

УДК 550.47

СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ РУДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ЛЮЦЕРНЕ СЕРПОВИДНОЙ ТЕХНОГЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО АЛТАЯ

© *А.В. Пузанов, С.В. Бабошкина*, С.Н. Балыкин, А.В. Салтыков, Т.А. Рождественская, И.А. Трошкова*

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, ул. Молодежная, 1,
Барнаул, 656038, Россия, svetlana@iwerp.ru*

Цель исследования – оценить содержание и выявить особенности накопления и распределения основных рудных химических элементов в люцерне серповидной, растущей в условиях техногенного загрязнения окружающей среды – на хвостохранилищах Алтайского ГОКа и в его окрестностях. Методом атомно-абсорбционной спектрометрии определено содержание Zn, Cu, Pb в субстратах (почвах) и в люцерне (надземной массе и корнях). Установлено, что 85% образцов люцерны характеризуются повышенными концентрациями Zn – от 50 до 135 мг/кг воздушно-сухой надземной массы, но на удаленных от отвалов участках его содержание в люцерне снижается до уровня дефицитного. Содержание Cu (6.5–25.9 мг/кг) в люцерне, растущей на хвостохранилищах АГОКа, выше фонового, но редко превышает нормативы для кормовых трав, принятые за рубежом. Концентрации Pb в надземной массе люцерны старого некультивируемого отвала АГОКа изменяются от 11.3 до 18.5 мг/кг и заметно превышают содержание в люцерне, растущей на новом рекультивированном отвале (1.50–7.08 мг/кг), фоновые величины и литературные данные. Наиболее высокое содержание Zn, Cu, Pb в корнях люцерны и в верхнем слое субстрата установлено на поверхности нового отвала вблизи несанкционированной свалки бытовых отходов, что является примером сочетанного воздействия двух факторов негативного воздействия на окружающую среду. Высокие концентрации Zn в надземной фитомассе люцерны на рекультивированном участке нового отвала объясняются его дополнительным поглощением через поверхности листовых пластинок из оседающей на них пыли, а также проникновением корней люцерны на глубину залегания материала пульпы самого отвала с аномально высокими концентрациями металлов. В ряду интенсивности поглощения металлов люцерной изученных техногенных ландшафтов цинк занимает место в группе сильно накапливаемых элементов ($K_{bn} > 1$), а медь является элементом среднего захвата ($0,1 < K_{bn} < 1$). С увеличением содержания Cu и Zn в субстратах интенсивность их поглощения люцерной закономерно снижается. Предстоит выяснить безопасный для роста и развития люцерны максимально допустимый уровень содержания тяжелых металлов.

Ключевые слова: *Medicago falcata*, Алтайский ГОК, отвалы, субстрат, тяжелые металлы, Zn, Cu, Pb, коэффициент биологического поглощения, акропетальный коэффициент, рекультивация.

Для цитирования: Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Балыкин С.Н., Салтыков А.В., Рождественская Т.А., Трошкова И.А. Содержание основных рудных металлов в люцерне серповидной техногенных ландшафтов Северо-Западного Алтая // Химия растительного сырья. 2026. №1. С. 283–294. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260115660>.

Введение

Род *Medicago* в России представлен 50 видами одно- и многолетних трав или полукустарников [1]. В Сибири произрастает 5 видов *Medicago*, а наиболее распространенным является *Medicago falcata* (люцерна серповидная) – многолетнее растение с безрозеточными моноциклическими побегами и мощной корневой системой. Растет люцерна на почвах разного механического состава, в луговых степях, на полянах и опушках, в суходольных лугах, по обочинам дорог [2], характеризуется устойчивостью к болезням и вредителям [3], используется для залужения склоновых земель, подверженных водной и ветровой эрозии, улучшает структуру и плодородие почвы [4], является предшественником многих культур, медоносом и ценным кормовым растением, хорошо противостоящим вытаптыванию [5], принимает активное участие в биогенной миграции химических элементов [6]. Выживанию люцерны в неблагоприятных условиях, в том числе, при определенной антропогенной нагрузке на ландшафт способствует сильно развитая корневая система [8,

* Автор, с которым следует вести переписку.

9]. Это растение устойчиво к высоким концентрациям металлов в почве без проявления признаков угнетения, таких как некроз или обесцвечивание листьев [10], может интенсивно накапливать металлы в своих тканях [9, 11–13]. Однако избыток содержания тяжелых металлов в почвах хотя и не влияет на всхожесть люцерны, но приводит к замедлению роста ее корней и побегов [9].

Алтай является одним из богатейших регионов России по запасам полезных ископаемых. Более 50 лет руды с ряда месторождений Алтая перерабатывали на Алтайском горно-обогатительном комбинате: здесь получали медные, цинковые, свинцовые концентраты. За время работы комбината из отработанной АГОКом руды с северо-западной стороны от Горняка были складированы два больших хвостохранилища общей площадью около 1 км². Миграция поллютантов в результате эрозийных и дефляционных процессов на хвостохранилищах и загрязнение компонентов сопряженных отвалам природных ландшафтов являются главными экологическими проблемами прилегающих территорий [14].

В свое время в ходе проведения рекультивационных мероприятий на поверхность нового отвала был завезен почвоподобный грунт и посеяны смеси бобовых и злаковых культур. В настоящее время здесь произрастают различные представители семейства бобовых (остролодочник, астрагал, донник, горошек, солодка, люцерна), а также типичные для сухостепных ландшафтов Северо-Западного Алтая злаковые растения (типчак, колосняк), представители разнотравья (полынь, мальва, козлотородник), кустарник лох серебристый.

