВИЯХ *IN VITRO**

Приведены результаты тестирования фитоэкстракционных свойств силфийи пронзеннолистной (*Silphium perfoliatum* L.) с учетом возможности ее микроклонального размножения *in vitro* в качестве биоремедианта для почв с полиэлементным загрязнением среднего уровня. Используемые почвы характеризовались повышенным содержанием Pb, Co, Zn и Ni вследствие влияния эмиссий аккумуляторного производства. После выращивания в течение 5 месяцев отмечалось изменение некоторых биометрических параметров листьев силфийи под действием загрязненных почв: увеличивалась средняя масса листа и уменьшалось их количество, часто возрастала общая биомасса вследствие гормезиса. Анализ минераломассы позволяет рекомендовать тестируемые клоны силфийи для долговременных стратегий фитоэкстракции свинца, кобальта, меди, ванадия и титана на загрязненных территориях с возможностью последующей валоризации полученной биомассы.

Ключевые слова: *Silphium perfoliatum* L., микроклональное размножение, минераломасса, биоремедиация, тяжелые металлы, почвы, фитоэкстракция.

Assessment of Bioremediation Potential of *Silphium Perfoliatum* L. Obtained by Clonal Micropropagation *in vitro*

The paper presents the results of testing the phytoextraction properties of *Silphium perfoliatum* L. taking into account the possibility of its microclonal propagation *in vitro* as a bioremediant for soils with medium-level polyelement pollution. The soils were characterized by increased content of Pb, Co, Zn, and Ni due to the influence of battery production emissions. After growing for 5 months, some biometric parameters of *Silphium* leaves were observed to change under the influence of contaminated soils: the average leaf weight increased and their number decreased, the total biomass often increased due to hormesis. Analysis of the mineral mass allows us to recommend the tested *Silphium* clones for long-term strategies for phytoextraction of lead, cobalt, copper, vanadium, and titanium in contaminated areas with the possibility of subsequent valorization of the resulting biomass.

Key words: *Silphium perfoliatum* L., microclonal propagation, mineral mass, bioremediation, heavy metals, soils, phytoextraction.

Введение

Клональное микроразмножение находит все более широкое применение в современных экологических технологиях, в т. ч. и биоремедиации. Биотехнология

*Работа выполнена в рамках НИР «Оценка загрязнения тяжелыми металлами и иными экотоксикантами почв, вод, биологических объектов природных и природно-техногенных геосистем юго-запада Беларуси и научное обоснование минимизации сопутствующих экологических рисков», номер государственной регистрации 20210310, подпрограмма 10.1 ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда».

растений, вовлекая современные культуры тканей и селекцию *in vitro*, уже более 30 лет позволяет развивать новые формы гермопласта, лучше адаптированные под практические запросы [1]. Микрклональным размножением получают генетически стабильные группы организмов, схожие с полученными химическим мутагенезом [2]. Соматоклональные вариации и селекция *in vitro* позволяют развивать также вариации растений с повышенной выживаемостью в неблагоприятных условиях; к примеру, в Швейцарии и Бельгии были получены и протестированы устойчивые к тяжелым металлам (ТМ) соматоклональные варианты табака (*Nicotiana tabacum* L.) [3–4]. Лучшие варианты показали большие концентрации металлов (например, в 5–7 раз для меди, 2–5 раз для кадмия, 1,5 раза для цинка в гидропонике) по сравнению с материнскими клонами [3]; также были показаны различия в их антиоксидантном статусе [5].

В отличие от трансгенетических растений, клоны, полученные *in vitro*, могут быть сразу же тестированы в условиях *in vivo* для выявления экстракционного потенциала. Так, новые клоны табака с высокой аккумулярующей способностью были протестированы в полевых условиях, при этом эффективность их была несколько ниже, чем при выращивании в гидропонических условиях [6].

Поиск растений, способных обеспечивать биоремедиацию земель, – одно из перспективных направлений современных исследований в экологии. Такие растения должны иметь высокую скорость роста и соответствующий потенциал производства биомассы, глубокую и разветвленную корневую систему и обладать устойчивостью к биотическим и абиотическим стрессам, в частности, отличаться засухоустойчивостью, способностью развиваться на сильнозагрязненных ТМ почвах в условиях слабой обеспеченности N, P, K и микроэлементами. Для реализации длительных стратегий и создания перманентных посадок предпочтительнее рассматривать многолетние культуры. Рекомендуемые виды растений для извлечения тяжелых металлов должны, по мнению некоторых авторов, иметь значения коэффициента транслокации и коэффициента биологического накопления (КБН) выше 1 [7]. Сильфия пронзеннолистная (*S. perfoliatum* L.) является одним из перспективных видов для восстановления почв, загрязненных ТМ, поскольку имеет интенсивную скорость роста, устойчива к биотическим и абиотическим стрессам, производит значительное количество растительной биомассы [8], которая может быть собрана и использована для производства биогаза и прямого сжигания [9]. Figas с соавторами (2015) указывают, что это растение потенциально может восстанавливать деградированные земли посредством биоремедиации [10]. Предварительные исследования показывают, что сильфия является хорошим кандидатом для фиторемедиации почв, загрязненных кадмием [11]. По данным Sumalan et al. (2023), *S. perfoliatum* является потенциальным гипераккумулятором данного элемента [12]. Предварительные горшочечные эксперименты в контролируемых условиях показали ее потенциальную эффективность в фитоэкстракции цинка, меди и свинца [13].

