

УДК 631.41:631.2:631.82:550.42(571.54)

БИОПРОДУКТИВНОСТЬ И МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЗЛАКОВО-БОБОВЫХ ТРАВΟΣМЕСЕЙ НА ТЕХНОЗЕМЕ ПРИ ВНЕСЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. Л. Н. Болонева^а, *, И. Н. Лаврентьева^а, М. Г. Меркушева^а,

Л. Л. Убугунов^а, В. Л. Убугунов^а, С. Б. Сосорова^а

^аИнститут общей и экспериментальной биологии СО РАН, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: ldm-boloneva@mail.ru

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.

После доработки 04.08.2023 г.

Принята к публикации 20.09.2023 г.

Оценено влияние посевов злаково-бобовых травосмесей и применения минеральных удобрений на техноземе, созданном после ликвидации хвостохранилища Джидинского вольфрамо-молибденового комбината (Республика Бурятия), на изменение концентраций микроэлементов в растениях и образование дернины. Содержание валовых и подвижных форм ряда микроэлементов в верхнем супесчаном слое технозема было выше, чем в фоновой почве, превосходило медианный фон для почв Забайкалья. По коэффициенту суммарного загрязнения ($Z_c = 18.8$) верхний слой характеризовался как умеренно-опасный, нижний суглинистый – неопасный ($Z_c = 4$). Выявлено, что применение удобрений снижало концентрацию микроэлементов и коэффициенты их накопления в растениях. По интенсивности биологического поглощения большая часть элементов в надземной фитомассе отнесена к группе среднего захвата, в подземной – среднего и интенсивного поглощения, что свидетельствует о ее фитостабилизационной роли. Установлено, что биопродуктивность травосмесей в контроле была низкой. Внесение удобрений увеличивало этот показатель на второй год жизни трав до среднего уровня, на третий – до высокого, а на четвертый год сформировалась дернина, закрепляющая поверхностные слои и способствующая увеличению содержания органического вещества. Результаты исследований могут быть использованы на техноземах, созданных из вскрышных отвалов, для фитостабилизации и инициации накопления органического вещества в них за счет посевов высокопродуктивных многолетних трав и применения минеральных удобрений.

Ключевые слова: микроэлементы, суммарное загрязнение, биологическая рекультивация, продуктивность, коэффициенты биологического поглощения, органическое вещество, фитостабилизация, Западное Забайкалье

DOI: 10.31857/S0032180X24020101, EDN: XYAYOA

ВВЕДЕНИЕ

Отличительной геохимической чертой горно-промышленных ландшафтов является трудноконтролируемое рассеяние больших масс веществ с аномально высоким содержанием элементов [27]. По данным [20], техногенные потоки вещества часто на порядок превышают их естественные уровни в экосистемах вблизи рудных месторождений. Насыпные и намывные хвостохранилища отходов переработки руд вольфрамо-молибденовых месторождений, склады аварийных сбросов являются источниками загрязнения подземных и надземных вод, почвенно-растительного покрова

элементами-металлами и другими канцерогенами в концентрациях, угрожающих здоровью населения прилегающих территорий. Такая кризисная экологическая обстановка характерна для природных и агроландшафтов в зоне влияния Джидинского вольфрамо-молибденового комбината в Западном Забайкалье [12, 13, 28, 33, 34, 35] и бывшего Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината в Приэльбрусье [2, 3, 10].

Многолетнее нахождение значительных объемов техногенных песков в горной местности без проведения рекультивационных мероприятий приводит к их развеванию и переносу. Происходит качественное преобразование отходов под воздействием

различных факторов, усиливающих растворимость и миграцию элементов-металлов за пределы зон хранения, увеличивая интенсивность загрязнения окружающей среды. Например, техногенные пески Джидинского вольфрамо-молибденового комбината имеют максимальный показатель суммарного загрязнения (330) с ассоциацией химических элементов $W_{151}Cd_{81}Pb_{43}Mo_{18}Zn_{14}As_{11}Cu_9Sb_9Ni_2$ (нижний индекс – коэффициент концентрации элемента), а загрязненные ими почвы из-за угнетения биологической активности характеризуются низкой способностью к самоочищению [13].

При ликвидации хвостохранилищ определенное количество отходов остается на поверхности почв, поэтому проводится техническая рекультивация нанесением слоев грунта. В горной местности для этих целей используются вскрышные отвалы месторождений, как правило, находящихся вблизи производства [1, 21]. Такие грунты часто имеют не совсем пригодный для растений состав по содержанию макро- и микроэлементов, а также отличаются по форме нахождения элементов-металлов по сравнению с загрязненными ими почвами [16, 39]. Продукция выращиваемых на них растений лимитируется низкой доступностью основных питательных веществ и (или) наличием чрезмерных концентраций потенциально токсичных элементов, которые конкурируют за одни и те же переносчики [47, 52]. Подвижность и фитодоступность микроэлементов контролируется в основном такими химическими процессами, как осаждение–растворение, адсорбция–десорбция и комплексообразование [26, 44, 45, 46]. Использование удобрений может снизить токсичность микроэлементов за счет большей доступности в местах транспорта, усиления биохимических реакций и физиологических процессов в растениях, в том числе водоудерживающей способности тканей растений. Следовательно, поддержка защитных возможностей растений оптимизацией минерального питания является необходимым условием эффективной ремедиации техногенных почв [23, 27].

Биологическая рекультивация грунтов направлена на нормализацию экологических условий окружающих ландшафтов, а также на инициацию почвообразовательного процесса, прежде всего, на накопление органического вещества за счет создания дернового горизонта. Для этого применяют технологии фитостабилизации с посевом высокопродуктивных многолетних трав (злаки и бобовые), которые не являются аккумуляторами элементов-металлов, однако обладают различными механизмами устойчивости для уменьшения подвижности ионов и укрепления субстрата [40, 42, 51]. Это происходит преимущественно за счет абсорбции и аккумуляции металлов корневой системой трав, их адсорбции на поверхности корней, осаждения и связывания органическими

соединениями в ризосфере [22, 41, 48, 49, 50]. Особенности транспорта и распределения металлов в корнях растений определяют их способность накапливать элементы в подземных или надземных органах, обуславливая принадлежность вида к группе исключателей или аккумуляторов соответственно [33].

Биопродуктивность фитоценозов – наиболее подвижный и обобщающий показатель жизнеспособности слагающих травостой видов. Специфический характер реакции растений на условия обитания, от которых зависит формирование биомассы, во многом определяется особенностями строения, развития и распределения их корневой системы. Эти факторы влияют на интенсивность поглощения и накопления макро- и микроэлементов фитомассой травостоев, на обогащение или обеднение почв, на которых они произрастают.

Несмотря на наличие большого числа публикаций по рекультивации нарушенных земель, процессы формирования почвенно-растительного покрова остаются малоизученными, так как имеют четко выраженную региональную и индивидуальную специфику.