Загрязнение почвы тяжелыми металлами признано одним из основных факторов, негативно влияющих на окружающую среду. В высоких концентрациях металлы оказывают негативное воздействие на растительный организм [15–17], приводят к замедлению темпов роста и развития растений, снижению урожайности [16], нарушениям водного обмена [18, 19], сопровождающегося потерей тургора в листьях и снижением транспирации [20], что особенно актуально в условиях семиаридного климата изучаемой территории.

Цель исследования – сравнительная оценка содержания и выявления особенностей накопления и распределения основных химических элементов (Zn, Cu, Pb) металлических руд месторождений Северо-Западного Алтая в люцерне серповидной, произрастающей в условиях техногенного загрязнения окружающей среды – на субстратах хвостохранилищ Алтайского горно-обогатительного комбината (в системе «почва (субстрат) – растение») и почвах прилегающих территорий.

Экспериментальная часть

Экспедиционные работы проводили в 2023 г. По периметру (дамбе) и краям поверхности старого отвала Алтайского горно-обогатительного комбината, с его бортов и подножий, с поверхности нового (рекультивированного) отвала в разных пунктах были отобраны образцы грунта и люцерны серповидной (табл. 1, рис. 1, 2). Как и 16 лет назад, представители именно этого вида бобовых растений встречаются сейчас и на старом (не засыпанном почвоподобным грунтом) отвале (единично), и на рекультивированной части нового хвостохранилища, произрастая в качестве доминантного или субдоминантного представителя бобово-злаковых растительных сообществ. Образцы надземной массы и корней люцерны, субстратов ее произрастания были отобраны также в окрестностях АГОКа, на расстоянии 2 и 3 км на север от отвалов, по направлению господствующих южных ветров (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Пункты отбора растительных проб и образцов грунта на отвалах АГОКа и в его окрестностях

Точка отбора проб	Краткая характеристика точки
T.1	Эрозионный склон старого отвала
T.2	Поверхность южной части старого отвала
T.3	Южная (рекультивированная) часть нового отвала
T.4	Центр нового хвостохранилища
T.5	Северная (рекультивированная) часть нового отвала
T.6	Восточная часть нового хвостохранилища (свалка бытового мусора)
T.7	Берег озера, образовавшегося в результате разгрузки шахтных вод, у подножия старого отвала
T.8	2 км на север от отвалов
T.9	3 км на север от отвалов



Рис. 1. Карта-схема расположения пунктов отбора проб люцерны и грунта на хвостохранилищах АГОКа и в его окрестностях (Основа взята из открытого источника Google Maps)

Валовое содержание микроэлементов в подготовленных растительных пробах и образцах грунта определяли методом атомной абсорбции на спектрометре Квант-2мт в Институте почвоведения и агрохимии СО РАН (аналитики: А.В. Осипова, А.Ю. Кривчун, Т.П. Михальченко). Минимальная навеска сухого растительного образца – 15 г. Растительные пробы очищали от частиц почвы, промывали, измельчали, перед минерализацией высушивали до абсолютно-сухого веса при 105 °С. Рассчитывался вес абсолютно-сухой пробы, после чего ее озоляли в муфеле при 600 °С. О полноте озоления судили по отсутствию угольков в золе белого (характерного для бобовых растений) цвета. Рассчитывали зольность растительного образца. Для получения анализируемых растворов растительные пробы подвергались предварительной кислотной минерализации смесью концентрированной HNO_3 и H_2O_2 . Образцы грунта (100 г смешанной пробы) просеивали через капроновое сито с размером отверстий 1 мм, анализируемые растворы получали путем последовательной обработки навесок грунта соляной, азотной фтористоводородной и серной кислотами, при нагревании смесей до 260 °С. Измерения выходного сигнала анализируемых растворов проводили параллельно с измерением сигнала холостого раствора. Массовую долю элементов в пробе (мг/кг) вычисляли по формуле:

$$X^{\text{AAC}} = ((C_{\text{mi}} - C_{\text{x}}) \cdot V \cdot k) / m,$$

где C_{mi} – концентрация элемента в анализируемом растворе; C_{x} – концентрация элемента в холостом растворе; V – объем анализируемого раствора; k – коэффициент разбавления; m – масса навески (г). Калибровку и контроль точности измерений химических элементов в пробах вели по аттестованным значениям их массовой доли в стандартных образцах почв. Относительная погрешность измерений была в пределах 10%.

Гранулометрический состав исследуемых почв и грунтов определяли пипеточным методом по А.Н. Качинскому, рН – потенциометрически.

Статистическая обработка результатов проведена стандартными методами с расчетом среднего арифметического (\bar{X}), его стандартной ошибки (σ) и коэффициента вариации (C_v). Рассчитывались коэффициенты парной корреляции (r). Доступность Cu , Zn , Pb растениям оценивали по коэффициенту биологического поглощения ($K_{\text{бл}}$) – отношению содержания элемента в золе растения к валовому его содержанию в субстрате произрастания [21]. Для оценки распределения, направления и интенсивности перемещения основных рудных металлов в организме люцерны использовали акропетальный коэффициент (АК), как отношение содержания химического элемента в корне растения к его содержанию в надземной фитомассе.



а

б

в

Рис. 2. Фото объекта исследования: а) частично зарастающий северный край поверхности старого некультивируемого отвала АГОКа; б) рекультивированная поверхность нового отвала, кустарниково-бобовая ассоциация на завезенном почвогрунте; в) разрез в центре нового отвала, под кустарниковой бобово-злаковой ассоциацией, до глубины погребенного под почвоподобным грунтом материала пульпы

Содержание металлов в субстратах отвалов АГОКа и в почвах отдаленных участков сравнивались с ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК) в нейтральных глинистых почвах (самый высокий уровень допустимых значений) [22].

