Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.41.39.003

УДК 502.57; 57.044

А.Х. Хаблетдинова, Э.В. Нафикова, Г.Г. Бускунова

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ (НА ПРИМЕРЕ ТУКАНСКОГО КАРЬЕРА, РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН)

Аннотация. Представлены результаты исследования содержания тяжелых металлов (ТМ) – Cu, Zn, Fe, Ni, Mn, Cd, Co, Pb – в системе «почва–растение» на территории Туканского железорудного карьера (Белорецкий район, Республика Башкортостан). Объектами исследования выступили шесть видов дикорастущих лекарственных растений: тысячелистник обыкновенный (Achillea millefolium L.), синеголовник плосколистный (Eryngium planum L.), душица обыкновенная (Origanum vulgare L.), зверобой продырявленный (Hypericum perforatum L.), клевер луговой (Trifolium pratense L.), льнянка обыкновенная (Linaria vulgaris L.). Методом атомно-абсорбционной спектроскопии установлено, что почвы территории характеризуются допустимой категорией загрязнения по суммарному показателю Zc (4,96) для валовых форм ТМ, при этом приоритетными загрязнителями являются Ni (превышение ПДК) и Cd (превышение фоновых показателей). В органах исследованных растений выявлено превышение максимально допустимых уровней (МДУ) по Fe, Ni и Co. Наибольшей способностью к аккумуляции ТМ, особенно в корневой системе (акропетальный тип распределения), характеризовался Eryngium planum L. (АК до 6,00). Расчет коэффициента биологического поглощения (КБП) показал, что большинство ТМ относятся к элементам среднего захвата ($0,1 < КБП < 1$), в то время как расчет индекса аккумуляции (Ia) выявил энергичное накопление растениями Cu и Fe ($Ia > 10$). Установлены видовые различия биогеохимической активности (БХА). Наибольшая БХА1 (по КБП) отмечена у Achillea millefolium L. (3,67), а наибольшая БХА2 (по Ia) - у Trifolium pratense L. (700,76). Результаты свидетельствуют о потенциальной пригодности исследованных видов, в частности Eryngium planum L., для целей фитостабилизации на загрязненных территориях, а также необходимости мониторинга качества лекарственного растительного сырья, заготавливаемого в условиях техногенной нагрузки.

Ключевые слова: тяжелые металлы, биоаккумуляция, фиторемедиация, биогеохимическая активность, акропетальный коэффициент, Туканский карьер, лекарственные растения, экологический мониторинг.

Для цитирования: Хаблетдинова А.Х., Нафикова Э.В., Бускунова Г.Г. Биогеохимическая активность лекарственных растений в условиях техногенной нагрузки (на примере Туканского карьера, республика Башкортостан) // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып.2. С. 294–309. DOI: 10.35634/UdSU.2026.41.39.003.

Введение

Интенсификация горнодобывающей и перерабатывающей промышленности на Южном Урале, исторически сложившемся промышленном центре России, приводит к трансформации природных ландшафтов и формированию техногенных геохимических аномалий [1]. Одним из наиболее значимых факторов экологического риска является загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами (ТМ), обладающими высокой токсичностью, миграционной способностью и склонностью к кумуляции в биологических цепях [2, 3]. Почва выступает основным депо и буфером для ТМ, а растения, являясь центральным звеном в их миграции, отражают уровень доступности элементов и могут служить индикаторами загрязнения [4].

Особый интерес в этом контексте представляют дикорастущие лекарственные растения, которые, с одной стороны, являются объектом заготовки для фармацевтических и медицинских целей, а с другой – потенциальными аккумуляторами токсикантов [5]. Изучение их биоаккумуляционного потенциала позволяет не только оценить риски использования сырья, но и выявить виды, перспективные для фиторемедиации − технологии очистки почв с использованием растений [5-7].

Целью данного исследования явился сравнительный анализ биогеохимической активности шести видов лекарственных растений, произрастающих в окрестностях Туканского карьера, для оценки их аккумуляционного потенциала и роли в миграции ТМ в условиях техногенной нагрузки.

Материалы и методы

Исследования проводились летом 2023 года на территории Туканского железорудного карьера (Белорецкий район, Республика Башкортостан). Объектами исследования служили образцы почвы, отобранные методом

конверта с трех участков и шесть видов травянистых растений: тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), синеголовник плосколистный (*Eryngium planum* L.), душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.), зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.), льнянка обыкновенная (*Linaria vulgaris* L.).