Однако семенное размножение данной культуры, способствуя полиморфизму и генетической неоднородности, может снижать эффективность биоремедиационных стратегий, особенно в условиях полиэлементного загрязнения. Также зачастую отмечается продолжительное прорастание и низкая всхожесть семян, поэтому микрклональное размножение позволяет получить в короткие сроки достаточное количество генетически гомогенного посадочного материала.

Цель данной работы – изучить накопительные свойства по отношению к ТМ в контролируемых условиях у растений *S. perfoliatum*, полученных микрклональным размножением *in vitro*.

Материалы и методы исследования

Почвы отбирали в двух локациях на территории речного порта «Пинск» – филиала РТУП «Белорусское речное пароходство» (коды – П1 и П2). В предыдущих исследова-

ниях было выявлено повышенное содержание некоторых ТМ на данной территории, вследствие 15-летнего влияния эмиссий аккумуляторного производства [14]. В качестве контрольного (фонового) варианта была использована почва стационара «Луково» (Малоритский р-н) (код – К).

Отбор почв осуществлялся согласно требованиям ГОСТ 17.4.4.02–84 с глубины до 20 см. Все образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, далее измельчали до частиц менее 1 мм. Для определения валового содержания ТМ химическое разложение почвы проводили согласно ISO 11466 смесью HNO_3 (14 M) и HCl (12 M) в соотношении по объему 1 : 3. Содержание 15 металлов (металлоидов) (Pb, Cd, Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Co, Cr, Mo, V, Ti, As, Sb, Sn) и некоторых макроэлементов (Ca, Mg, K, Na, P) определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) согласно ГОСТ ISO 22036–2014 с использованием спектрометра iCAP 7200 DUO (Thermo Scientific). Также были получены лизимитрические вытяжки из почв. Приспособление по отбору почвенного раствора Rhizon MOM (Eijkelkamp, Нидерланды) было помещено в каждый горшок под углом 45° . Почвенные растворы (30 мл) отбирали с каждого почвенного образца трижды с интервалом в одну неделю и хранили при температуре 4°C до проведения последующих анализов. Измеряли pH почвенных растворов с помощью pH-метра (Hanna instruments, pH 210). В почвенных растворах также определяли содержание 15 элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) по методике, указанной выше.

Растения. Работа включала следующие этапы (рисунок 1): ведение в культуру *in vitro*, микроразмножение, ризогенез, перенос клонов в условия *in vivo*, вегетационный эксперимент с загрязненными почвами, оценка биометрических параметров, пробоподготовка и химический анализ.

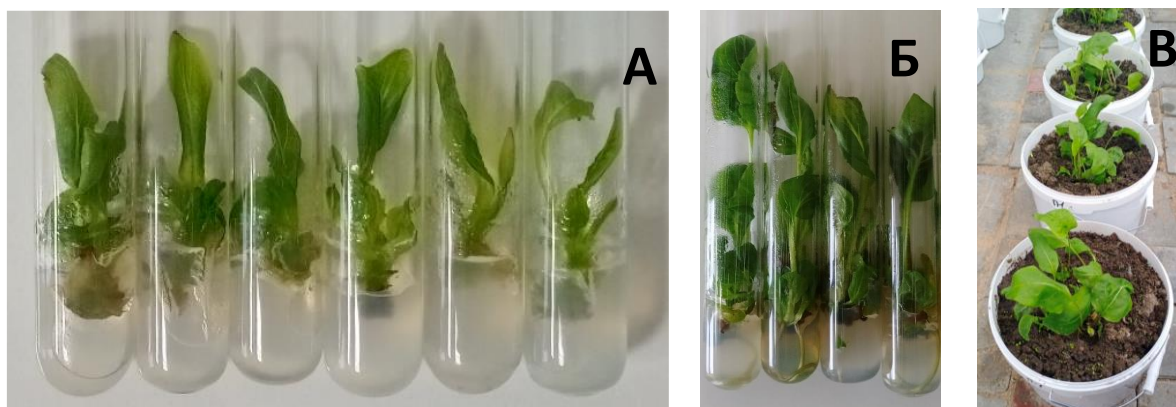


Рисунок 1 – Этапы эксперимента: микроразмножение (А) и ризогенез (Б) *in vitro*, адаптация (В) *in vivo*

Первые четыре этапа осуществляли по протоколу, описанному ранее [15]. Культивирование первичных эксплантов проводили в течение шести недель. Этап микроразмножения выполняли с использованием аналогичных условий и питательных сред. Коэффициент размножения при этом был равен четырем. При этом приживаемость растений-регенерантов составила 95 %. Таким образом, на данном этапе было получено достаточное количество клонов для осуществления последующих запланированных работ.

После пересадки на среду для ризогенеза по истечении четырех недель культивирования отмечено формирование корней у 97 % растений-регенерантов.

Для изучения биоремедиационных свойств сальфии провели эксперимент *in vivo* в условиях теплицы по прямому переносу, адаптации и последующему выращиванию растений-регенерантов непосредственно на грунтах с повышенным содержанием ТМ.