Степень загрязнения люцерны тяжелыми металлами определялась сравнением с их содержанием в люцерне с удаленных территорий, с люцерной, растущей в районе с. Корболиха (в 38 км от Горняка), с литературными данными, с уровнями нормального, повышенного и дефицитного содержания металлов в растениях [16, 17, 23], с уровнем кормовой пригодности (forage suitability level) – зарубежным нормативом, используемым при определении уровня риска для домашних животных, употребляющих в пищу исследуемые травянистые растения [24].

Результаты исследования и обсуждение

По абсолютному содержанию в надземной фитомассе люцерны изученные металлы являлись элементами высоких (Zn 33–136 мг/кг), средних – (Cu 6–26 мг/кг) и низких (Pb 1.5–18.5 мг/кг) величин концентраций. Содержания Zn, Cu, Pb в люцерне, произрастающей на субстратах хвостохранилищ АГОКа, заметно выше фонового уровня и приводимых в литературе значений для люцерны природных ландшафтов, однако по сравнению с данными 16-летней давности (в 2007 г. определение было выполнено также атомно-абсорбционным методом [14]), концентрации токсикантов в растительном организме люцерны заметно снизились (табл. 2).

Содержание Zn в надземной фитомассе люцерны, растущей на отвалах АГОКа и его окрестностях, находилось в пределах нормального варьирования (33–44%), Cu – значительного (49–53%), а Pb – большого (82–88%) [27]. Такая вариабельность обусловлена различной подвижностью микроэлементов в почвах природных ландшафтов и антропогенно-преобразованных субстратах и разной интенсивностью их перемещения из корня в надземные части растений [7].

Таблица 2. Статистические показатели содержания Zn, Cu, Pb в люцерне серповидной, произрастающей на субстратах хвостохранилищ АГОКа и его окрестностях, а также в люцерне других территорий (по литературным данным), мг/кг воздушно-сухого вещества

	Zn	Cu	Pb
X±x	86.8±14.5	12.4±2.5	7.59±2.62
Lim	33.7–135.3	6.5–25.9	1.5–18.47
Cv, %	41	53	85
В люцерне на расстоянии 3 км от отвалов на север			
	17.3	7.45	0.74
В люцерне на старом отвале АГОКа в 2007 г. [14]			
	186	50	66
В люцерне фоновой территории, на черноземах окрестностей с. Корболиха			
	23	7.8	2.6
В люцерне разных ландшафтов Западного Забайкалья [7]			
X±x	21.2±4.3	8.9±1.5	0.93±0.09
В люцерно-костречевой смеси агроценозов Новосибирской области [25]			
X±x	25.5±3.7	3.24±0.55	0.85±0.15
Lim	7.0–6.2	0.91–7.1	0.13–1.7
В люцерне посевной на черноземовидных почвах Амурской области [26]			
	91.7	Н.д.	6.4
В люцерне на почвах промышленных районов Польши [9]			
Lim	118–224	20.6–31.8	24.4–104
Уровень кормовой пригодности травянистых культур [24]			
	100	30	10

Примечание: X±x – среднее арифметическое ± ошибка среднего, Lim – пределы колебаний, Cv, % – коэффициент вариации.

Концентрации цинка в люцерне серповидной техногенных ландшафтов АГОКа заметно превышают уровни его содержания и в люцерне Западного Забайкалья, и в люцерно-костречевой смеси Новосибирской области, и выше (в 1.5–6.5 раза) среднего содержания в люцерне фоновых и отдаленных от отвалов АГОКа участков (табл. 2). Считается, что нормальное количество цинка в растениях должно быть в пределах 30–50 мг/кг [23], по другим данным обычное содержание цинка в частях растений, богатых хлорофиллом, должно составлять 40–95 мг/кг [16]. По В.В. Добровольскому, средняя концентрация цинка в ежегодной продукции растительности мировой суши принимается равной 30 мг/кг сухой фитомассы [17]. По результатам нашего исследования, в 85% образцов надземной фитомассы люцерны содержание цинка можно признать повышенным (>50 мг/кг), но с расстоянием от хвостохранилищ концентрации цинка в люцерне снижаются до уровня дефицитного уровня (17.3–23.0 мг/кг).

Произрастая на субстратах старого (нерекультивированного) отвала с высоким содержанием цинка в его верхнем слое (487–535 мг/кг), превышающим в 2–2.5 раза ОДК в почвах (220 мг/кг, [22]), люцерна накапливает меньше цинка в надземной массе (33.7–61.9 мг/кг), чем на почвоподобном субстрате рекультивированных участков нового отвала (85.8–135.3 мг/кг сухой массы), в верхнем слое которого содержание цинка заметно ниже (83–397 мг/кг). Однако отметим, что погребенный под почвоподобным слоем материал самого отвала идентифицируется здесь уже на глубине 30 см: он желтого цвета и отличается аномально высоким содержанием в нем рудных элементов (10024 мгZn/кг). Возможно, проникновение корней люцерны на глубину залегания материала нового отвала определяет здесь интенсивное поступление металла в растительный организм – взойдя и прорастая на относительно «чистом» в плане содержания тяжелых металлов почвоподобном грунте, люцерна в последующие годы жизни не успевает выработать защитный механизм, препятствующий проникновению металлов в ткани через корень, достигший глубины залегания материала самого хвостохранилища. Также, возможно, здесь происходит и поглощение цинка растением с поверхности листовой пластинки из принесенной ветром с нереккультивированной части отвала пыли с высоким содержанием токсикантов.