Отбор и подготовка проб почвы и растений проводились в соответствии с общепринятыми методиками [8]. Содержание валовых и подвижных форм ТМ (Cu, Zn, Fe, Ni, Mn, Cd, Co, Pb) определяли атомно-абсорбционным методом.

Для оценки загрязнения почв использовались предельно допустимые концентрации (ПДК) подвижных форм тяжёлых металлов, а при их отсутствии – региональные геохимические фоновые значения (РГФ) или фоновые содержания из литературных источников. Коэффициент концентрации ($K_c = C/C_ф$) рассчитывался как отношение фактической концентрации к соответствующему нормативному или фоновому значению. Суммарный показатель загрязнения (Z_c) вычисляли по методу Ю.Е. Саета [9] для элементов с $K_c>1$: $Z_c=\sum K_c-(n-1)$, где K_c – коэффициент концентрации элемента, определяемый отношением содержания в почве к фоновому, n – число оцениваемых ингредиентов, и сравнивался по оценочным шкалам [10].

Аккумуляцию ТМ растениями оценивали с помощью двух коэффициентов: коэффициента биологического поглощения (КБП = $C_{раст.}$ / $C_{почва\ вал.}$) и индекса аккумуляции (I_a = $C_{раст.}$ / $C_{почва\ подв.}$) [11]. Распределение металлов в растениях характеризовали акропетальным коэффициентом (АК = $C_{корни}$ / $C_{надз.\ часть}$). Биогеохимическую активность вида (БХА) рассчитывали как сумму КБП ($БХА_1$) и Ia ($БХА_2$) для всех элементов [12, 13].

Для оценки уровня накопления тяжелых металлов в растительном сырье использовались значения максимально допустимых уровней (МДУ), установленных для кормов сельскохозяйственных животных [19], что обусловлено отсутствием утвержденных нормативов для лекарственных

растений и позволяет провести сравнительную характеристику степени загрязнения фитомассы.

Результаты и их обсуждение

1. Содержание и подвижность ТМ в почвах

Анализ почв показал, что содержание валовых форм Cu, Zn, Ni, Cd, Pb не превышает ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК). Однако концентрации валового Mn превышали значения регионального геохимического фона (РГФ) и кларка в 2,23 и 1,17 раза соответственно, а Cd - в 3,74 и 4,3 раза (табл. 1).

Таблица 1

Содержание валовых форм тяжелых металлов в почвах с. Тукан Белорецкого р-н, Республики Башкортостан

	Cu	Zn	Fe	Ni	Mn	Cd	Co	Pb
Фактическая концентрация ТМ, мг/кг	12	59	4197	24	1170	0,56	11	0,44
ОДК, мг/кг [14]	132	220	-	80	-	2	-	130
ПДК, мг/кг [13]	-	-	-	-	1500	-	-	32
РГФ, мг/кг	49	181,7	27533	58,7 [16]	525,39	0,15	16,2 [16]	21,8
Кларк, мг/кг [15]	47	83	46500	58	1000	0,13	18	-
$К_с$	0,2448	0,324711	0,152435	0,408859	2,226917	3,733333	0,679012	0,018320

Среди подвижных форм превышение ПДК было зафиксировано только для Ni в 1,275 раза. Превышение РГФ для подвижных форм отмечено у Zn – 10,6 раза, Fe – 2,5 раза, Ni в 6,4 раза и Co в 65 раз (табл. 2).

Для оценки уровня техногенного загрязнения почв валовыми формами тяжёлых металлов рассчитаны коэффициенты концентрации Кс относительно регионального геохимического фона (РГФ) (табл. 1).

Таблица 2

Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах с. Тукан Белорецкого р-н, Республики Башкортостан

	Cu	Zn	Fe	Ni	Mn	Cd	Co	Pb
Фактическая концентрация ТМ, мг/кг	0,02	17	5,7	5,1	29	0,22	2,6	0,02
ПДК, мг/кг	3	23	-	4	140	0,2	5	6
РГФ, мг/кг [17]	3	1,6	2,3	0,8	33	-	0,04	0,8

Установлено, что значения $К_с$>1 характерны только для марганца (2,23) и кадмия (3,73), что указывает на их накопление в почвах относительно фонового уровня. Суммарный показатель загрязнения Z_c, вычисленный по методу Ю.Е. Саета [9] для элементов с Кс>1, составил:

$$Z_c = (K_c^{Mn} + K_c^{Cd}) - (n - 1) = (2,23 + 3,73) - 1 = 4,96,$$

где n=2 – число учитываемых элементов.

Согласно оценочной шкале [10], полученное значение Z_c=4,96 соответствует минимальному уровню загрязнения (Z_c<8) и позволяет характеризовать экологическую обстановку как относительно удовлетворительную. По классификации Ю.Е. Саета [9] данная величина попадает в категорию допустимого загрязнения (Z_c<16).