Цель исследования – оценка влияния посевов злаково-бобовых травосмесей и минеральных удобрений на биопродуктивность трав, изменение в них концентраций микроэлементов и активизацию формирования дернины в техноземе.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2016–2019 гг. на четвертом рекультивированном участке (рис. 1) территории Джидинского вольфрамо-молибденового комбината ($50^{\circ}25'27''$ N; $103^{\circ}18'23''$ E, высота над уровнем моря – 1034 м). Район относится к горной лесостепи. Климат резко континентальный с продолжительной морозной зимой и коротким жарким летом. Средняя годовая температура составляет $-2.3^{\circ}C$, сумма активных температур – $1300^{\circ}C$, продолжительность безморозного периода – 79 дней. Осадков в районе выпадает в среднем 373 мм в год, более 93% которых приходится на май–сентябрь. Метеорологические условия в годы проведения агрохимических опытов несколько различались по температурному режиму и по количеству осадков, которые превышали среднемесячные показатели (табл. 1).

Опытный участок характеризовался выдержанными параметрами технической рекультивации: наличие верхнего 15 см супесчаного слоя и 22–25 см подстилающего легкосуглинистого крупнопылеватого горизонта. Для технической рекультивации использовали вскрышные грунты Инкурского месторождения. На глубине 37(40)–58 см отмечался слой техногенного песка. Такие образования

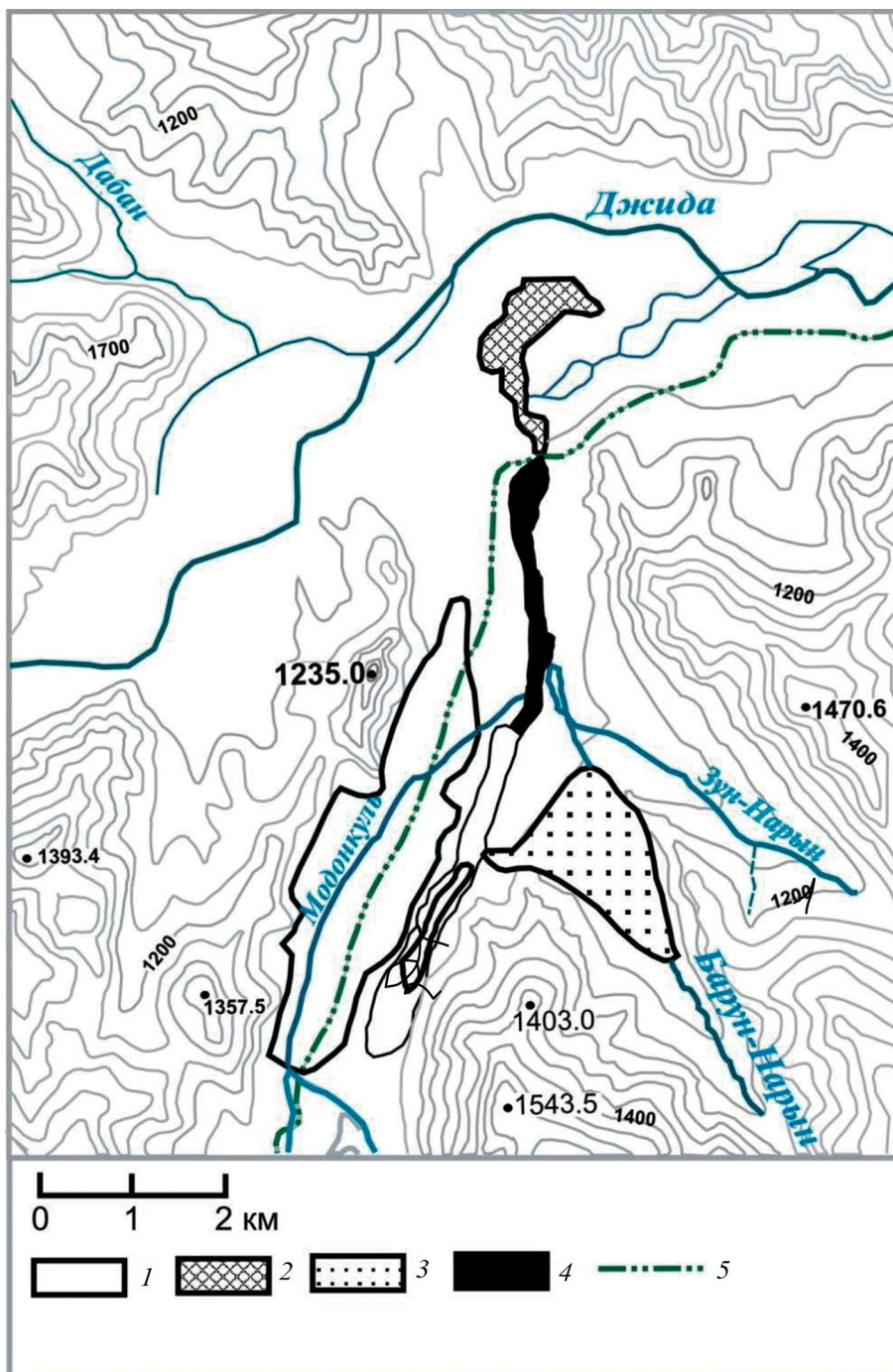


Рис. 1. Расположение хвостохранилищ отходов и рекультивированного участка [13, с дополнениями]: 1 – территория г. Закаменск, 2 – рекультивированный участок, 3 – хвостохранилище отходов, 4 – намытое хвостохранилище, 5 – автодорога.

относятся к техногенным или антропогенным почвам, созданным в ходе рекультивации земель, нарушенных добычей полезных ископаемых [6].

Рекультивационные слои имели близкую к нейтральной реакцию среды, высокие показатели плотности твердой фазы 2.60–2.65 г/см³,

и сложения (1.48–1.51 г/см³), низкую пористость (43%), сильную каменность (35%). В составе обменных катионов преобладал Са. Установлено, что слои техногенных почв содержали очень низкое количество $C_{орг}$, $N-NO_3$. Обеспеченность подвижным Р супесчаного слоя очень высокая,

Таблица 1. Метеоусловия в период проведения опытов (по данным метеостанции Цакир)

Год	Месяц												Средне- годовая
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Среднемесячная температура, °С													
2016	-25.9	-16.9	-6.1	2.1	7.7	14.1	18.2	14.4	8.9	-6.2	-18.3	-22.4	-2.5
2017	-25.5	-18.6	-5.9	3.7	10.3	16.0	17.1	14.1	7.3	-2.0	-13.9	-21.5	-1.6
2018	-25.0	-19.1	-6.6	3.1	9.7	15.7	15.9	15.4	6.8	0.1	-16.4	-22.1	-1.9
2019	-25.1	-22.4	-4.9	3.1	7.4	14.8	17.1	14.7	9.7	-1.2	-14.2	-23.3	-2.0
Среднее многолетнее*	-25.4	-18.3	-7.9	1.4	9.0	13.4	15.8	14.4	6.6	-0.9	-14.0	-22.1	-2.3
Осадки, мм													
2016	0.0	4.6	11.4	33.1	52.3	112.6	50.3	148.8	34.9	15.4	10.4	3.4	477
2017	2.5	1.1	2.8	14.5	15.1	68.7	221.4	99.3	27.6	8.7	11.9	1.4	475
2018	1.1	4.8	8.2	28.0	22.9	65.4	106.3	126.2	42.1	13.8	7.5	2	428
2019	0.6	0.3	2.0	8.0	17.0	124	236	122	49.0	10.0	6.0	0.8	576
Среднее многолетнее*	1	1	1	11	49	57	81	110	49	5	4	4	373

Таблица 2. Агрохимическая характеристика техногенной почвы опытного участка

Слой, см		Содержание частиц <0.01 мм, %	рН _{Н₂О}	С _{орг} , %	Подвижные формы, мг/кг		
					N-NO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O
Супесь	0–15	12 ± 0.66	6.7 ± 0.20	0.17 ± 0.04	3.50 ± 0.26	300.0 ± 17.78	75.3 ± 11.14
Суглинок	15–37(40)	29 ± 0.72	6.9 ± 0.10	0.55 ± 0.06	5.60 ± 0.30	154.0 ± 5.00	120.5 ± 10.00
Техноген- ный песок	37(40)–58	4 ± 0.10	5.5 ± 0.09	0.15 ± .01	–	–	–

Примечание. ТП – техногенный песок; прочерк – не определяли.