В точке 6 на новом отвале содержание цинка в верхнем горизонте субстрата достигало 1287 мг/кг (5.8 ОДК), что объясняется расположением пункта отбора возле стихийной свалки бытовых отходов. При этом в надземной массе люцерны, произрастающей на этом участке, содержание цинка было сравнительно невысокое, всего 85.8 мг/кг, но в ее корнях – максимальное: 275.1 мг/кг, АК=3.2.

Содержание цинка в надземной массе люцерны выше, чем в корнях ($AK < 1$), в случае ее произрастания на поверхности нового отвала (т.3, т.4, т.5), на отдаленных от отвалов участках (т.8, т.9) и возле озера (т.7), в верхних слоях субстрата которых содержание цинка не самое высокое (56–397 мг/кг). Считается, что содержание Zn в надземных органах растений может превышать корневое, особенно при фоновых концентрациях металлов в почве [28]. В люцерне, произрастающей на субстратах с самыми высокими содержаниями Zn в верхних горизонтах (535–1287 мг/кг) – на нерекультивированных поверхностях старого отвала АГОКа (т.1, т.2), вблизи свалки на поверхности нового отвала (т.6) – наоборот, концентрации цинка в корнях (157.2–275.1 мг/кг сухой массы) превышают его содержание в надземной массе (33.7–85.8 мг/кг), $AK > 1$. Есть мнение, что корневой барьер, предотвращающий избыточное поступление тяжелых металлов в зеленую массу растения, лучше функционирует при концентрациях, превышающих величины толерантности к ним вида [28].

Содержание меди в люцерне отвалов АГОКа варьирует от 6.5 до 25.9 мг/кг воздушно-сухого вещества надземной фитомассы, превышает диапазон значений в люцерне удаленных от хвостохранилищ участков (5.9–7.4 мг/кг), но находится пределах уровня содержания меди в люцерне Западного Забайкалья (2.3–34 мг/кг) [7] и не превышает показатель кормовой пригодности [24] (табл. 2). Считается, что концентрация меди 32 мг/кг сухого вещества в клевере, люцерне и фасоли уже является токсичной для растений [16], а нормальное содержание Cu в травянистых растениях не должно превышать 10 мг/кг [23]. Наиболее высокие концентрации Cu в люцерне (в побегах и корнях) нами обнаружены в т.6 возле стихийной свалки на поверхности нового хвостохранилища, здесь же установлено максимальное содержание меди в верхнем слое субстрата (801 мг/кг), в 6 раз превышающее ОДК для нейтральных глинистых почв (132 мг/кг [22]). Среднее содержание меди в надземной массе люцерны техногенных ландшафтов АГОКа (12.4 ± 2.5 мг/кг) выше среднего содержания меди в люцерне Западного Забайкалья и в люцерно-кострецовой смеси агроценозов Новосибирской области.

В корнях люцерны, произрастающей в условиях техногенного воздействия, содержание меди, как правило, существенно выше (9.12–70.6 мг/кг), чем в надземной массе, $AK > 1$. На участках, удаленных на 2 и 3 км от отвалов, содержание меди в надземной массе люцерны невысокое (5.9–7.5 мг/кг), но превышает ее содержание в корнях, что объясняется дополнительным поступлением металла в растение через устьица листовой пластинки [16] из привнесенной ветром с поверхности хвостохранилищ пыли (аэрогенный перенос токсикантов является доминирующим путем их миграции в условиях семиаридного климата Северо-Западного Алтая [14]).

Содержание свинца в люцерне изученных техногенных ландшафтов на порядок выше приведенных в литературе величин [7, 25]; но среднее значение сопоставимо с содержанием свинца в люцерне посевной Амурской области [26] (табл. 2). По В.В. Добровольскому (2003), в растениях содержание свинца считается нормальным в пределах от 1.25 до 2.0 мг/кг, по другим данным [15] – до 10 мг/кг. В люцерне старого нерекультивированного отвала свинца содержится существенно больше (11.31–18.47 мг Pb/кг), чем в сухой надземной массе люцерны, растущей на новом рекультивированном отвале АГОКа, (1.5–7.08 мг Pb/кг). При этом верхние слои субстратов старого (104–190 мг Pb/кг) и нового (104–248 мг Pb/кг) хвостохранилищ по содержанию в них свинца различаются несущественно, превышая ОДК Pb для нейтральных почв (130 мг/кг [22]) не более чем в 2 раза, (но в 4 раза – ОДК для кислых почв [22]). Отметим, что кислая реакция среды субстрата старого отвала ($pH = 2.8$) способствует образованию подвижных форм металлов и активизирует процессы их поступления в растительный организм [15–17], что определяет здесь довольно высокое содержание Pb в люцерне. В корнях люцерны, произрастающей в т.6 возле свалки новых отвалов АГОКа, содержание свинца достигает 38.15 мг/кг сухой массы. На расстоянии 2 км от отвалов в корнях люцерны содержится всего 3.05 мг/кг свинца, а в 3 км от отвалов – только 1.54 мг Pb/кг.

Установлено, что содержание изученных металлов (Zn, Cu, Pb) в золе корней люцерны часто заметно выше, чем в почве (рис. 3). Являясь первым органом, через который элементы поступают в растения, корни задерживают наибольшее количество токсикантов, предотвращая их поступление в остальные части растительного организма. Отметим, что содержание железа (реперного элемента, по которому часто проводят нормирование содержания токсикантов в различных средах) в золе корней люцерны отвалов АГОКа и почв окрестностей ожидаемо в 10–30 раз ниже, чем в грунтах.