2. Содержание ТМ в растениях и акропетальный коэффициент

Во всех исследованных видах растений в различных органах (цветки, листья, стебли, корни) было зафиксировано систематическое превышение МДУ [18, 19] по Fe, Ni и Co. Например, в листьях *Achillea millefolium* L. концентрации Fe, Ni и Co превышали МДУ [6] в 3,08, 17 и 13 раз соответственно. Концентрации Cu, Zn и Pb, как правило, не превышали нормативных значений (рис. 1).

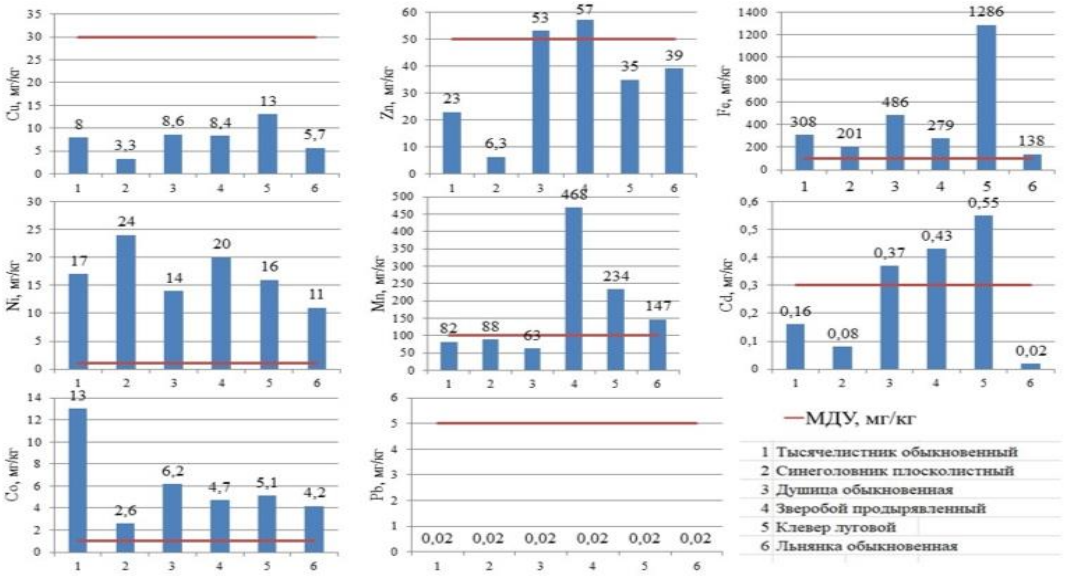


Рис. 1. Содержание тяжелых металлов в листьях растений, произрастающих в окрестностях железорудного Туканского карьера

Расчет акропетального коэффициента (АК) показал, что для *Eryngium planum* L. все исследованные ТМ распределялись по акропетальному типу (АК > 1,0), с максимальным значением до 6,00, что свидетельствует о выраженной барьерной функции корневой системы и задержке металлов. Для остальных видов характерно смешанное распределение: часть элементов (чаще Pb, реже Ni, Cd) накапливалась в корнях (АК > 1), а другая часть (Cu, Zn, Fe, Mn, Co) −транслировалась в надземные органы (АК < 1) (рис. 2).

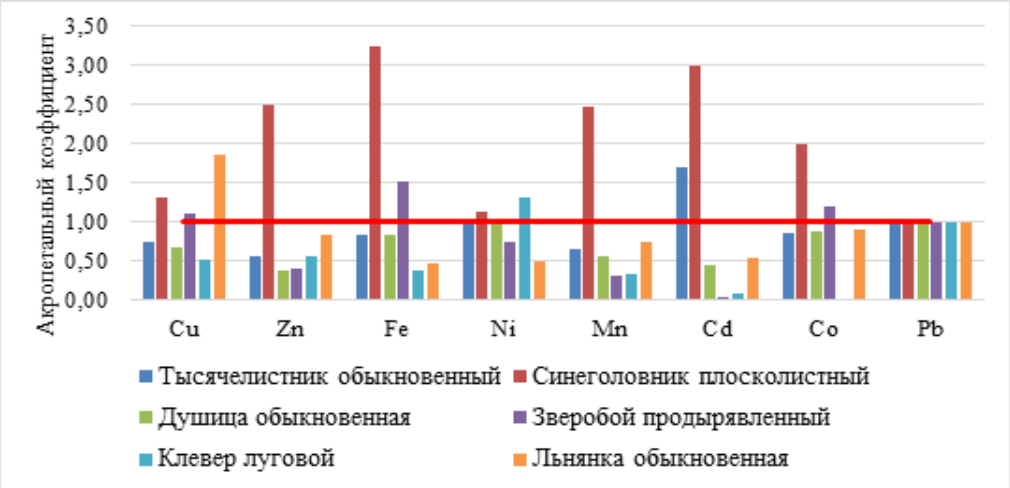


Рис. 2. Акропетальный коэффициент исследуемых растений на территории Туканского железорудного карьера