Вегетационные сосуды объемом 5,5 л были заполнены тремя вариантами почв, описанными ранее. В каждый вегетационный сосуд высаживали по четыре клона сильфии с развитыми корневыми системами. Приживаемость клонов составила 100 %. Далее полученные растения выращивались в условиях теплицы при регулярном поливе в течение пяти месяцев (с июня по октябрь), после чего осуществляли срезание, взвешивание, высушивание и определение содержания сухого вещества и ТМ в листьях.

Пробоподготовку растительного материала для химического анализа проводили по ГОСТ 26929-94. Определение содержания ТМ осуществляли согласно ГОСТ 30538-97 на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 7200 DUO.

Статистическую обработку результатов по химическому составу почв и растений проводили с использованием программ Microsoft Excel, Jamovi и R (версия 4.3.1). Она включала в себя дисперсионный анализ и создание графиков анализа главных компонент (PCA – Principal Component Analysis), а также корреляционный анализ параметров. Значения были предварительно обработаны. Значения R не превышали 0,05.

Статистическую обработку полученных данных по биометрическим параметрам растений выполняли методом однофакторного дисперсионного анализа (фактор – почва). Для оценки значимости различия между средними значениями выборок (групп) использовали величины F (критерий Фишера), F критическое (квантиль распределения Фишера) и P -значение (расчетный уровень значимости P), а также расчет значений HCp_{05} .

Результаты и их обсуждение

Почвы. Анализ валового содержания ТМ в почвах (таблица 1) выявил превышения значений ПДК [16] по свинцу для техноземов П1 и П2. При этом превышения порогов, указанных в ЭкоНиП 17.03.01-001-2021 [17], не отмечалось. Так как приведенные в данном нормативном документе значения превышают общемировые и европейские критерии, то эколого-геохимическую оценку почв проводили с учетом региональных особенностей: ключевым для сравнения был выбран субрегиональный фон для нативных почв [18]. При этом техноземы П1 и П2 характеризовались полиэлементным загрязнением: порог аномальности ($K_a > 1$) у них был превышен по семи элементам, при этом отмечалось значительное превышение фоновых значений по свинцу, кобальту, цинку и никелю (таблица 2).

Анализ суммарного показателя загрязнения почв (Z_c) выявил, что для почвы стационара «Луково» его значение соответствует низкой степени загрязнения (от 1 до 5), что позволило рассматривать ее в качестве контрольной, тогда как техноземы речного порта «Пинск» характеризуются как умеренно опасные со средним уровнем загрязнения [19].

Анализ содержания ТМ в почвенных вытяжках, выявил, что загрязненные почвы отличаются низким уровнем содержания растворенных форм большинства элементов (таблица 1). Исключение составляет молибден, доля которого в почвах П1 и П2 превышает контрольные значения в 22 и 8,5 раза соответственно, мышьяк – 3,9 и 2,3 раза соответственно, олово – в 9,3 раза в П1.

Следует отметить также более низкое содержание в загрязненных почвах по сравнению с контрольными растворенных форм элементов-загрязнителей (Pb, Cd, Zn, Co), что свидетельствует о нахождении данных элементов в связанном виде и их невысокой фитотоксичности. Данное явление объясняется также более высоким pH экспериментальных почв по сравнению с контрольными (таблица 3) и повышенным содержанием кальция и магния в почвенных растворах.

Таблица 1 – Валовое содержание элементов (мкг/кг) / доля элементов в почвенных вытяжках, % к валовому содержанию

Почва	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Ni	Co	Cr	Mo	V	Ti	As	Sb	Sn
К	4,94	0,05	1,15	8,53	32,5	1,26	0,38	1,96	0,08	2,03	29,38	0,79	0,17	0,13
	1,64	1,80	1,72	1,43	2,08	0,35	0,66	0,13	2,03	0,31	0,056	0,39	3,71	0,92
П1	39,1	0,02	2,27	22,2	90,6	2,01	2,32	3,51	0,03	11,92	221,7	0,62	0,44	0,16
	0,14	1,30	2,55	0,14	0,59	0,55	0,18	0,06	55,50	0,08	0,004	1,52	3,05	8,56
П2	38,6	0,03	2,57	22,1	55,8	2,65	1,52	3,71	0,03	6,58	136,9	0,67	0,34	0,18
	0,03	0,67	0,83	0,10	1,96	0,57	0,31	0,08	17,00	0,13	0,005	0,88	2,24	0,72
ПДК*	32	0,5	33	55	1500	20	20	100	10	150	–	–	–	–
Фон**	5,59	0,05	1,27	7,39	107,3	0,6	0,26	1,88	–	–	–	–	–	–

*Санитарно-гигиенические нормы для почв [16], **фон субрегиональный для нативных почв [18], – данные в литературных источниках не приводятся.

Таблица 2 – Коэффициенты концентрации для исследованных почв (относительно субрегионального фона [18]) и показатель суммарного загрязнения

Почва	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	Zc
К	0,88	1,00	0,91	1,15	0,30	0,62	2,10	1,46	1,04	1,68	3,44
П1	7,00	0,46	1,79	3,01	0,85	2,03	3,33	8,92	1,87	0,58	21,94
П2	6,90	0,60	2,02	2,99	0,52	1,32	4,42	5,85	1,97	0,54	19,47

Таблица 3 – Валовое содержание некоторых макроэлементов (г/кг) и органического вещества (%) в почве, pH почвенных вытяжек

Почва	K	Na	Ca	Mg	Fe	P	pH	орг. в-во (%)
К	6,65	40,19	21,22	3,016	1,39	1,098	4,08	3,09
П1	20,1	40,56	111,2	16,59	4,53	0,34	5,91	2,04
П2	10,25	34,55	133,8	19,82	2,94	0,24	6,24	0,93

Растения. Анализ биометрических параметров сальфии установил, что влияние загрязнения почвы статистически значимо в отношении среднего количества листьев одного растения ($F = 4,38 > F_{\text{критическое}} = 3,89$), массы образующихся листьев ($F = 12,06 > F_{\text{критическое}} = 3,89$) и содержания в них сухого вещества ($F = 7,32 > F_{\text{критическое}} = 3,89$) в первый год вегетации (таблица 4).