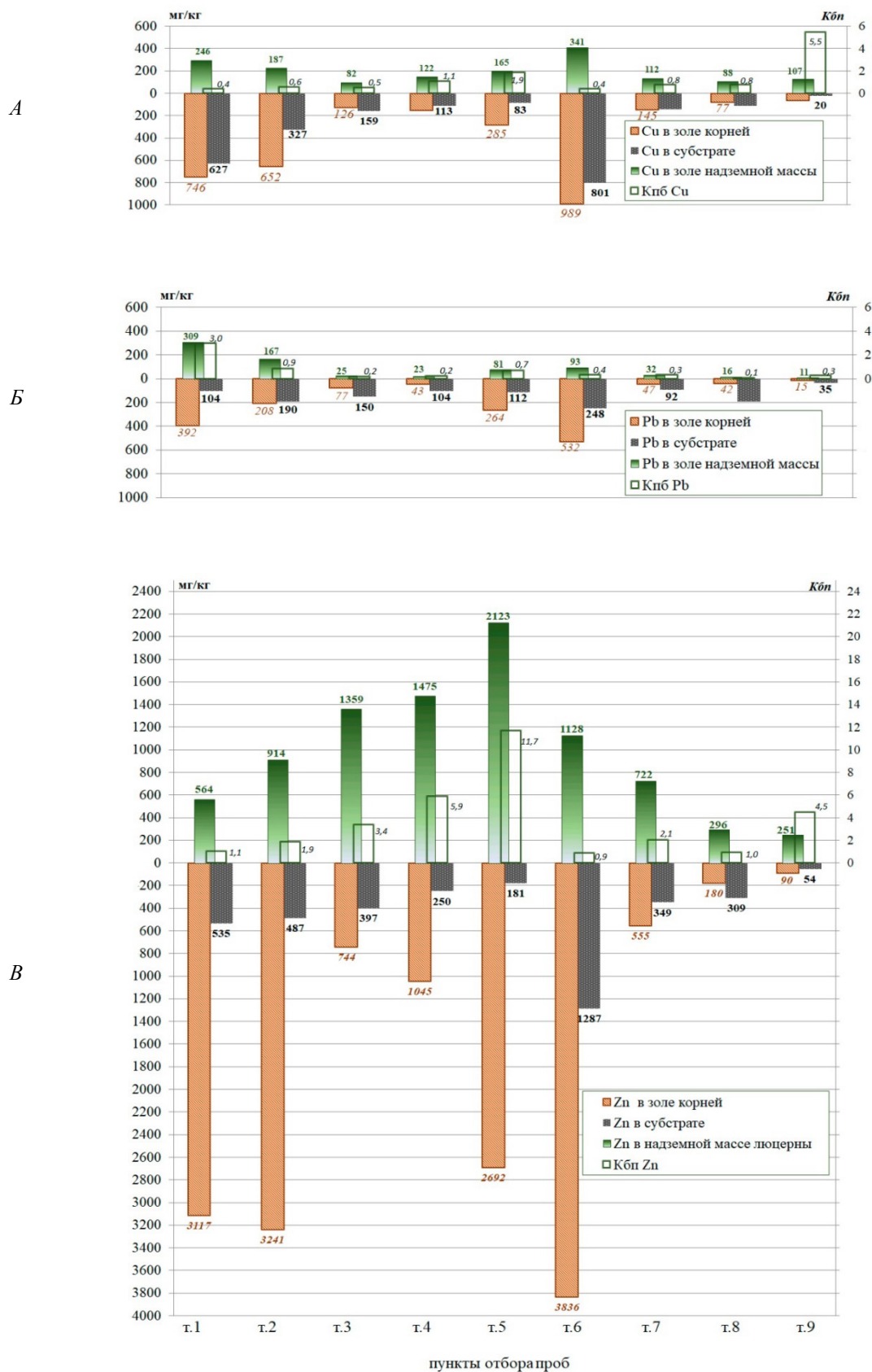


Рис. 3. Интенсивность поглощения (Кбн) и содержание Cu (А), Pb (Б), Zn (В) в надземной массе и корнях люцерны серповидной (в пересчете на золу) и в субстратах ее произрастания – в верхних слоях хвостохранилищ АГОКа и в почвах окрестностей, мг/кг

Содержание Cu в золе надземной массы люцерны, как правило, не превышает ее концентрации в субстратах и в почвах, за исключением т.5 в центре нового отвала и т.9 в 3 км от отвала на север, здесь $K_{bn}(Cu) < 1$. (рис. 3А). Люцерна, растущая на старом хвостохранилище (т.1), содержит в своих тканях (в пересчете на золу) больше Pb, чем субстрат, в остальных случаях $K_{bn}(Pb) > 1$ (рис. 3Б). Что касается Zn, то и в золе корней, и в золе надземной массы люцерны его содержится больше, чем в субстрате произрастания, $K_{bn}(Zn) > 1$ (рис. 3В).

Таким образом, наиболее высокие значения K_{bn} (в среднем, 3.5) и наиболее широкий диапазон их колебаний (0.9–11.7) отмечены для цинка. По результатам нашего исследования Zn может быть отнесен к группе «сильно накапливаемых элементов» с $K_{bn} = n \cdot 10^0 - n \cdot 10^1$, что совпадает с ранжированием А.И. Перельмана [21]. В люцерне центральной рекультивированной части нового отвала (т.4, т.5) установлены и самые высокие содержания Zn в люцерне (рис. 3В) и наивысшие $K_{bn}(Zn)$, при сравнительно низкой концентрации Zn в верхнем горизонте насыпного почвоподобного грунта, перекрывающего отвал, но аномально высоком его содержании (10024 мгZn/кг) в погребенном под почвогрунтом самом материале нового отвала, залегающем на глубине 30 см, куда уже проникают корни люцерны. Возможно, в начале своего развития, растение «не успевает» выработать защитный механизм, препятствующий накоплению тяжелых металлов, а достигнув корнями слоя с высоким их содержанием, продолжает интенсивно поглощать и проводить металлы от корня к стеблю и листьям. Минимальный K_{bn} Zn люцерной (0.9) установлен в т.8 вблизи свалки – при довольно высоких концентрациях цинка как в люцерне (1128 мг/кг золы), так и в субстрате (1287 мг/кг).