3. Аккумуляция ТМ и биогеохимическая активность видов

Биогеохимические показатели (БП) (коэффициент биологического накопления, индекс аккумуляции, акропетальный коэффициент, биогеохимическую активность) интенсивности поглощения ТМ исследуемыми растениями представлены в табл. 3.

Таблица 3

Биогеохимические показатели (БП) интенсивности поглощения ТМ исследуемыми растениями

Вид	БП	Cu	Zn	Fe	Ni	Mn	Cd	Co	Pb	$БХА_1$	$БХА_2$
Тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.)	КБП	0,75	0,45	0,11	0,83	0,06	0,67	0,74	0,05	3,67	547,5
	Ia	4,10	45,44	670,14	1,17	25,14	3,54	2,30	62,13		
	АК	0,74	0,57	0,84	1,00	0,66	1,69	0,86	1,00		
Синеголовник плосколистный (*Eryngium planum* L.)	КБП	0,45	0,24	0,11	0,88	0,08	0,38	0,63	0,05	2,81	367,2
	Ia	272,50	0,84	82,02	4,12	3,07	0,95	2,65	1,00		
	АК	1,30	2,49	3,23	1,13	2,48	3,00	1,99	1,00		
Душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.)	КБП	0,77	0,63	0,16	0,73	0,05	0,59	0,61	0,05	3,59	597,3
	Ia	463,75	2,19	120,96	3,43	1,83	1,51	2,59	1,00		
	АК	0,67	0,39	0,83	0,96	0,55	0,44	0,88	1,00		
Зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.)	КБП	0,77	0,51	0,06	0,73	0,18	0,72	0,65	0,05	3,66	522,7
	Ia	462,50	1,76	42,32	3,43	7,09	1,83	2,76	1,00		
	АК	1,11	0,40	1,52	0,75	0,32	0,04	1,20	1,00		
Клевер луговой (*Trifolium pratense* L.)	КБП	0,88	0,43	0,22	0,79	0,08	0,33	0,58	0,05	3,36	700,8
	Ia	527,50	1,50	160,44	3,73	3,29	0,85	2,45	1,00		
	АК	0,52	0,56	0,39	1,30	0,32	0,08	0,00	1,00		
Льнянка обыкновенная (*Linaria vulgaris* L.)	КБП	0,65	0,51	0,06	0,54	0,07	0,06	0,47	0,05	2,40	442,8
	Ia	391,25	1,76	41,27	2,56	2,81	0,15	1,97	1,00		
	АК	1,87	0,83	0,46	0,48	0,73	0,54	0,89	1,00		

Наибольшая общая биогеохимическая активность по КБП ($БХА_1$) была характерна для *Achillea millefolium* L. (3,67), а наименьшая – для *Linaria vulgaris* L. (2,40). Однако более показательная величина $БХА_2$, рассчитанная по подвижным формам (I_a), была максимальной у *Trifolium pratense* L. (700,8)

и минимальной у *Eryngium planum* L. (367,16). Высокие значения $БХА_2$ подтверждают интенсивную миграцию ТМ в системе «почва-растение» на исследуемой территории, несмотря на относительно низкие показатели валового загрязнения почв.

По результатам КБП вычислили ряд интенсивности поглощения тяжелых металлов в растениях (табл. 4).

Таблица 4

Ряд интенсивности поглощения тяжелых металлов (по КБП) в растениях

Интенсивность поглощения	**Виды растений**					
	Тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.)	Синеголовник плосколистный (*Eryngium planum* L.)	Душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.)	Зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.)	Клевер луговой (*Trifolium pratense* L.)	Льнянка обыкновенная (*Linaria vulgaris* L.)
Энергичного накопления (>10)						
Сильного накопления (1-10)						
Среднего захвата (0,1-1)	Cu, Zn, Fe, Ni, Cd,Co	Cu, Zn, Fe, Ni, Cd, Co	Cu, Zn, Fe, Ni, Cd, Co	Cu, Zn, Ni, Mn, Cd, Co	Cu, Zn, Fe, Ni, Cd, Co	Cu, Zn, Ni, Co
Слабого и очень слабого захвата (<0,1)	Mn,Pb	Mn ,Pb	Mn ,Pb	Fe, Pb	Mn ,Pb	Fe, Mn, Cd, Pb