суглинистого – средняя, обменным К – очень низкая и средняя, соответственно (табл. 2). Техногенная почва соответствовала потенциально плодородному слою, согласно ГОСТ 17.5.1.03–86 [10].

Оценку степени геохимического состояния рекультивационных слоев и фоновой почвы проводили методом сравнения с ПДК(ОДК) [32], медианным содержанием элементов в аллювиальных почвах Западного Забайкалья и средним содержанием элементов в земной коре Забайкалья [15]. Фоновая почва прилегает к зоне месторождения и обогащена элементами, она не может использоваться как эталон [37]. Поэтому были рассчитаны коэффициенты концентрации, показывающие

изменение среднего содержания элемента в технозем по сравнению не только с фоном, но и с его количеством в земной коре Забайкалья, а также коэффициенты опасности (K_o), характеризующие превышение ПДК (ОДК) [7].

Концентрации всех рассмотренных элементов в фоновой почве превосходили их содержание в земной коре Забайкалья, по ряду элементов (Cd, Co, Ni, Cr, Mn) – медианный фон аллювиальных почв и в 1.4–1.5 раз превышали ПДК (ОДК) по Cr и Ni (табл. 3).

Валовое содержание микроэлементов в техногенной почве было выше медианного фона для почв Забайкалья и в ряде случаев ПДК. Возможно,

Таблица 3. Содержание микроэлементов и железа, коэффициенты концентрации микроэлементов в техногенной почве опытного участка

Грунт	Слой, см	Cd	Pb	Zn	Co	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn	Fe
Валовое содержание, мг/кг											
Супесь (эфель)	0–15	3.5	58.8	585.4	22.1	37.7	9.7	98.4	64.8	1600	54100
Суглинок	15–37(40)	0.9	25.0	97.5	20.5	62.2	3.5	50.2	109.0	2200	44400
Техногенный песок	37(40)–58	1.5	199.3	89.2	1.7	15.4	153.5	49.0	44.3	520	16800
Фон – аллювиальная луговая почва	0–21/24	0.8	18.3	79.3	16.3	122.5	2.9	30.8	138.1	1000	43190
Земная кора Забайкалья [18]		0.16	11	35	8	36	1.4	24	65	715	
Медиана почв Забайкалья [14]		0.03	30	74	9.9	26	3.0	23	60	560	
ПДК [44]		3	100	300	50	50	5	100	100	1500**	
Коэффициенты концентрации (относительно фона)											
Супесь (эфель)	0–15	4.4	3.2	7.4	1.4	0,3	3.3	3.2	0,5	1.6	1.3
Суглинок	15–37(40)	1.1	1.4	1.2	1.3	0.5	1.2	1.6	0.8	2.2	1.0
Техногенный песок	37(40)–58	1.9	10.9	1.1	0.1	0.1	52.9	1.6	0.3	0.5	0.4
Коэффициенты концентрации (относительно земной коры Забайкалья)											
Супесь (эфель)	0–15	21.9	5.3	16.7	2.8	1.05	6.9	4.1	1.0	2.2	
Суглинок	15–37(40)	5.6	2.3	2.8	2.6	1.7	2.5	2.1	1.7	3.1	
Техногенный песок	37(40)–58	9.4	18.1	2.5	0.2	0.4	110	2.0	0.7	0.7	
Фон – аллювиальная луговая почва	0–21/24	5.0	1.7	2.3	2.0	3.4	2.1	1.3	2.1	1.4	
Коэффициент опасности (относительно ПДК/ОДК)											
Супесь (эфель)	0–15	7.0	1.8	10.6	0.4	1.9	1.9	3.0	0.6	1.1	
Суглинок	15–37(40)	0.4	0.2	0.4	0.4	0.8	0.7	0.4	1.1	1.5	
Техногенный песок	37(40)–58	3.0	6.2	1.6	0.03	0.8	30.7	1.5	0.4	0.3	
Фон – аллювиальная луговая почва	0–21/24	0.4	0.1	0.4	0.3	1.5	0.6	0.2	1.4	0.7	
Обменные формы, мг/кг											
Супесь (эфель)	0–15	0.9	1.7	41.6	2.4	1.1	<0.2*	7.2	1.0	111.8	Не опр.
Суглинок	15–37(40)	<0.05*	1.2	4.6	3.0	3.5	<0.2*	1.5	4.5	209.5	»
Техногенный песок	37(40)–58	<0.05*	14.9	11.9	0.6	5.0	3.2	0.4	20.7	32.0	»
Фон – аллювиальная луговая почва	0–21/24	<0.05*	0.6	2.7	2.9	7.1	<0.2*	0.5	3.5	316.8	»
ПДК [31]		0.2	6	23	5	4	–	3	6	700	

* Содержание ниже предела обнаружения. ** ПДК [31].

это объясняется привнесением веществ из близлежащих участков техногенного песка, не затронутых процессом рекультивации. Наибольшие коэффициенты концентрации и коэффициенты опасности элементов характерны для супесчаного слоя, особенно для Zn и Cd, а концентрации Pb, Ni, Mo, Cu в 3 раза превышали фоновые почвы.

Для оценки степени суммарного загрязнения рекультивационных слоев использован показатель Саета [5]:

$$Z_c = \sum(C_{\text{почва}} : C_{\text{фон}}) - (n - 1),$$

где C – содержание элемента, n – число элементов.

При расчетах учитывали коэффициенты концентраций элементов > 1 , рассчитанных относительно фона. Согласно полученным данным, супесчаный слой характеризовался как умеренно опасный ($Z_c = 18.8$), суглинистый – не опасный ($Z_c = 4.0$) и техногенный песок – опасный ($Z_c = 64.4$). При расчетах Z_c с учетом коэффициентов концентрации элементов > 2 и K_o , категория суммарного загрязнения не изменялась.

По концентрации обменных форм элементов в верхнем 0–15 см слое выявлено превышение ПДК по Cd, Zn, Cu. В суглинистом слое количество элементов соответствовало нормативным показателям. Следует отметить, что подвижность микроэлементов для слоев техногенной и фоновой почвы значительно различалась:

Супесь – Cd(25.7) $>$ Co(10.9) $>$ Cu(7.3) $>$ Zn(7.1) $>$ Mn(7.0) $>$ Pb(2.9) = Ni(2.9) $>$ Cr(1.5) $>$ Mo(1).