Наибольшее среднее количество листьев на одном растении сформировалось в варианте эксперимента с контрольной почвой – 10,65 шт., что статистически значимо (при $НСР_{05} = 1,82$) превышает данный показатель в варианте П2 – 8,25 шт.

Наибольшая масса листьев на одно растение была получена в варианте эксперимента с почвой П1 – 23,52 г, что статистически значимо (при $НСР_{05} = 3,79$) превышает этот параметр в вариантах К – 15,31 г и П2 – 17,40 г.

Таблица 4 – Биометрические параметры листьев сальфии пронзеннолистной в первый год вегетации (средние значения для одного растения)

Почва	Количество, шт.	Сырая масса, г	Сухое вещество, %
К	10,65	15,31	23,69
П1	8,95	23,52*	21,26*
П2	8,25*	17,40	22,90
НСР ₀₅	1,82	3,79	1,41

*Статистически достоверное отличие от контроля.

Наибольшее содержание сухого вещества было отмечено в вариантах эксперимента с почвами К и П2 (23,69 % и 22,90 % соответственно), что статистически значительно превышает значение данного показателя в варианте с почвой П1 (при НСР₀₅ = 1,41). При этом понижение содержания воды не приводило к падению общей урожайности. Ранее отмечалось, что клоны, выращиваемые на загрязненных почвах, менее зависимы от условий водообеспечения [3].

Таким образом, на загрязненных почвах происходит уменьшение количества листьев сальфии при одновременном их укрупнении и сохранении общей биомассы.

Содержание ТМ в листьях сальфии, выращенной на загрязненных почвах, характеризуется повышенными концентрациями свинца, меди, кобальта, ванадия и титана по сравнению с контрольными почвами (таблица 5). В то же время в тканях экспериментальных растений отмечаются более низкие концентрации по сравнению с контрольными растениями для таких ТМ, как Cd, Zn, Mn, Fe.

В целом концентрации большинства ТМ находились в пределах, описанных ранее для сальфии; более низкие концентрации по сравнению с литературными данными отмечены только для цинка и меди [13].

Таблица 5 – Содержание ТМ (мг/кг) / КБН для листьев сальфии

Почва	Элемент											
	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	V	Ti
К	0,38	0,02	3,72	12,03	108,53	36,10	0,24	0,004	0,10	0,11	0,010	0,011
	0,08	0,38	3,23	1,41	3,34	0,03	0,19	0,009	0,05	1,35	0,005	0,0004
П1	1,58	0,005	4,05	10,56	20,24	29,27	0,11	0,017	0,06	0,07	0,020	0,129
	0,04	0,21	1,78	0,48	0,22	0,01	0,06	0,007	0,02	2,55	0,002	0,001
П2	1,41	0,002	4,53	10,24	12,49	29,80	0,31	0,005	0,06	0,08	0,024	0,100
	0,04	0,07	1,76	0,46	0,22	0,01	0,12	0,003	0,02	3,01	0,004	0,001

Был рассчитан коэффициент биологического накопления ТМ (КБН) для листьев изученных растений [7] как отношение средней концентрации элемента в органах растений к валовому его содержанию в соответствующей почве; он отражает способность растений избирательно поглощать химические элементы (таблица 5).

Анализ данного параметра выявил накопительные стратегии для меди и молибдена на всех почвах и для цинка и марганца – на контрольных почвах. В целом на загрязненных почвах отмечается уменьшение поглощательных свойств по большинству ТМ (исключение – Mo). Схожие тенденции наблюдались ранее и для других растений и связаны в первую очередь с активизацией барьерных механизмов в растениях при превышении пороговых значений содержания ТМ в почве [6].

Для определения эффективности фитоэкстракции использовали показатель минераломассы (ММ), или выноса металла [6] (таблица 6). Вынос ТМ рассчитывался как произведение концентрации металлов в органах растений и биомассы этих органов (в пересчете на сухое вещество):

$$MM = \text{концентрация } TM_{\text{орган}} * \text{масса}_{\text{орган}}.$$

Следует отметить, что на загрязненных почвах биомасса растений не уменьшалась, а в случае почвы П1 даже увеличивалась (таблица 4). Данный факт объясняется эффектом гормезиса, или повышением виталитета растений при умеренных дозах загрязнения [20], что может значительно повышать вынос ТМ при данном уровне содержания ТМ в почве.