Ряд биологического поглощения, построенный по КБП, показал, что ТМ в большой степени относятся к элементами среднего захвата (КБП<1), за исключением Mn, Pb в *Achillea millefolium* L., *Eryngium planum* L., *Origanum vulgare* L., *Trifolium pratense* L., *Linaria vulgaris* L., Fe, Pb - в *Hypericum perforatum* L., и Fe, Mn, Cd, Pb в *Linaria vulgaris* L., которые являются элементами слабого и очень слабого накопления (КПБ<0,1).

По результатам индекса аккумуляции вычислили ряд интенсивности поглощения тяжелых металлов (табл. 5).

Таблица 5

Ряд интенсивности поглощения тяжелых металлов (по Ia) в растениях

Интенсивность поглощения	Виды растений					
	Тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.)	Синеголовник плосколистный (*Eryngium planum* L.)	Душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.)	Зверобой продырявленный (*Hypericum perforatum* L.)	Клевер луговой (*Trifolium pratense* L.)	Льнянка обыкновенная (*Linaria vulgaris* L.)
Энергичного накопления (>10)	Cu, Fe	Cu, Fe	Cu, Fe	Cu, Fe	Cu, Fe	Cu, Fe
Сильного накопления (1-10)	Zn, Ni, Mn, Cd, Co, Pb	Ni, Mn, Co, Pb	Zn, Ni, Mn, Cd, Co, Pb	Zn, Ni, Mn, Cd, Co, Pb	Zn, Ni, Mn, Co, Pb	Zn, Ni, Mn, Co, Pb
Среднего захвата (0,1-1)		Zn, Cd			Cd	Cd
Слабого и очень слабого захвата (<0,1)						

В отличие от КБП, расчет индекса аккумуляции (I_a), учитывающего подвижные формы, выявил высокую интенсивность поглощения. Элементы Cu и Fe во всех растениях относились к группе энергичного накопления ($I_a > 10$). Элементы Ni, Mn, Co, Pb, а в некоторых видах Zn и Cd, относились к группе сильного накопления ($1 < I_a < 10$).

Заключение

Проведенное исследование позволило установить, что почвы окрестностей Туканского карьера характеризуются допустимой категорией загрязнения по суммарному показателю Z_c (4,96), однако имеют повышенное содержание подвижных форм Ni, Zn, Fe и Co относительно регионального фона [18]. Изученные виды лекарственных растений активно аккумулируют ТМ, при этом

в их органах систематически превышены МДУ по Fe, Ni и Co, что указывает на потенциальный риск при использовании данного сырья в медицинских целях без предварительного контроля.

Выявлены значительные межвидовые различия в стратегиях накопления и распределения ТМ. *Eryngium planum* L. продемонстрировал выраженную способность к удержанию ТМ в корневой системе (акропетальный тип), что делает его перспективным видом для фитостабилизации загрязненных техногенных ландшафтов. Для остальных исследованных видов, напротив, характерна активная транслокация элементов в надземные органы. В частности, высокие значения индекса аккумуляции (I_a) и биогеохимической активности ($БХА_2$) у *Trifolium pratense* L. подтверждают его роль как одного из наиболее интенсивных мигрантов ТМ в биологическом круговороте на исследуемой территории.

Полученные результаты имеют практическое значение для разработки систем биомониторинга и мероприятий по фиторемедиации в промышленных регионах Южного Урала, а также для регламентации заготовки лекарственного растительного сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабанов М. В., Стрекулёв Г. Б. Геохимические процессы накопления тяжёлых металлов в ландшафтах Южного Урала // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 184 – 192.
2. Опекунова М. Г., Алексеева-Попова Н. В., Арестова И. Ю. и др. Тяжёлые металлы в почвах и растениях Южного Урала: экологическое состояние фоновых территорий // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2001. Вып. 4. (№ 31). С. 45 – 53.
3. Суюндуков Я. Т., Янтурин С. И., Сингизова Г. Ш. Накопление и миграция тяжёлых металлов в основных компонентах антропогенных экосистем Башкирского Зауралья в зоне влияния объектов горнорудного комплекса. Уфа: Гилем. 2013. 155 с.
4. Медведев И. Ф., Деревягин С. С. Тяжёлые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс. 2017. 178 с.