Суглинок – Co(14.6) $>$ Mn(9.5) $>$ Ni(5.6) $>$ Pb(4.8) $>$ Zn(4.7) $>$ Cr(4.1) $>$ Cu(3.0) $>$ Mo(2.9) $>$ Cd(2.8).

Фон – Mn(31.7) $>$ Co(17.8) $>$ Ni(4.1) $>$ Zn(3.4) = Mo(3.4) $>$ Pb(3.3) $>$ Cd(3.1) $>$ Cr(2.5) $>$ Cu(1.6).

Для биологической рекультивации использовали сеяные травосмеси с применением минеральных удобрений. Состав первой травосмеси – коострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leysser.) Holub) сорта СибНИИСХоз-189 + люцерна изменчивая (*Medicago × varia Martyn*) сорта Флора 5 в соотношении 2 : 1; второй – коострец безостый + овсяница луговая (*Festuca pratensis* Hudson s. str.) сорта Дединовская 8 + люцерна изменчивая в соотношении 1 : 1 : 1. Норма высева семян – 60 кг/га. Посев осуществляли рядковым способом в первой декаде июля.

Схема опытов была единой и состояла из трех вариантов: 1) контроль (без применения удобрений); 2) N30P15K30; 3) N60P30K60. Площадь делянки – 10 м², повторность – четырехкратная.

При закладке опытов минеральные удобрения (аммиачная селитра, двойной суперфосфат, сернокислый калий) вносили во время посева,

в последующие годы – в первой декаде июня, в начале отрастания трав.

Определение основных физических и агрохимических свойств каждого слоя почвогрунта опытного участка выполнялось общепринятыми методами [30]: гранулометрический состав – пипеточным, плотность твердой фазы – пикнометрическим, порозность – расчетным, каменность – ситовым методом, плотность сложения – методом режущего кольца. Содержание Сорг в почве оценивалось по методу Тюрина в модификации Никитина, определяли подвижные формы основных элементов минерального питания: N–NO₃ – фотоколориметрическим методом с дисульфифеноловой кислотой, N–NH₄ с реактивом Несслера, P₂O₅ и K₂O – из одной вытяжки по методу Чирикова; pH водной вытяжки – потенциометрическим методом. Накопление $C_{\text{орг}}$ и обеспеченность подвижными питательными элементами техногенной почвы после четырех лет выращивания многолетних трав с применением удобрений изучалось в 0–20 см слое.

Содержание микроэлементов в грунтах определяли атомно-эмиссионным методом с ионизацией в индуктивно связанной аргонной плазме (ICP-анализ по методике ПНД Ф.16.1:2.3:3.11-98) на приборе Spectro Arcos (Германия), обменных форм – по методу Крупского–Александровой в модификации ЦИНАО (ацетатно-аммонийная вытяжка pH 4.8). При концентрации элементов меньше предела обнаружения при расчете использовали значения, равные его половине [8].

Изучение биологической продуктивности сеяных трав 2–4 года жизни проводили в последнюю декаду июля в фазу цветения люцерны и – созревания злаковых: надземную фитомассу – укосным методом в 5-кратной повторности с площадок 1 × 1 м, подземную – методом монолитов в слое 0–20 см в 3-кратной повторности. Биопродуктивность травосмесей оценивали по градации Уиттекера [36].

Коэффициенты накопления рассчитывали как отношение содержания элемента в сухой массе растений к количеству его подвижной формы в почве [4], коэффициенты биологического поглощения – как отношение концентрации элемента в золе к его валовому количеству в почве [27]. Содержание микроэлементов в надземной и подземной фитомассах определяли после сухого озоления [29] на спектрометре ICPE-9000 (Япония).

Результаты исследований статистически обработаны с использованием программы Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Важная роль в адаптации растений к высоким концентрациям тяжелых металлов в окружающей среде принадлежит физиолого-биохимическим

Таблица 4. Содержание микроэлементов в сухом веществе сеяных травостоев на техногенной почве при применении минеральных удобрений, мг/кг (среднее за 3 года)

Вариант	Зола, %	Cd	Pb	Zn	Co	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn	Fe
Кострец безостый + люцерна изменчивая											
Контроль	<u>7.95</u>	<u>0.7</u>	<u>1.5</u>	<u>22.1</u>	<u>1.1</u>	<u>1.8</u>	<u>8.0</u>	<u>1.9</u>	<u>3.3</u>	<u>247</u>	<u>995</u>
	12.9	2.1	3.0	86	2.8	7.4	1.6	10.7	25.1	1829	4272
N30P15K30	<u>7.3</u>	<u>0.6</u>	<u>0.2</u>	<u>10.9</u>	<u>0.9</u>	<u>1.9</u>	<u>3.0</u>	<u>1.1</u>	<u>2.4</u>	<u>189</u>	<u>967</u>
	11.0	1.9	2.5	44	2.3	5.4	1.1	7.0	16.2	1703	4351
N60P30K60	<u>6.1</u>	<u>0.5</u>	<u>0.4</u>	<u>18.9</u>	<u>0.6</u>	<u>1.1</u>	<u>1.8</u>	<u>1.7</u>	<u>1.5</u>	<u>127</u>	<u>627</u>
	11.8	2.4	4.4	78	2.7	3.6	1.6	11.5	16.4	1701	5470
НСР	<u>0.34</u>	<u>0.03</u>	<u>0.25</u>	<u>1.7</u>	<u>0.14</u>	<u>0.15</u>	<u>0.12</u>	<u>0.11</u>	<u>0.24</u>	<u>11.89</u>	<u>9.38</u>
	0.26	0.20	0.20	1.39	0.23	0.37	0.28	0.12	0.45	10.36	68.83
Кострец безостый + овсяница луговая + люцерна изменчивая											
Контроль	<u>7.4</u>	<u>0.7</u>	<u>0.3</u>	<u>22.5</u>	<u>0.9</u>	<u>2.1</u>	<u>5.3</u>	<u>0.7</u>	<u>2.8</u>	<u>357</u>	<u>432</u>
	10.0	1.6	1.8	72.4	2.2	5.2	1.4	8.6	11.0	1590	3758
N30P15K30	<u>6.3</u>	<u>0.7</u>	<u>0.2</u>	<u>12.5</u>	<u>1.0</u>	<u>1.4</u>	<u>1.9</u>	<u>1.4</u>	<u>2.2</u>	<u>344</u>	<u>352</u>
	8.5	1.2	1.7	58.7	1.8	4.9	1.2	4.4	17.0	1407	2915
N60P30K60	<u>6.8</u>	<u>0.6</u>	<u>0.2</u>	<u>16.7</u>	<u>0.9</u>	<u>1.4</u>	<u>2.6</u>	<u>1.3</u>	<u>2.1</u>	<u>343</u>	<u>198</u>
	8.7	2.0	1.6	67.9	2.1	4.7	1.5	8.1	15.1	1514	3202
НСР	<u>0.78</u>	<u>0.03</u>	<u>0.03</u>	<u>0.31</u>	<u>0.26</u>	<u>0.15</u>	<u>0.31</u>	<u>0.22</u>	<u>0.37</u>	<u>4.0</u>	<u>14.81</u>
	0.10	0.20	0.03	1.75	0.14	0.12	0.08	0.31	0.73	20.03	124.20
Разнотравно-злаковый луг											
Фон	<u>7.3</u>	<u>0.3</u>	<u>4.9</u>	<u>13.9</u>	<u>0.7</u>	<u>1.9</u>	<u>2.2</u>	<u>4.9</u>	<u>1.5</u>	<u>49.0</u>	<u>60.0</u>
	13.2	1.2	19.7	43.5	7.4	23.4	4.9	18.5	15.9	644	6238
Растительность суши [11]		0.035	1.25	30	0.5	2.0	0.5	8.0	1.8	205	
ПДК, МДУ (РФ) [31]		0.3	5	50	1	3	2	30	0.5	300	100

Примечание. Над чертой – содержание элемента в надземной массе; под чертой – в подземной массе.