Таблица 6 – Минералломасса листьев сальфии (мг ТМ/раст)

поч- ва	элемент												
	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	V	Ti	Sb
К	1,38	0,07	13,45	43,63	394,41	131,21	0,88	0,01	0,35	0,41	0,04	0,04	0,32
П1	7,95	0,02	20	52,17	100,7	145,51	0,56	0,09	0,29	0,37	0,1	0,64	0,37
П2	5,49	0,01	17,93	40,38	48,48	117,62	1,22	0,02	0,25	0,32	0,1	0,39	0,3

У сальфии выявлены высокие показатели выноса на почвах П1 и П2 по сравнению с контролем следующих элементов: Pb (5,8 и 4,0 раза), Cu (1,5 и 1,3 раза), V (2,8 и 2,6 раза), Co (6,4 и 1,2 раза) и Ti (15,5 и 9,5 раза) (рисунок 2). Это позволяет рекомендовать тестируемые клоны сальфии для фитоэкстракции данных ТМ.

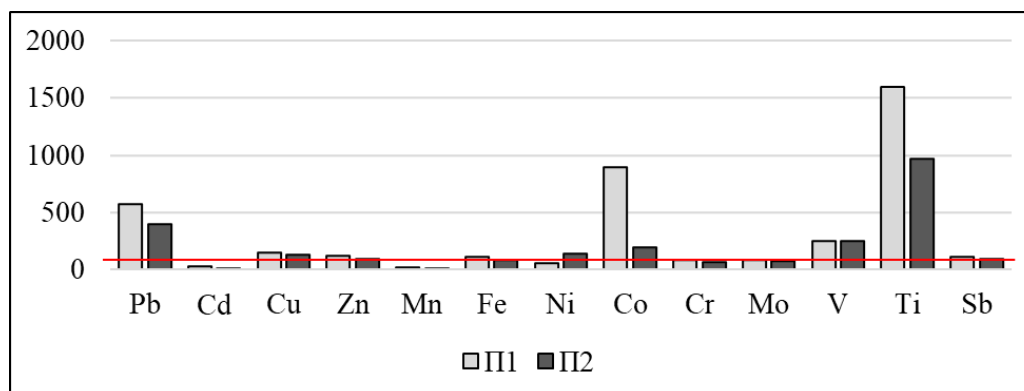


Рисунок 2 – Вынос ТМ листьями сальфии (в % относительно контрольной почвы – горизонтальная линия)

В то же время на контрольных почвах наблюдался больший вынос марганца, при его меньшем валовом содержании. Данное явление объясняется большим содержанием фосфора и меньшим pH почвы (таблица 3), что способствует резкому увеличению подвижности данного металла [19].

В предыдущих исследованиях отмечалось изменение урожайности и элементного состава надземных частей сальфии, выращенной в горшочечном эксперименте на почвах с сильным загрязнением ТМ [21]. Причем при выращивании сальфии в плавающих гидропонных системах в питательных растворах в присутствии тяжелых металлов растения активно накапливали Pb, Cu, Zn и Cd [12].

График анализа главных компонент (РСА) для всех анализируемых растений описывает 60,5 % общего варьирования (ось № 1 – 37,8 %, ось № 2 – 22,7 %) (рисунок 3).

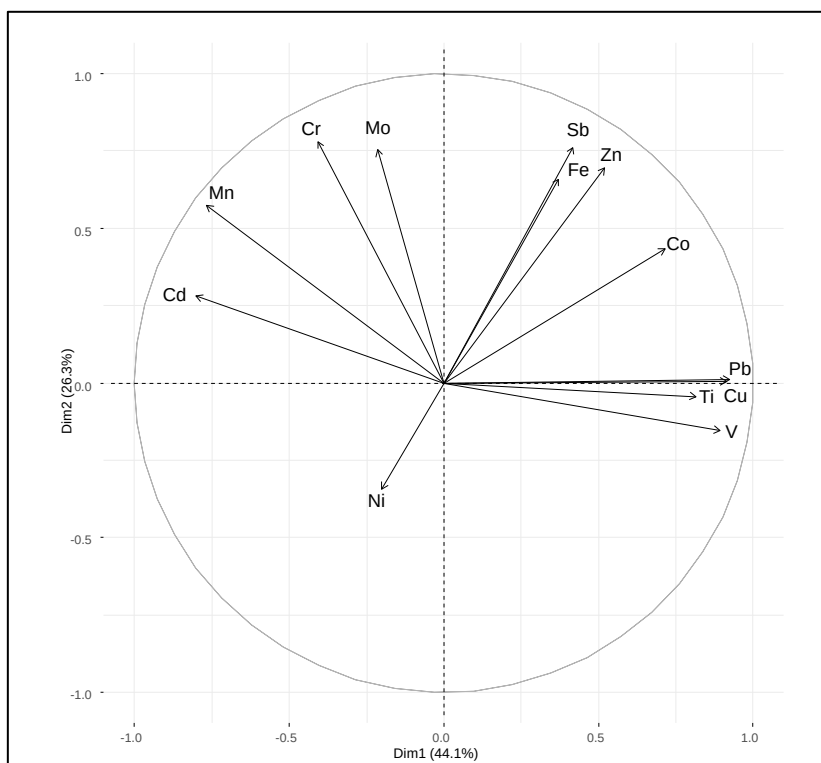


Рисунок 3 – График зависимости минераломассы растений от почвы в пространстве двух факторов (РСА)

Для ММ растений можно выделить несколько ассоциаций, описываемых соответствующими сценариями: первая ассоциация включает Pb, Cu, Ti, V и обусловлена главным образом, высокими показателями минераломассы по отношению к контролю. Причем степень корреляции между содержанием ТМ пула очень высока и приближается к 1 (таблица 6), что свидетельствует о схожей накопительной стратегии растений по отношению к данным элементам.