5. Дьякова Н. А. Изучение закономерностей накопления наиболее опасных экотоксикантов в дикорастущем лекарственном растительном сырье различных экотопов Воронежской области // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23. Вып. 1. С. 77 – 85.
6. Бускунова Г. Г. и Ягафарова Г. А. Тяжёлые металлы в системе «почва - дикорастущее лекарственное растение» (на примере *Cichorium intybus* L.). Самарский научный вестник. 2022. Т. 11. № 1. С. 36 – 42.
7. Хайретдинова В. Р., Нафикова Э. В., Александров Д. В. Совершенствование методов рекультивации нефтезагрязненных почв с применением биоугля и микоризы // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2024. Т. 20. № 2. С. 69 – 72.
8. Опекунова М. Г. Биоиндикация загрязнений: учеб.пособие. СПб: Санкт-Петербургский университет. 2004. 228 с.
9. Сает Ю. Е., Ревич Б. А., Янин Е. П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра. 1990. 335 с.
10. Завальцева О. А. Основы биогеохимии: учеб. пособие для студентов, обучающихся по программе бакалавриата специальностей «Почвоведение», «Экология» «Природопользование», «Химия». Ульяновский государственный университет. Ульяновск: УлГУ. 2013. 95 с
11. Перельман А. И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
12. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Москва: ЦИНАО. 1992. 61 с.
13. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2006. 15 с.
14. ГН 2.1.7.2511-09. Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. 2009. 10 с.
15. Касимов Н. С., Власов Д. В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2015. № 2. С. 7 – 17.
16. Серегина, Ю. Ю., Семенова И. Н., Кужина Г. Ш. Комплексная оценка загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова прибрежной зоны р. Белая Белорецкого района Республики Башкортостан // Живые и биокосные системы. 2013. № 3. С. 12.

17. Папян Э. Э. Оценка воздействия горнорудного производства на природно-территориальные комплексы Башкирского Зауралья методами биоиндикации: специальность 25.00.36 «Геоэкология»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Санкт-Петербург. 2016. 22 с.
18. Хаблетдинова А. Х., Бускунова Г. Г. Оценка биогеохимического состояния *Origanum vulgare* L. В окрестностях Туканского карьера Белорецкого района Республики Башкортоста // Неделя науки – 2024: Материалы Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Сибай, 24–25 апреля 2024 года. Сибай: Уфимский университет науки и технологий. 2024. С. 257 – 259.
19. Временный максимальный допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках // Россельхознадзор. URL: https://fsvps.gov.ru (дата обращения: 18.02.2026).

Поступила в редакцию: 27.11.25

Сведения об авторах

Хаблетдинова Альфия Хайдаровна
Магистрант, ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа. Россия.
E-mail: albuseques@yandex.ru

Нафикова Эльвира Валериковна
Кандидат географических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа. Россия.
E-mail: nafikovaev@uust.ru

Бускунова Гульсина Гильмановна
кандидат биологических наук, доцент, доцент ФГБОУ ВО Сибайский институт (филиал) «Уфимского университета науки и технологий», г. Сибай, Россия.
E-mail: gulsina_busk@mail.ru

A.H. Khabletdinova, E.V. Nafikova, G.G. Buskunova

BIOGEOCHEMICAL ACTIVITY OF MEDICINAL PLANTS UNDER TECHNOGENIC LOAD (CASE STUDY OF THE TUKAN QUARRY, REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

Annotation. The paper presents the results of a study on the content of heavy metals (HMs) – Cu, Zn, Fe, Ni, Mn, Cd, Co, Pb – in the "soil–plant" system within the territory of the Tukan iron ore quarry (Beloretsky District, Republic of Bashkortostan). The objects of the study were six species of wild medicinal plants: yarrow (Achillea millefolium L.), flat-leaved eryngo (Eryngium planum L.), oregano (Origanum vulgare L.), St. John's wort (Hypericum perforatum L.), red clover (Trifolium pratense L.), and common toadflax (Linaria vulgaris L.). Using atomic absorption spectroscopy, it was found that the soils of the area are characterized by an admissible pollution category according to the total contamination index Zc (4.96) for gross forms of HMs, with the priority pollutants being Ni (exceeding the maximum permissible concentration, MPC) and Cd (exceeding background levels). In the organs of the studied plants, exceedances of the maximum allowable levels (MAL) were detected for Fe, Ni, and Co. Eryngium planum L. exhibited the highest capacity for HM accumulation, especially in the root system (acropetal distribution type), with an accumulation coefficient (AC) of up to 6.00. Calculation of the biological absorption coefficient (BAC) showed that most HMs belong to the medium-capture elements ($0.1 < BAC < 1$), while the accumulation index (Ia) calculation revealed vigorous accumulation of Cu and Fe by plants ($Ia > 10$). Species-specific differences in biogeochemical activity (BCA) were established. The highest BCA1 (based on BAC) was observed in Achillea millefolium L. (3.67), and the highest BCA2 (based on Ia) was observed in Trifolium pratense L. (700.76). The results indicate the potential suitability of the studied species, particularly Eryngium planum L., for phytostabilization purposes in contaminated areas, as well as the necessity of monitoring the quality of medicinal plant raw materials harvested under conditions of technogenic load.