механизмам. Способность растений поддерживать интенсивность фотосинтеза и дыхания на необходимом уровне, а также сохранение оптимального водного режима и минерального питания обеспечивает их рост и развитие даже в неблагоприятных внешних условиях [18].

Разнотравно-злаковый луг фонового участка расположен на геохимически аномальной почве, и микроэлементный состав растений по сравнению с растениями суши, характеризуется повышенными концентрациями Cd, Pb, Co, Mo и трехкратным превышением ПДК по Cr (табл. 4).

При анализе данных микроэлементного состава сеяных трав обоих опытов по сравнению с растениями фонового участка, выявлены превышения содержания по Cd, Zn, Co, Mo, Cr, Mn, Fe; по

сравнению с растительностью суши – по Cd, Co, Mo, Cr, Mn. В сухом веществе растений в контроле установлено, что концентрации ряда элементов были выше ПДК: Cd – в 2.3 раза, Cr – в 5.6–6.6; Mo – в 2.6–4.0. Влияние минеральных удобрений выразилось в снижении этих показателей.

Количество Mn в зеленой массе растений в первом опыте было в пределах нормы, во втором – несколько повышенное. Особенностью макроэлементного состава первой травосмеси являлось высокое содержание Fe, превосходящее критический уровень (750 мг/кг) в 1.3 раза [17]. Способность растений к поглощению этого элемента различна и, помимо почвенно-климатических условий, также зависит от фазы роста и развития растений. Природное содержание Fe в кормовых травах

изменяется от 18 до 1000 мг/кг сухой массы. Бобовые травы способны накапливать больше Fe, чем злаковые [45]. Разница в концентрациях данного элемента в первой и второй травосмесях обусловлена соотношением слагающих их видов. Однако высокие концентрации Fe не вызывали угнетения развития растений.

Удобрения, как правило, снижали содержание элементов в растениях. Следует отметить барьерную биогеохимическую функцию корневой системы трав, накапливающей значительное количество микроэлементов (кроме Mo), которая в большей степени проявлялась в удобренных вариантах.

Коэффициенты накопления микроэлементов в сухом веществе надземной массы сеяных трав (табл. 5) свидетельствуют о значительном концентрировании Mo. Этот элемент характеризуется безбарьерным типом поглощения, что вызвано его аниогенными свойствами, обуславливающими более высокую подвижность в нейтральной и слабощелочной среде, тогда как большинство других элементов в этих условиях малоподвижны [19]. Следует отметить, что в удобренных вариантах, в связи с большим продуцированием растениями биомассы, коэффициенты накопления Mo в сухом веществе трав обеих травосмесей значительно снижались, приближаясь к уровню фонового участка.

По данным табл. 6, 7 интенсивность биологического поглощения элементов фитомассой сеяных трав практически не различалась по вариантам обоих опытов. Надземная масса растений характеризовалась однотипным набором элементов групп очень интенсивного, среднего и интенсивного накопления, представленных Mo, Mn, и Cd, и более широким спектром элементов группы среднего

захвата. В подземной массе большая часть элементов отнесена к группе среднего и интенсивного накопления, что свидетельствует о ее фитостабилизационной роли.

Общеизвестно, что уровень общих запасов фитомассы растительных сообществ определяется биологическими особенностями возделываемых культур и зависит от свойств почв. Травосмеси с участием бобовых и злаковых трав имеют преимущество перед монокультурами. Они представляют собой надежную оптико-биологическую систему, обеспечивающую рациональное соотношение величин высоты и облиственности растений и конечной их продуктивности [24].

На второй год жизни фитоценозы не различались по запасам общей фитомассы в контроле, их продуктивность оценивалась как низкая (табл. 8). Использование минеральных удобрений в дозе N30P15K30 достоверно увеличивало данный показатель в 2.2–2.7 раза, в дозе N60P30K60 – в 4.3–4.5 раза в первой и во второй травосмеси соответственно.

На третий год жизни сеяных трав отмечено закономерное возрастание их общей фитомассы во всех вариантах. Ее количество в контроле увеличилось в 2.9–3.4 раза, в варианте N30P15K30 – в 3.0–4.0, а при повышенной дозе удобрений – в 1.3 раза в первом и втором опытах соответственно. Продуктивность травосмесей оценивалась как средняя в контроле и высокая в удобренных вариантах. Очевидно, что максимальные запасы общей фитомассы обусловлены лучшим развитием растений люцерны за счет увеличения кустистости в вариантах с пониженной дозой азота.

Таблица 5. Коэффициенты накопления микроэлементов в сухом веществе сеяных травостоев

Вариант	Cd	Pb	Zn	Co	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn
Кострец безостый + люцерна изменчивая									
Контроль	0.8	0.9	0.5	0.5	1.6	80.0	0.3	3.3	2.1
N30P15K30	0.7	0.1	0.3	0.4	1.7	30.0	0.2	2.4	1.6
N60P30K60	0.6	0.2	0.4	0.2	1.0	18.0	0.2	1.5	1.1
Кострец безостый + овсяница луговая + люцерна изменчивая									
Контроль	0.8	0.2	0.5	0.4	1.9	53.0	0.1	2.8	3.0
N30P15K30	0.8	0.1	0.3	0.4	1.3	19.0	0.2	2.2	2.9
N60P30K60	0.7	0.1	0.4	0.4	1.3	26.0	0.2	2.1	2.9
Разнотравно-злаковый луг									
Фон	1.2	16.3	5.1	0.2	0.3	22.0	9.8	0.4	0.15

Таблица 6. Коэффициенты биологического поглощения зольных элементов фитомассой сеяных травостоев в зависимости от минеральных удобрений