В среднем, K_{bn} меди люцерной техногенных ландшафтов в районе АГОКа составляет 0.8 ± 0.2 ($C_v = 63\%$), изменяясь от 0.4 до 2.0. Металл с таким K_{bn} соответствует «группе элементов слабого накопления и среднего захвата» с $K_{bn} = n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^0$, что совпадает с оценкой $K_{bn}(Cu)$ А.И. Перельмана [21]. В центральной части нового отвала (т.5) медь (также как и цинк) довольно интенсивно поглощается люцерной, $K_{bn} = 1.9$ (т.5), $K_{bn} = 1.1$ (рис. 3А), при сравнительно низком ее содержании в верхнем слое почвоподобного грунта (83 и 113 мгCu/кг), но аномально высокой (10852 мгCu/кг) концентрации в погребенном под завезенным грунтом материале пульпы самого отвала. В то же время на старом некультивированном хвостохранилище (т.1, т.2) и в пункте возле свалки (т.6) с повышенным содержанием меди и в субстратах, и в фитомассе люцерны все же не отличается высокой интенсивностью ее поглощения, $K_{bn} = 0.4$, что объясняется действием корневого барьера при изначально высоких концентрациях в среде обитания. Высокий K_{bn} (5.5) меди на участке удаленном на 4 км на север от отвалов объясняется дополнительным поступлением Cu в растение с поверхности листовых пластинок из пыли, оседающей в результате аэрогенного переноса с некультивированных участков хвостохранилищ. Более высокое содержание металлов в побегах *Medicago falcata* L., чем в ее корнях, было обнаружено в работе [11].

Для Cu установлена сильная прямая корреляционная зависимость между ее содержанием в верхнем слое субстрата и концентрациями в надземной растительной массе ($r = +0.93$) и в корнях ($r = +0.94$). Для цинка и свинца прямые корреляционные связи содержаний в растительных тканях с содержаниями в субстратах выявлены только для корней ($r = 0.68$; $r = 0.52$). С увеличением концентраций Cu и Zn в субстратах произрастания интенсивность их поглощения люцерной (K_{bn}) заметно снижается, корреляционная зависимость этих показателей отрицательная ($r = -0.48$, $r = -0.50$).

K_{bn} свинца люцерной техногенных и фоновых ландшафтов, как правило, не превышает 1 и изменяется от 0.1 до 0.9, кроме т.1 на старом отвале, где, при не самом высоком содержании свинца в субстрате (104 мг/кг), содержание его в золе надземной массы достигает 309 мг/кг, $K_{bn} = 3.0$ (рис. 3Б). Более интенсивному поступлению свинца в растения старого отвала способствует низкий pH субстрата – 2.8–3.5: известно, что подвижность металлов в почве и их доступность растениям возрастает в кислой среде [17, 21]. pH почвоподобного грунта на новом отвале изменяется от 7.0 до 8.1, поэтому интенсивность поглощения свинца люцерной здесь ниже. Содержание свинца в корнях люцерны, как правило, выше, чем в надземной массе, $AK > 1$. В исследованиях [9, 29] побеги *Medicago falcata* также накапливали меньше Pb, чем корни.

Для цинка и свинца установлены довольно сильные прямые корреляционные зависимости ($r = +0.74$, $r = 0.95$) между абсолютным содержанием в золе надземной массы растения и K_{bn} , при этом степень интенсивности поглощения этих металлов растением напрямую корреляционно не зависит от их содержания в верхнем слое субстрата произрастания.

Очевидно, поступление металлов в надземные органы люцерны техногенных ландшафтов может происходить не только корневым путем, но и с поверхности листовой пластинки, а перераспределение в

растительном организме определяется не только содержанием в субстрате произрастания, но и физиологией самого растения, свойствами химического элемента и потребностями в нем.

Заключение

Определены средние величины и диапазоны варьирования концентраций основных рудных (Zn, Cu, Pb) элементов в люцерне серповидной, произрастающей на субстратах техногенных ландшафтов Северо-Западного Алтая. По содержанию в люцерне эти металлы образуют ряд: Zn > Cu > Pb.

Концентрации цинка в люцерне отвалов АГОКа выше содержания в люцерне фоновых и отдаленных от отвалов АГОКа участков, в 85% случаев превышают 50 мг/кг что считается избыточным. С расстоянием от хвостохранилищ концентрации цинка в люцерне снижаются до уровня «дефицитного». Содержание Cu в сухой надземной массе люцерны отвалов АГОКа выше фоновых величин, но не превышает зарубежные нормативы для кормовых трав. В люцерне старого отвала концентрация свинца значительно выше его содержания в люцерне, растущей на новом рекультивированном отвале, хотя в верхних слоях субстратов произрастания содержание свинца довольно равномерно.

Максимальное содержание Zn, Cu, Pb в корнях люцерны и в верхнем слое субстрата установлено в т.б на поверхности нового отвала вблизи стихийной свалки, что является примером сочетанного воздействия двух факторов загрязнения окружающей среды. В то же время содержание металлов в надземной массе люцерны здесь не самое высокое.