Keywords: heavy metals, bioaccumulation, phytoremediation, biogeochemical activity, acropetal coefficient, Tukan quarry, medicinal plants, environmental monitoring.

For citation: Khabletdinova A.H., Nafikova E.V., Buskunova G.G. [Biogeochemical activity of medicinal plants under technogenic load (case study of the Tukan quarry, Republic of Bashkortostan)] *Upravlenie tekhnosferoi,* 2026, vol. 9, issue 2, pp. 294–309. DOI: 10.35634/UdSU.2026.41.39.003. (In Russ.).

REFERENCES

1. Shabanov M. V., Strekulev G. B. Geokhimicheskie protsessy nakopleniya tyazhelykh metallov v landshaftakh Yuzhnogo Urala [Geochemical processes of heavy metal accumulation in the landscapes of the Southern Urals]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* [*Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*]. 2021, vol. 332, no. 1, pp. 184 – 1192. (In Russ.).

2. Opekunova M. G., Alekseeva-Popova N. V., Arestova I. Yu. i dr. Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh Yuzhnogo Urala: ehkologicheskoe sostoyanie fonovykh territorii [Heavy metals in soils and plants of the Southern Urals: the ecological state of background territories]. *Vestnik SPbGU.* [*Bulletin of St. Petersburg State University*], series 7, 2001, issue 4 (No. 31), pp. 45 – 53. (In Russ.).
3. Suyundukov Ya. T., Yanturin S. I., *Singizova G. Sh. Nakoplenie i migratsiya tyazhelykh metallov v osnovnykh komponentakh antropogennykh ehkosistem Bashkirskogo Zaural'ya v zone vliyaniya ob"ektov gornorudnogo kompleksa*. [Accumulation and migration of heavy metals in the main components of anthropogenic ecosystems of the Bashkir Trans-Urals in the zone of influence of mining facilities]. Ufa: Gilem, 2013, 155 p. (In Russ.).
4. Medvedev I. F., Derevyagin S. S. *Tyazhelye metally v ehkosistemakh*. [Heavy metals in ecosystems]. Saratov: Rakurs, 2017, 178 p. (In Russ.).
5. D'yakova N. A. Izuchenie zakonomernostei nakopleniya naibolee opasnykh ehkotoksikantov v dikorastushchem lekarstvennom rastitel'nom syr'e razlichnykh ehkotopov Voronezhskoi oblasti [Study of the patterns of accumulation of the most dangerous ecotoxicants in wild medicinal plant raw materials of various ecotopes of the Voronezh region]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ehkologiya*. [*Proceedings of the Saratov University. A new series. Series: Chemistry. Biology. Ecology*]. 2023, vol. 23, issue 1, pp. 77 – 85. (In Russ.).
6. Buskunova G. G. i Yagafarova G. A. Tyazhelye metally v sisteme «pochva - dikorastushchee lekarstvennoe rastenie» (na primere Cichorium intybus L.). [Heavy metals in the "soil - wild medicinal plant" system (using the example of Cichorium intybus L.)]. *Samarskii nauchnyi vestnik* [*Samara Scientific Bulletin*]. 2022, vol. 11, no. 1, pp. 36 – 42. (In Russ.).
7. Khairetdinova V. R., Nafikova Eh. V., Aleksandrov D. V. Sovershenstvovanie metodov rekul'tivatsii neftezagryaznennykh pochv s primeneniem biouglya i mikorizy [Improvement of methods of recultivation of oil-contaminated soils using biochar and mycorrhiza]. *Ehkologicheskii Vestnik Severnogo Kavkaza* [*Ecological Bulletin of the North Caucasus*]. 2024, vol. 20, no. 2, pp. 69 – 72. (In Russ.).
8. Opekunova M. G. *Bioindikatsiya zagryaznenii: ucheb.posobie.* [Bioindication of pollution: textbook]. SPb: Sankt-Peterburgskii universitet, 2004, 228 p. (In Russ.).
9. Saet Yu. E., Revich B. A., Yanin E. P. i dr. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow: Nedra, 1990, 335 p. (In Russ.).
10. Zaval'tseva O. A. Osnovy biogeokhimii: ucheb. posobie dlya studentov, obuchayushchikhsya po programme bakalavriata spetsial'nostei «Pochvovedenie», «Ehkologiya» «Prirodopol'zovanie»,

«Khimiya». [Fundamentals of biogeochemistry: textbook. a manual for students studying under the bachelor's degree program in the fields of "Soil Science", "Ecology", "Nature Management", "Chemistry"]. *Ul'yanovskii gosudarstvennyi universitet* [*Ulyanovsk State University*]. Ul'yanovsk: UlGU, 2013. 95 p. (In Russ.).