Фитомасса	Cd	Pb	Zn	Co	Ni	Mo	Cu	Cr	Mn	Fe
Кострец безостый + люцерна изменчивая, контроль										
Надземная	2.6	0.3	0.5	0.6	0.6	10.3	0.2	0.6	1.9	0.2
Подземная	4.7	0.4	1.1	1.0	1.5	1.3	0.8	3.0	8.8	0.6
N30P15K30										
Надземная	2.4	0.04	0.25	0.6	0.7	4.2	0.15	0.5	1.6	0.25
Подземная	4.8	0.4	0.7	0.9	1.3	1.1	0.7	2.3	9.6	0.7
N60P30K60										
Надземная	2.1	0.1	0.5	0.4	0.5	3.0	0.3	0.4	1.3	0.2
Подземная	5.9	0.6	1.1	1.1	0.8	1.4	1.0	2.1	9.0	0.9
Кострец безостый + овсяница луговая + люцерна изменчивая, контроль										
Надземная	2.5	0.07	0.5	0.6	0.7	7.4	0.1	0.6	3.0	0.1
Подземная	4.7	0.3	1.2	1.0	1.4	1.4	0.9	1.9	9.9	0.7
N30P15K30										
Надземная	2.9	0.06	0.3	0.7	0.6	3.0	0.2	0.5	3.4	0.1
Подземная	3.9	0.3	1.2	1.0	1.5	1.5	0.5	3.1	10.3	0.6
N60P30K60										
Надземная	2.7	0.04	0.4	0.6	0.5	4.0	0.2	0.5	3.1	0.05
Подземная	6.5	0.3	1.3	1.1	1.4	1.8	0.9	2.7	9.5	0.7
Фон – разнотравно-монгольскополевицевый луг										
Надземная	5.1	3.7	2.4	0.6	0.2	10.4	2.2	0.14	0.7	0.01
Подземная	11.4	8.2	4.1	3.4	1.4	12.8	4.6	0.9	4.9	1.1
Надземная растительность суши [11]	0.44	1.5	11.76	1.37	1.59	9.69	2.27	1.03	6.86	

Травы обоих опытов, достигнув своего максимального развития, на четвертый год жизни сформировали относительно высокие запасы общей биомассы. При этом не было выявлено достоверных различий в удобренных вариантах первого опыта, а во втором – эффективным оказалось внесение пониженных доз удобрений.

При биологической рекультивации техногенных ландшафтов большое значение имеют размеры формирования дернины под многолетними сеянцами травами, инициирующей образование органического вещества в почве. Травосмеси накапливали подземную массу преимущественно в верхнем

0–20 см слое. Это свидетельствует о своеобразном приспособлении растений к специфическим условиям среды обитания и обуславливает эрозионную устойчивость техногенных почв. Ее количество определялось разным соотношением видов в составе травостоя и особенностями строения их корневой системы.

Внесение удобрений увеличивало накопление растениями подземной массы в обеих травосмесях в течение всех лет наблюдения, достигая максимума к четвертому году жизни трав. Ее долевое участие в общих запасах было различным. На второй год жизни трав в первом опыте оно снижалось

Таблица 7. Интенсивность биологического поглощения (A_x) элементов фитомассой сеяных трав при внесении минеральных удобрений

Фитомасса	Группы элементов биологического поглощения			
	очень интенсивного накопления, $A \times 10-100$	среднего и интенсивного накопления, $A \times 1-10$	среднего захвата, $A \times 0.1-1$	слабого захвата, $A \times < 0.1$
Кострец безостый + люцерна изменчивая				
Контроль				
Надземная	Mo	Cd > Mn	Co = Ni = Cr > Zn > Pb > Cu = Fe	
Подземная		Mn > Cd > Cr > Ni > Mo > Zn > Co	Cu > Fe > Pb	
N30P15K30				
Надземная		Mo > Cd > Mn	Ni > Co > Cr > Zn = Fe > Cu	Pb
Подземная		Mn > Cd > Cr > Ni > Mo	Co > Zn = Cu = Fe > Pb	
N60P30K60				
Надземная		Mo > Cd > Mn	Zn = Ni > Co = Cr > Cu > Fe > Pb	
Подземная		Mn > Cd > Cr > Mo > Zn = Co > Cu	Fe > Ni > Pb	
Кострец безостый + овсяница луговая + люцерна изменчивая				
Контроль				
Надземная		Mo > Mn > Cd	Ni > Co = Cr > Zn > Fe = Cu	Pb
Подземная	Mn	Cd > Cr > Ni = Mo > Zn > Co	Cu > Fe > Pb	
N30P15K30				
Надземная		Mn > Mo > Cd	Co > Ni > Cr > Zn > Cu > Fe	Pb
Подземная	Mn	Cd > Cr > Ni = Mo > Zn > Co	Fe > Cu > Pb	
N60P30K60				
Надземная		Mo > Mn > Cd	Co > Ni = Cr > Zn > Cu	Fe > Pb
Подземная		Mn > Cd > Cr > Mo > Ni > Zn > Co	Cu > Fe > Pb	
Фон – разнотравно-монгольскополевицевый луг				
Надземная	Mo	Cd > Pb > Zn > Cu	Mn > Co > Ni > Cr	Fe
Подземная	Mo > Cd	Pb > Mn > Cu > Zn > Co > Ni > Fe	Cr	

с 70% в контроле до 41–33% в удобренных вариантах пропорционально внесенной дозе, а во втором оставалось на уровне 47–48% во всех вариантах. К концу периода наблюдений этот показатель увеличился до 65–67% в первом опыте и до 64% в варианте с пониженной дозой удобрений второго опыта. Биомасса растений трехкомпонентной травосмеси в контроле и в варианте с применением N60P30K60 характеризовалась равным долевым участием надземной и подземной массы,

не превышающим 50%. Таким образом, растения обеих травосмесей накапливали большее количество подземной массы на варианте с применением минеральных удобрений в дозе N30P15K30.

После четырех лет возделывания сеяных травостоев с применением минеральных удобрений содержание органического вещества в слое 0–10 см возросло по сравнению с его исходным количеством (табл. 9): под первой травосмесью с внесением N30P15K30 – в 1.6 раза, при дозе

Таблица 8. Биологическая продуктивность сеяных травосмесей в зависимости от года жизни трав и минеральных удобрений, г/(м² год)

Вариант	Год жизни трав											
	второй				третий				четвертый			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Кострец безостый + люцерна изменчивая (2 : 1)												
Контроль	299	91	208	2.3	864	272	592	2.2	1080	372	708	1.9
N30P15K30	658	386	272	0.7	1967	1167	800	0.7	1846	602	1244	2.1
N60P30K60	1281	865	416	0.5	1679	943	736	0.8	1925	661	1264	1.9
HCP _{0.5}	38	46	19		88	68	44		89	38	57	
Кострец безостый + овсяница луговая + люцерна изменчивая (1 : 1 : 1)												
Контроль	301	156	145	0.9	1016	648	368	0.6	899	456	443	1.0
N30P15K30	800	422	378	0.9	3182	2590	592	0.2	1826	656	1170	1.8
N60P30K60	1346	706	640	0.9	1798	898	900	1.0	1698	824	874	1.1
HCP _{0.5}	60	59	22		90	66	75		59	35	41	

Примечание. 1 – общая фитомасса; 2 – надземная; 3 – подземная; 4 – отношение подземной фитомассы к надземной.