Таблица 6 – Корреляционная матрица для ТМ в минераломассе сільфії (выделены статистически достоверные значения)

ТМ	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	V	Ti
Cd	-0,65	–										
Cu	0,94	-0,71	–									
Zn	0,60	-0,18	0,58	–								
Mn	-0,74	0,75	-0,78	0,01	–							
Fe	0,21	-0,14	0,23	0,58	0,21	–						
Ni	-0,10	-0,04	-0,04	-0,20	-0,05	-0,26	–					
Co	0,59	-0,50	0,50	0,69	-0,17	0,70	-0,34	–				
Cr	-0,39	0,50	-0,39	0,21	0,71	0,24	-0,10	0,02	–			
Mo	-0,14	0,30	-0,07	0,35	0,49	0,16	-0,12	-0,02	0,83	–		
V	0,77	-0,77	0,76	0,19	-0,80	0,20	-0,14	0,53	-0,32	-0,19	–	
Ti	0,64	-0,58	0,60	0,20	-0,62	0,31	-0,36	0,62	-0,24	-0,20	0,91	–
Sb	0,46	-0,11	0,48	0,76	0,03	0,59	-0,26	0,43	0,40	0,51	0,23	0,19

Для второй группы (Fe, Sb, Zn и Co) значения ММ схожи с контрольными растениями и практически не изменяются в загрязненных почвах. Промежуточное место занимает кобальт, который имеет корреляционную связь как с элементами первой ассоциации, так и со второй. К третьей ассоциации относятся Cd, Mn, Cr, Mo, вынос у которых меньше, чем у контрольных растений. Данные элементы характеризуются сильной

обратной связью с ТМ первой ассоциации. Обособлено расположен никель. Статистически подтвержден фитоэкстракционный потенциал сильфии по отношению к Pb, Cu, Ti и V.

Заклучение

Таким образом, клоны сильфии пронзеннолистной, полученные в условиях *in vitro*, возможно выращивать на грунтах с повышенным содержанием ТМ в вегетационных сосудах путем прямого переноса и адаптации при поддержании высокой влажности воздуха в области листового аппарата на начальных этапах. Выявлено влияние загрязненных почв на биометрические параметры и химический состав листьев растений-ренерантов сильфии пронзеннолистной в первый год вегетации в условиях *in vivo*. Установленные фитоэкстракционные особенности сильфии с учетом продуктивного долголетия культуры (более 15 лет) позволяют рекомендовать данное растение в качестве биоремедианта для почв с полиэлементным загрязнением среднего уровня. Для уточнения транслокационных тенденций во временном аспекте требуется проведение дополнительных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Alibert, G. Sunflower tissue and cell-cultures and their use in biotechnology / G. Alibert, C. Aslanecanabe, M. Burrus // Plant Phys. and Bioch. – 1994. – Vol. 32. – P. 31–44.
2. Skirvin, R. Somaclonal variation: has it proved useful for plant improvement? / R. Skirvin, M. Norton, K. McPheeters // In Acta Hortic. – 1993. – Vol. 199. – P. 333–340.
3. Guadagnini, M. In vitro breeding for metal-accumulation in two Tobacco (*Nicotiana tabacum*) Cultivars / M. Guadagnini // PhD thesis. – University of Freiburg. – 2000. – 97 p.
4. Vangronsveld, J. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field / J. Vangronsveld [et al.] // Env. Sci. and Poll. Res. – 2009. – Vol. 16, P. 765–794.
5. Lyubenova, L. Response of antioxidant enzymes in *Nicotiana tabacum* clones during phytoextraction of heavy metals / L. Lyubenova [et al.] // Env. Sci. and Poll. Res. – 2009. – Vol. 16, P. 573–581.
6. Kolbas, A. Field evaluation of one Cu-resistant somaclonal variant and two clones of tobacco for copper phytoextraction at a wood preservation site / A. Kolbas [et al.] // Env. Sci. and Poll. Res. – 2020. – Vol. 27. – P. 27831–27848.
7. Микроэлементы в окружающей среде: биогеохимия, биотехнология и биоремедиация: Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation / Под ред. М. Н. В. Прасада, К.С. Саджвана, Р. Найду; пер. с англ. Д. И. Башмакова и А. С. Лукаткина. – Москва: Физматлит, 2009. – 815 с.
8. Пастухова, М. А. Экономическая эффективность создания средостабилизирующих агрофитоценозов на основе сильфии пронзеннолистной в условиях агроэкологически проблемных ареалов агроландшафтов / М. А. Пастухова, Б. В. Шелюто // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии: научно-методический журнал. – Горки, 2021. – № 1. – С. 82–85.
9. Nescu, V. Physiological aspects of absorption, translocation, and accumulation of heavy metals in *Silphium perfoliatum* L. plants grown in a miningcontaminated soil / V. Nescu [et al.] // Minerals. – 2022. – Vol. 12, P. 334.

10. Figas, A. Influence of drip irrigation on the height of the biennial cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) from the micropropagation seedlings / A. Figas [et al.] // Infrastructure and Ecology of Rural Areas. – 2015. – Vol. 3, P. 779–786.

11. Zhang, X. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils / X. Zhang [et al.] // Bioresour. Technol. – 2010. – Vol. 101, P. 2063–2066.