11. Perel'man A. I. *Geokhimiya landshafta*. [Geochemistry of landscape]. Moscow: Publ., Vysshaya shkola, 1975, 342 p. (In Russ.).
12. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodii i produktsii rastenievodstva*. [Guidelines for the determination of heavy metals in farmland soils and crop production]. Moscow: TsINAO, 1992, 61 p. (In Russ.).
13. GN 2.1.7.2511-09. *Orientirovochno-dopustimye kontsentratsii (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve: Gigienicheskie normativy.* [Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil: Hygienic standards]. Moscow: Federal'nyi tsentr gigieny i ehpidemiologii Rospotrebnadzora. 2009, 15 p. (In Russ.).
15. Kasimov N. S., Vlasov D. V. Klarki khimicheskikh ehlementov kak ehtalony sravneniya v ehkogeokhimii [Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya* [*Bulletin of the Moscow University, Series 5. Geography*]. 2015, no. 2, pp. 7 – 17. (In Russ.).
16. Seregina, Yu. Yu., Semenova I. N., Kuzhina G. Sh. Kompleksnaya otsenka zagryazneniya tyazhelymi metallami pochvennogo pokrova pribrezhnoi zony r. Belaya Beloretskogo raiona Respubliki Bashkortostan [Comprehensive assessment of heavy metal pollution of the soil cover of the coastal zone of the Belaya River in the Beloretsk region of the Republic of Bashkortostan]. *Zhivye i biokosnye sistemy*. [*Living and biokos systems*]. 2013, no. 3, p. 12. (In Russ.).
17. Papyan Eh. Eh. *Otsenka vozdeistviya gornorudnogo proizvodstva na prirodno-territorial'nye kompleksy Bashkirskogo Zaural'ya metodami bioindikatsii: spetsial'nost' 25.00.36 «Geoehkologiya»: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geograficheskikh nauk.* [Assessment of the impact of mining on the natural and territorial complexes of the Bashkir Trans-Urals by bioindication methods: specialty 25.00.36 "Geoecology": abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Geographical Sciences]. Sankt-Peterburg. 2016, 22 p. (In Russ.).
18. Khabletdinova A. Kh., Buskunova G. G. Otsenka biogeokhimicheskogo sostoyaniya Origanum vulgare L. V okrestnostyakh Tukanskogo kar'era Beloretskogo raiona Respubliki Bashkortosta [Assessment of the biogeochemical state of Origanum vulgare L. In the vicinity of the Tucansky quarry of the Beloretsky district of the Republic of Bashkortostan]. *Nedelya nauki – 2024:*

Materialy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskoi konferentsii, Sibai, 24–25 aprelya 2024 goda. Sibai [Science Week 2024: Proceedings of the All-Russian (with international participation) Scientific and Practical Conference, Sibai, April 24-25, 2024]. Sibai: Ufimskii universitet nauki i tekhnologii. 2024, pp. 257 – 259. (In Russ.).

19. Vremennyi maksimal'nyi dopustimyi uroven' (MDU) soderzhaniya nekotorykh khimicheskikh ehlementov i gossipola v kormakh dlya sel'skokhozyaistvennykh zhivotnykh i kormovykh dobavkakh [The temporary maximum permissible level (MPL) of the content of certain chemical elements and gossypol in feed for farm animals and feed additives]. *Rossel'khoznadzor*. Available at: https://fsvps.gov.ru. (Accessed: 18.02.2026). (In Russ.).

Received: 27.11.25

About the Authors

Alfiya Khabletdinova
Master's student, Ufa University of Science and Technology, Ufa. Russia.
E-mail: albuseques@yandex.ru

Nafikova Elvira Valerikovna
Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa. Russia.
E-mail: nafikovaev@uust.ru

Buskunova Gulsina Gilmanovna
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Sibai Institute (branch) of Ufa University of Science and Technology, Sibai, Russia.
E-mail: gulsina_busk@mail.ru