Таблица 9. Накопление органического углерода и обеспеченность подвижными питательными элементами техногенной почвы после четырех лет выращивания многолетних трав с применением удобрений

Вариант	C _{орг} , %	рН	Подвижные формы, мг/кг		N–NO ₃	N–NH ₄
			P ₂ O ₅	K ₂ O		
Кострец безостый + люцерна изменчивая (2 : 1)						
Контроль	0.19	6.5	358	77	0.45	17.5
N30P15K30	0.27	6.6	400	122	2.30	30.0
N60P30K60	0.45	6.5	375	110	1.70	25.0
HCP _{0.5} от контроля	0.06					
HCP _{0.5} от исходного содержания	0.04					
Кострец безостый + овсяница луговая + люцерна изменчивая (1 : 1 : 1)						
Контроль	0.27	6.7	357	67	1.00	20.0
N30P15K30	0.33	6.4	487	115	4.30	35.0
N60P30K60	0.42	6.2	475	200	3.70	37.5
HCP _{0.5} от контроля	0.05					
HCP _{0.5} от исходного содержания	0.04					

N60P30K60 – в 2.6; под второй травосмесью – в 1.9 и 2.5 раза соответственно. Это связано со структурой корневых систем. Проведенное ранее изучение относительного содержания живых и мертвых корней по фракциям подземной фитомассы в сообществах остепненных пойменных лугов подтвердило закономерность, общую для травянистых биогеоценозов, о недолговечности и постоянном обновлении мелких корней, которые являются стабильным и существенным источником пополнения органического вещества почвы [25]. Фракция мелких корней на 92–98% гумифицирована. Степень развитости поглощающих корней в верхнем слое почвы определяет способность многолетних трав конкурировать за элементы питания, содержащиеся в удобрениях. Длиннокорневищные злаки благоприятнее реагируют (особенно при достаточном увлажнении) на внесение минеральных удобрений. Следует отметить, что вымершая на третий год жизни овсяница луговая образовала мощную мочковатую корневую систему, которая к концу четвертого года травостоя была почти гумифицирована, как и мелкие корни костреца безостого и люцерны посевной. Все это способствовало процессу образования органического вещества в техногенной почве, несмотря на временно небольшие концентрации $C_{\text{орг}}$, обусловленные недостаточной длительностью выращивания трав, что неоднократно отмечалось на загрязненных или техногенных почвах [27].

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что внесение удобрений способствовало увеличению биопродуктивности сеяных злаково-бобовых травосмесей с низкого уровня в контрольных вариантах до среднего на второй год жизни трав и до высокого – на третий. На четвертый год сформировалась дернина, закрепляющая поверхностные слои техногенной почвы. При этом в обоих опытах наиболее эффективной была доза N30P15K30.

2. Отличия сеяных злаково-бобовых травостоев по биопродуктивности и формированию дернины зависели от соотношения видов в составе смеси. На удобренных вариантах трехкомпонентная травосмесь превосходила двухкомпонентную по этим показателям на 2 и 3 годы жизни трав и практически не отличалась от нее на 4 год вегетации из-за разной интенсивности усвоения элементов минерального питания злаками и бобовыми.

3. Выявлено, что удобрения, оптимизируя обеспеченность НРК в техноземе, снижали концентрацию микроэлементов в растениях и коэффициенты их накопления. Интенсивность биологического поглощения элементов фитомассой сеяных трав практически не различалась по вариантам обоих опытов: большая часть элементов

в надземной фитомассе отнесена к группе среднего захвата, в подземной – среднего и интенсивного поглощения, что свидетельствует о ее фитостабилизационной роли.

4. После четырех лет возделывания сеяных травостоев с применением минеральных удобрений содержание $C_{\text{орг}}$ в слое 0–10 см возросло по сравнению с его исходным количеством: под первой травосмесью с внесением N30P15K30 в – 1.6 раза, при дозе N60P30K60 – в 2.6 раза; под второй травосмесью – в 1.9 и 2.5 раза соответственно.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены по теме бюджетного проекта № 121030100228-4.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных промышленностью земель. Екатеринбург, 2008. 256 с.
2. Богатиков О.А., Бортников Н.С., Карамурзов Б.С., Докучаев А.Я., Гурбанов А.Г. Техногенные месторождения полезных ископаемых: основные аспекты на современном этапе (на примере Тырныаузского месторождения) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 2. С. 213–218.
3. Бортников Н.С., Гурбанов А.Г., Богатиков О.А., Карамурзов Б.С., Докучаев А.Я., Лексин А.Б., Газеев В.М., Шевченко А.В. Оценка воздействия захороненных промышленных отходов Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината на экологическую обстановку (почвенно-растительный слой) прилегающих территорий Приэльбрусья (Кабардино-Балкарская республика, Россия) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2013. № 5. С. 405–416.
4. Брукс Р.Р. Биологические методы поисков полезных ископаемых. М., 1996, 312 с.
5. Водяницкий Ю.Н. Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. 2010. № 10. С. 1276–1280.
6. Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы. М.: Изд-во Юрайт, 2018. 237 с.
7. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест: Методические указания. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.
8. Головин А.А., Москаленко Н.Н., Ачкасов А.И., Волочков К.Л., Гуляева Н.Г., Гусев Г.С., Килипко В.А.,

- Криночкин Л.В., Морозова И.А., Трефилова Н.Я., Гинзбург Л.Н., Бедер А.Б., Клюев О.С., Колотов Б.А.* Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200000. М.: Изд-во Ин-та минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, 2002. 92 с.
9. ГОСТ 17.5.1.03–86. Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель // Сб. ГОСТов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. С. 23–28.
 10. *Гурбанов А.Г., Богатилов О.А., Винокуров С.Ф., Карамурзов Б.С., Газеев В.М., Лексин А.Б., Шевченко А.В., Долов С.М., Дударов З.И.* Геохимическая оценка экологической обстановки в районе деятельности Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината (Кабардино-Балкарская республика, Северный Кавказ): источники загрязнения окружающей среды, влияние на соседние территории и меры по реабилитации // Доклады АН. 2015. Т. 464. № 3. С. 328–333.
 11. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с.
 12. *Дорошкевич С.Г., Смирнова О.К., Дампилова Б.В., Гайдашев В.В.* Оценка состояния почв и растительности г. Закаменска (Бурятия): последствия деятельности Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2016. № 5. С. 427–441.
 13. *Дорошкевич С.Г., Смирнова О.К., Предеин П.А.* Биологическая активность почв в зоне влияния Джидинского вольфрамо-молибденового комбината (Западное Забайкалье) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2015. № 2. С. 40–47.
 14. *Иванов Г.М.* Микроэлементы-биофилы в ландшафтах Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. 239 с.
 15. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва–растение. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 220 с.
 16. *Ильин В.Б., Сысо А.И.* Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
 17. *Казнина Н.М.* Физиолого-биохимические и молекулярно-генетические механизмы устойчивости растений семейства *Roaseae* к тяжелым металлам. Дис. ... докт. биол. наук. Петрозаводск, 2016. 358 с.
 18. *Канищев А.Д., Менакер Г.И.* Среднее содержание 15 рудообразующих химических элементов в земной коре центрального и восточного Забайкалья. Чита: Изд-во Мин-ва геол. РСФСР, 1972. 11 с.
 19. *Кашин В.К.* Содержание микроэлементов в пырее в Западном Забайкалье // Агрохимия. 2020. № 3. С. 55–61.
 20. *Ковда В.А.* Биогеохимические циклы в природе и их нарушение человеком // Биогеохимические циклы в биосфере. М., 1976. С. 19–85.
 21. *Копцик Г.Н.* Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 851–868.
 22. *Копцик Г.Н.* Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113–1130.
 23. *Копцик Г.Н., Копцик С.В., Смирнова И.Е., Синичкина М.А.* Влияние деградации и ремедиации почв техногенных пустошей на поглощение элементов питания и тяжелых металлов растениями в Кольской Субарктике // Почвоведение. 2021. № 8. С. 969–982.
 24. *Куц Е.Д., Гребенников В.Г., Шипилов И.А.* Продуктивность многолетних бобово-злаковых травосмесей в связи с ценогическим взаимодействием растений // Научный журнал Куб.ГАУ. 2011. № 66(2). С. 1–11.
 25. *Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М.* Биопродуктивность почв сенокосов и пастбищ сухостепной зоны Забайкалья. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2006. 515 с.
 26. *Неаман А., Янъез К.* Фиторемедиация почв, загрязненных выбросами медеплавильного производства в Чили: результаты десятилетних исследований // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1564–1572.
 27. *Перельман А.И., Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 1999. 764 с.
 28. *Плюснин А.М., Гунин В.И.* Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2001. 137 с.
 29. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
 30. *Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
 31. СанПиН 1.2.3685–21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 29 января 2021 г. № 62296.