В золе корней люцерны, произрастающей в условиях техногенного прессинга, содержание основных рудных металлов (Zn, Cu, Pb) часто выше, чем в субстрате.

Наиболее высокий K_{bn} люцерной, растущей в условиях техногенного воздействия хвостохранилищ АГОКа и в его окрестностях, отмечен для цинка, который является «сильно накапливаемым элементом» с $K_{bn} = n \cdot 10^0 - n \cdot 10^1$. Самое высокое содержание Zn и его K_{bn} установлено в люцерне на новом отвале (при невысоком содержании Zn в верхнем слое почвоподобного субстрата), что можно объяснить дополнительным поступлением металлов в растение с поверхности листовой пластинки из пыли, привнесенной ветром с открытых поверхностей хвостохранилищ, а также проникновением корней люцерны на глубину залегания материала пульпы с аномально высоким содержанием в нем Zn.

Кислая реакция среды субстрата старого отвала способствует образованию подвижных форм металлов и активизирует процессы их поступления в растительный организм, что определяет здесь самые высокие содержания и K_{bn} в надземной массе Pb (при довольно равномерном его содержании в субстрате) и одни из самых высоких концентраций и K_{bn} Zn, Cu в корнях люцерны.

Выявлена обратная зависимость интенсивности поступления в люцерну Cu и Zn от их содержания в субстратах произрастания (чем выше содержание металлов в субстрате, тем менее интенсивно растение их поглощает).

Произрастая на старом нерекультивированном отвале, люцерна отличается более высокими концентрациями меди и свинца в надземной массе. Но распределение Cu и Pb в тканях люцерны, как правило, происходит по акропетальному типу. Что касается цинка, то функционирование корневого барьера, предотвращающего избыточное поступление Zn в зеленую массу растения, проявляется только при повышенных концентрациях токсиканта в верхнем слое субстрата. Цинк, как более мобильный элемент, проникает в растение более интенсивно.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания Института водных и экологических проблем СО РАН по проекту FUFZ-2026-0002 «Биогеохимия макро- и микроэлементов, радионуклидов и ракетных топлив в сопряженных ландшафтно-геохимических системах речных и озерных бассейнов для оценки качества среды и здоровья населения».

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Романенко Г.А., Тютюнников А.И., Гончаров П.Л. Кормовые растения России. М., 1999. 370 с.
2. Положий А.В., Выдрин С.Н., Курбатский В.И., Никифорова О.Д. Флора Сибири. Т. 9: Fabaceae (Leguminosae). Новосибирск, 1994. 280 с.
3. Будкевич Т.А., Заболотный А.И., Пикун П.Т., Пикун М.Ф., Коротков М.М. Эколого-физиологическая характеристика некоторых перспективных для введения в культуру корневищных морфотипов дикорастущих бобовых растений // Ботаника (исследования): сборник научных трудов. Минск, 2011. С. 356–372.
4. Атласова Л.Г. Азотфиксация, фотосинтез и продуктивность люцерны в условиях долины средней Лены // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2019. №2. С. 77–80.
5. Сыева С.Я., Карнаухова Н.А., Зверева Г.К., Храмова Е.П., Бугаева М.В., Ледеяева Н.В., Сальникова Е.А., Басаргина О.М. Сравнительная оценка состояния бобового компонента на природных и сеяных кормовых угодьях Республики Алтай // Инновации и продовольственная безопасность. 2021. №2 (32). С. 46–59. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-32-2-46-59>.
6. Гехаев Т.Я. Изучение биогенной миграции веществ в фитоценозе люцерны // Агрохимия. 2007. №3. С. 57–60.
7. Кашин В.К. Содержание микроэлементов в люцерне в Западном Забайкалье // Агрохимия. 2018. №8. С. 46–51.
8. Карнаухова Н.А., Сыева С.Я. Кормовая характеристика и состояние ценопопуляций *Medicago falcata* L. в Сибири // Тимирязевский биологический журнал. 2023. №2. С. 6–18.
9. Pusz A., Wiśniewska M., Kamiński A., Knosala P., Rogalski D. Influence of Carbons on Metal Stabilization and the Reduction in Soil Phytotoxicity with the Assessment of Health Risks // Resources. 2024. Vol. 13(5). 66. <https://doi.org/10.3390/resources13050066>.
10. Angle J.S., Linacre N.A. Metal phytoextraction – A survey of potential risks // International Journal of Phytoremediation. 2005. Vol. 7(3). Pp. 241–254. <https://doi.org/10.1080/16226510500215779>.
11. Peralta J.R., Gardea-Torresdey J.L., Tiemann K.J., Gomez E., Arteaga S., Rascon E., Parsons J.G. Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.) // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2001. Vol. 66. Pp. 727–734.
12. Богуславская Н.В. Содержание и кормление молочного скота в условиях повышенной техногенной нагрузки на агроэкосистемы // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. 2010. №2. С. 518.
13. Мамаева Г.Г. Изучение возможности использования фасоли, овса и люцерны для биологической рекультивации почв, загрязненных свинцом и кадмием; накопление в различных частях растений (*Мексика*) // Экологическая безопасность в АПК. Реферативный журнал. 2006. № 2. С. 328.
14. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Горбачев И.В. Особенности миграции тяжелых металлов в природно-техногенных аномалиях Северо-Западного Алтая // Геохимия. 2012. №4. С. 393–402.
15. Kabata A. Trace elements in soils and plants. London – New-York: CRC Press Taylor and Francis Group Boca Raton, 2011. 534 p.
16. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л., 1987. 140 с.
17. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М., 2003. 400 с.
18. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М., Лайдинен Г.Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск, 2007. 172 с.
19. Rucin'ska-Sobkowiak R. Water relations in plants subjected to heavy metal stress // Acta Physiol. Plant. 2016. Vol. 38. 257. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2277-5>.
20. Sukiasyan A.R. Antioxidant capacity of maize corn under drought stress from the different zones of growing // International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering. 2016. Vol. 10(8). Pp. 413–416.
21. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М., 1999. 768 с.
22. Гигиенические нормативы 2.1.7.2511-09. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. М., 2009. 11 с.
23. Ковальский В.В. Геохимическая среда, микроэлементы, реакции организмов // Труды Биогеохимической лаборатории. 1991. Т. 22. С. 5–24.
24. Kabata-Pendias A., Motowicka-Terelak T., Piotrowska M., Terelak H., Witek T. Ocena Stopnia Zanieczyszczenia Gleb i Roslin Metalami Ciezкими i Siark. Ramowe Wytuczne Dla Rolnictwa, IUNG. Poland, Pulawy, 1993. 23 p.
25. Фещенко В.П. Содержание тяжелых металлов в кормовых культурах Новосибирской области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. №10 (120). С. 33–36.
26. Голов В.И., Самохвалова О.С., Ананьева Э.В., Тимофеев А.Н. Условия накопления микроэлементов и тяжелых металлов основными кормовыми культурами на почвах Амурской области // Вестник КрасГАУ. 2007. №2. С. 59–62.
27. Зайцев Г.Н. Математика в экспериментальной ботанике. М., 1990. 296 с.
28. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / под ред. Н.Г. Зырина. М., 1985. 300 с.
29. Ghelich S., Zarinkamar F., Soltani B.M., Niknam V. Effect of lead treatment on medicarpin accumulation and on the gene expression of key enzymes involved in medicarpin biosynthesis in *Medicago sativa* L. // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. Pp. 14091–14098.