12. Sumalan, R.L. The Impact of heavy metal accumulation on some physiological parameters in *Silphium perfoliatum* L. plants grown in hydroponic systems / R. L. Sumalan [et al.] // Plants. – 2023. – Vol. 12. – P. 1718.

13. Колбас, А. П. Оценка эффективности растений-кандидатов для биоремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами / А. П. Колбас [и др.] // Экологическая культура и охрана окружающей среды: IV Дорофеевские чтения : сб. материалов межд. науч.-практ. конф., Витебск, 29 нояб. 2024 г. / Витеб. гос. ун-т ; редкол.: Е.Я. Аршанский (отв. ред.) [и др.]. – Витебск : ВГУ, 2024. – С. 359–361.

14. Качанович, П. В. Особенности пространственного распределения свинца в почвах в зоне влияния аккумуляторного производства / П. В. Качанович // Молодежь в науке – 2021 : тез. Докл. XX Междунар. науч. конф. Молодых ученых, Минск, 20–22 сент. 2023 г. / Нац. Академ. Наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2023. – С. 725–727.

15. Левый, А. В. Разработка технологии микроклонального размножения в условиях *in vitro* сильфии пронзеннолистной (*Silphium perfoliatum* L.) сорта Первый белорусский как потенциально эффективной культуры ремедианта загрязненных территорий / А. В. Левый, М. А. Пастухова // Природнае асяроддзе Палесся і навукова-практычныя аспекты рацыянальнага рэсурсакарыстання: зб. навук. прац. XI Міжнар. навук. канф. «Природнае асяроддзе Палесся», Брэст, 11–13 верасня 2024 / Палескі аграрна-экал. інст. НАН Беларусі ; рэдкал. М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.] – Брэст : Альтернатива, 2024. – С. 215–218.

16. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 25 января 2021 г. № 37 «Об утверждении гигиенических нормативов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100037>. – Дата доступа: 01.12.2024.

17. ЭкоНиП 17.03.01-001-2021 «Охрана окружающей среды и природопользование. Земли (в том числе почвы). Нормативы качества окружающей среды. Дифференцированные нормативы содержания химических веществ в почвах и требования к их применению» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ecolog.by/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show_file.php?fid=7510. – Дата доступа 01.06.2024.

18. Михальчук, Н. В. Фоновое содержание тяжелых металлов и микроэлементов в почвах и растительности юго-запада Беларуси как основа для сравнительных оценок при производстве органической продукции на основе принципов зеленой экономики / Н. В. Михальчук, А. Н. Мялик // Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике; редкол.: В. С. Хомич (гл. ред.), В. Ф. Логинов, Е. В. Санец. – Минск : СтройМедиаПроект. – 2019. – С. 266–281.

19. Саєт Ю. Е. [и др.]. Геохимия окружающей среды. – М. : Недра, 1990. – 335 с.

20. Calabrese, E. J., Blain R. B. Hormesis and plant biology / E. J. Calabrese, R. B. Blain // Environmental Pollution. – 2009. – Vol. 157. – P. 42–48.

21. Antonkiewicz, J. Effect of soil contamination with heavy metals on element contents in *Silphium perfoliatum* (*Silphium perfoliatum* L.) / J. Antonkiewicz, C. Jasiewicz // Ecological Chemistry and Engineering. – 2003. – Vol 10. – P. 205–210.