- <https://svsps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf>
32. Серегин И.В., Кожевникова А.Д. Роль тканей корня и побега в транспорте и накоплении кадмия, свинца, никеля и стронция // Физиология растений. 2008. Т. 55. С. 5–26.
 33. Смирнова О.К., Плюснин А.М. Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 180 с.
 34. Смирнова О.К., Саранулова А.Е., Цыренова А.А. Особенности нахождения тяжелых металлов в геотехногенных ландшафтах Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010. № 4. С. 319–327.
 35. Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е. Оценка эколого-геохимического состояния древесных растений в горнопромышленных ландшафтах (г. Закаменск, Республика Бурятия) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии: Сб. научн. ст. по материалам XV междунар. научн.-практ. конф. Барнаул: Концепт, 2016. С. 463–472.
 36. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М.: Прогресс, 1980. 327 с.
 37. Чернова О.В., Безуглова О.С. Опыт использования данных фоновых концентраций тяжелых металлов при региональном мониторинге загрязнения почв // Почвоведение. 2019. № 8. С. 1015–1026. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19080045>
 38. Яковлев А.С., Плеханова И.О., Кудряшов С.В., Ай-малетдинов Р.А. Оценка и нормирование экологического состояния почв в зоне деятельности предприятий металлургической компании “Норильский никель” // Почвоведение. 2008. № 6. С. 737–750.
 39. Carrier P., Baryla A., Navaux M. Cadmium distribution and microlocalization in oilseed rape plants (*Brassica napus*) after long-term grown on cadmium-contaminated soil // Planta. 2003. V. 216. P. 939–950. <https://doi.org/10.1007/s00425-002-0947-6>
 40. Dickinson N.M., Baker A.J.M., Dondoni A., Laidlaw S., Reeves R.D. Phytoremediation of inorganics: realism and synergies // Intern. J. Phytoremediation. 2009. V. 11. P. 97–114. <https://doi.org/10.1080/15226510802378368>
 41. Greger M., Landberg T. Use of willow in phytoextraction // Int. J. Phytorem. 1999. V. 1. № 2. Pp. 115–123. <https://doi.org/10.1080/15226519908500010>
 42. He Z.L., Yang X.E., Stoffella P.J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment // J. Trace Elements Medicine Biol. 2005. P. 125–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010>
 43. Heavy Metals in Soils / Ed. Alloway B.J. N.Y.: Wiley & Sons, 1990. 339 p.
 44. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 548 p.
 45. Klocke A. Richtwerte’80. Orientierungsdaten für tolerierbare Gesamtgehalte einiger Elemente in Kulturböden // Mitteilungen VDLUFA. 1980. V. 1/3. P. 9–11.
 46. Nazar R., Iqbal N., Masood A., Khan M., Syeed S., Khan N. Cadmium Toxicity in Plants and Role of Mineral Nutrients in Its Alleviation // Am. J. Plant Sci. 2012. V. 3. 2012. P. 1476–1489. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.310178>.
 47. Padmavathiamma P.K., Li L.Y. Rhizosphere influence and seasonal impact on phytostabilisation of metals -a field study // Water, Air, Soil Pollut. 2012. V. 223. P. 107–124. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0843-4>
 48. Phytotechnology Technical and Regulatory Guidance and Decision Trees, Revised. Technical // Regulatory Guidance. Washington, DC: ITRC, 2009. 175 p.
 49. SUMATECS. Sustainable management of trace element contaminated soils -Development of a decision tool system and its evaluation for practical application. Final Research Report / Ed. Puschenreiter M. Vienn: Universitat fur Bodenkultur Wien (BOKU), 2008. 314 p.
 50. Wang F., Li Y., Zhang Q., Qu J. Phytoremediation of cadmium, lead and zinc by *Medicago sativa* L. (alfalfa): A study of different period // Bulgarian Chem. Commun. 2015. V. 47. P. 167–172.
 51. White P.J., Brown P.H. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health // Annals of Botany. 2010. V. 105. P. 1073–1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>

Bioproductivity and Trace Element Composition of Cereal-Legume Grass Mixtures in Technozem when Applying Mineral Fertilizers

L. N. Boloneva¹, I. N. Lavrentieva¹, *, M. G. Merkusheva¹, L. L. Ubugunov¹,
V. L. Ubugunov¹, and S. B. Sosorova¹

¹*Institute of General and Experimental Biology SB RAS, Ulan-Ude, 670047 Russia*

**e-mail: ldm-boloneva@mail.ru*

The influence of sowing cereal-legume grass mixtures and application of mineral fertilizers on technozem created after the liquidation of the tailing dump of the Dzhida tungsten-molybdenum combine (Republic of Buryatia) on the change of trace element concentrations in plants and formation of turf, limiting the spread of pollutants and reducing environmental risks was assessed. The content of gross and mobile forms of some trace elements in the upper sandy loam layer of technozem was higher than in the background soil, exceeded the median background for the soils of Transbaikalia and in some cases the maximum permissible concentrations, and by the coefficient of total pollution ($Z_c = 18.8$) it was characterized as moderately hazardous, the lower loam – non-hazardous ($Z_c = 4$). It was revealed that the application of fertilizers reduced the concentration of trace elements and their accumulation coefficients in plants. According to the intensity of biological uptake, most of the elements in the aboveground phytomass belonged to the group of medium capture, in the underground – medium and intensive uptake, which indicates its phytostabilizing role. It was found that bioproductivity of grass mixtures in the control was low. Fertilizer application increased this indicator in the second year of grasses life to the average level, in the third year – to a high level, and in the fourth year turf was formed, fixing the surface layers and contributing to the increase of organic matter compared to its initial amount. The research results can be used on technozems created from overburden dumps for phytostabilization and initiation of organic matter accumulation in them by sowing high-yielding perennial grasses and applying mineral fertilizers.

Keywords: technogenic soil, trace elements, total pollution, biological remediation, perennial grasses, productivity, biological absorption coefficients, organic matter, phytostabilization, Western Transbaikalia