REFERENCES

1. Alibert, G. Sunflower tissue and cell-cultures and their use in biotechnology / G. Alibert, C. Aslanachanabe, M. Burrus // *Plant Phys. and Bioch.* – 1994. – Vol. 32. – P. 31–44.
2. Skirvin, R. Somaclonal variation: has it proved useful for plant improvement? / R. Skirvin, M. Norton, K. McPheeters // *In Acta Hortic.* – 1993. – Vol. 199. – P. 333–340.
3. Guadagnini, M. In vitro breeding for metal-accumulation in two Tobacco (*Nicotiana tabacum*) Cultivars / M. Guadagnini // PhD thesis. – University of Freiburg. – 2000. – 97 p.
4. Vangronsveld, J. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field / J. Vangronsveld [et al.] // *Env. Sci. and Poll. Res.* – 2009. – Vol. 16, P. 765–794.
5. Lyubenova, L. Response of antioxidant enzymes in *Nicotiana tabacum* clones during phytoextraction of heavy metals / L. Lyubenova [et al.] // *Env. Sci. and Poll. Res.* – 2009. – Vol. 16, P. 573–581.
6. Kolbas, A. Field evaluation of one Cu-resistant somaclonal variant and two clones of tobacco for copper phytoextraction at a wood preservation site / A. Kolbas [et al.] // *Env. Sci. and Poll. Res.* – 2020. – Vol. 27. – P. 27831–27848.
7. Mikroelementy v okruzhayushchey srede: biogeokhimiya, biotekhnologiya i bioremediatsiya: Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation / Pod red. M. N. V. Prasada, K. S. Sadzhvana, R. Naydu; per. s angl. D. I. Bashmakova i A. S. Lukatkina. – Moskva: Fizmatlit, 2009. – 815 s.
8. Pastukhova, M. A. Ekonomicheskaya effektivnost' sozdaniya sredostabiliziruyushchikh agrofitotsenozov na osnove sil'fii pronzennolistnoy v usloviyakh agroekologicheskikh problemnykh arealov agrolandshaftov / M. A. Pastukhova, B. V. Shelyuto // *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii: nauchno-metodicheskiy zhurnal.* – Gorki, 2021. – № 1. – S. 82–85.
9. Nescu, V. Physiological aspects of absorption, translocation, and accumulation of heavy metals in *Silphium perfoliatum* L. plants grown in a miningcontaminated soil / V. Nescu [et al.] // *Minerals.* – 2022. – Vol. 12, P. 334.
10. Figas, A. Influence of drip irrigation on the height of the biennial cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) from the micropropagation seedlings / A. Figas [et al.] // *Infrastructure and Ecology of Rural Areas.* – 2015. – Vol. 3, P. 779–786.
11. Zhang, X. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils / X. Zhang [et al.] // *Bioresour. Technol.* – 2010. – Vol. 101, P. 2063–2066.
12. Sumalan, R. L. The Impact of heavy metal accumulation on some physiological parameters in *Silphium perfoliatum* L. plants grown in hydroponic systems / R. L. Sumalan [et al.] // *Plants.* – 2023. – Vol. 12. – P. 1718.
13. Kolbas, A. P. Otsenka effektivnosti rasteniy-kandidatov dlya bioremediatsii pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami / A. P. Kolbas [i dr.] // *Ekologicheskaya kul'tura i okhrana okruzhayushchey sredy: IV Dorofeyevskiye chteniya : sb. materialov mezhd. nauch.-prakt. konf., Vitebsk, 29 noyab. 2024 g. / Viteb. gos. un-t ; redkol.: Ye. YA. Arshanskiy (otv. red.) [i dr.].* – Vitebsk : VGU, 2024. – S. 359–361.
14. Kachanovich, P. V. Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya svintsa v pochvakh v zone vliyaniya akkumulyatornogo proizvodstva / P. V. Kachanovich // *Molodezh' v nauke – 2021 : tez. Dokl. XX Mezhdunar. nauch. konf. Molodykh uchenykh, Minsk, 20–22 sent. 2023 g. / Nats. Akadem. Nauk Belarusi, Sovet molodykh uchenykh ; redkol : V. G. Gusakov (gl. red.) [i dr.].* – Minsk : Belarusskaya nauka, 2023. – S. 725–727.

15. Levyy, A. V. Razrabotka tekhnologii mikroklonal'nogo razmnazheniya v usloviyakh in vitro sil'fii pronzennolistnoy (*Silphium perfoliatum* L.) sorta Pervyy beloruskiy kak potentsial'no effektivnoy kul'tury remedianta zagryaznennykh territoriy / A. V. Levyy, M. A. Pastukhova // Pryrodnaye asyaroddze Paleessya i navukova-praktychnyya aspekty ratsyyanal'naga resursakarystannya: zb. navuk. prats. KHI Mizhnar. navuk. kanf. «Pryrodnaye asyaroddze Paleessya», Brest, 11–13 verasnya 2024 / Paleski agrarna-ekal. inst. NAN Belarusi ; redkal. M. V. Mikhal'chuk (gal. red.) [i insh.] – Brest : Al'ternativa, 2024. – S. 215–218.

16. Postanovleniye Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 25 yanvarya 2021 g. № 37 «Ob utverzhdenii gigiyenicheskikh normativov» [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100037>. – Data dostupa: 01.12.2024.

17. EkoNiP 17.03.01-001-2021 «Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye. Zemli (v tom chisle pochvy). Normativy kachestva okruzhayushchey sredy. Differentsirovannyye normativy soderzhaniya khimicheskikh veshchestv v pochvakh i trebovaniya k ikh primeneniyu» [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: https://www.ecolog.by/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show_file.php?fid=7510. – Data dostupa: 01.03.2025.

17. EkoNiP 17.03.01-001-2021 «Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye. Zemli (v tom chisle pochvy). Normativy kachestva okruzhayushchey sredy. Differentsirovannyye normativy soderzhaniya khimicheskikh veshchestv v pochvakh i trebovaniya k ikh primeneniyu» [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: https://www.ecolog.by/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show_file.php?fid=7510. – Data dostupa: 01.06.2024.

18. Mikhal'chuk, N. V. Fonovoye soderzhaniye tyazhelykh metallov i mikroelementov v pochvakh i rastitel'nosti yugo-zapada Belarusi kak osnova dlya sravnitel'nykh otsenok pri proizvodstve organicheskoy produktsii na osnove printsipov zelenoy ekonomiki / N. V. Mikhal'chuk, A. N. Myalik // Ekologo-geograficheskiye problemy perekhoda k zelenoy ekonomike; redkol. : V. S. Khomich (gl. red.), V. F. Loginov, Ye. V. Sanets. – Minsk : StroyMediaProyekt. – 2019. – S. 266–281.

19. Sayet YU. Ye. [i dr.]. Geokhimiya okruzhayushchey sredy. – M. : Nedra, 1990. – 335 s.

20. Calabrese, E. J., Blain R.B. Hormesis and plant biology / E. J. Calabrese, R. B. Blain // Environmental Pollution. – 2009. – Vol. 157. – P. 42–48.

21. Antonkiewicz, J. Effect of soil contamination with heavy metals on element contents in *Silphium perfoliatum* (*Silphium perfoliatum* L.) / J. Antonkiewicz, C. Jasiewicz // Ecological Chemistry and Engineering. – 2003. – Vol 10. – P. 205–210.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 08.04.2025