Поступила в редакцию 30 июля 2024 г.

После переработки 27 ноября 2025 г.

Принята к публикации 27 ноября 2025 г.

Puzanov A.V., Baboshkina S.V.*, Balykin S.N., Saltykov A.V., Rozhdestvenskaya T.A., Troshkova I.A. CONTENTS OF MAIN ORE METALS IN *MEDICAGO FALCATA* OF NORTH-WESTERN ALTAI TECHNOGENIC LANDSCAPES

Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, st. Molodezhnaya, 1, Barnaul, 656038, Russia, svetlana@iwep.ru

The objective of the study was to assess the content and to identify the features of main ore chemical elements accumulation and distribution in *Medicago falcata* growing in environment technogenic pollution conditions. The content of Zn, Cu, Pb in substrates, soils and in alfalfa (roots and shoots) growing in the tailings dumps of the Altai Mining and Processing Plant (AMPP) and in its environs was determined using atomic absorption spectrometry. It was found that 85% of alfalfa samples are characterized by increased concentrations of Zn (50–135 mg/kg of dry above-ground mass), but in areas remote from the dumps its content in alfalfa decreases to a deficit level. The content of Cu (6.5–25.9 mg/kg) in alfalfa growing in tailings dumps is higher than the background level, but does not exceed foreign standards for forage grasses. The concentration of Pb in alfalfa from the old unreclaimed AMPP tailing dump (11.31–18.47 mg/kg) is higher than in alfalfa growing on the new reclaimed waste dump (1.5–7.08 mg/kg), significantly exceeding background values and literature data. The highest content of Zn, Cu, Pb in alfalfa roots and in the upper layer of the substrate was found on the surface of the new AMPP tailing near the spontaneous household waste dump, which is an example of two environmental pollution factors combined effect. High Zn concentrations in alfalfa on the new reclaimed tailing dump are explained by additional absorption of the toxicant from the dust settling on the surface of the leaf blade, as well as penetration of alfalfa roots on the tailing dump material burial depth with extremely high concentrations of metals. In the range of metal uptake rates by alfalfa in the studied technogenic landscapes, zinc is classified as a highly accumulative element ($A_x > 1$), while copper is a moderately accumulative element ($0.1 < A_x < 1$). As the Cu and Zn content in the substrates increases, the intensity of their uptake by alfalfa naturally decreases. It is necessary to determine the maximum permissible level of heavy metals that is innocuous for the growth and development of alfalfa.

Keywords: alfalfa, Altai Mining and Processing Plant, tailing dump, substrate, heavy metals, Zn, Cu, Pb, biological absorption coefficient, acropetal coefficient, reclamation.

For citing: Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Balykin S.N., Saltykov A.V., Rozhdestvenskaya T.A., Troshkova I.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, pp. 283–294. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260115660>.

References

- Romanenko G.A., Tyutyunnikov A.I., Goncharov P.L. *Kormovyye rasteniya Rossii*. [Forage plants of Russia]. Moscow, 1999, 370 p. (in Russ.).
- Polozhiy A.V., Vydrina S.N., Kurbatskiy V.I., Nikiforova O.D. *Flora Sibiri. T. 9: Fabaceae (Leguminosae)*. [Flora of Siberia. Vol. 9: Fabaceae (Leguminosae)]. Novosibirsk, 1994, 280 p. (in Russ.).
- Budkevich T.A., Zabolotnyy A.I., Pikun P.T., Pikun M.F., Korotkov M.M. *Botanika (issledovaniya): sbornik nauchnykh trudov*. [Botany (research): collection of scientific papers]. Minsk, 2011, pp. 356–372. (in Russ.).
- Atlasova L.G. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, no. 2, pp. 77–80. (in Russ.).
- Syyeva S.Ya., Karnaukhova N.A., Zvereva G.K., Khranova Ye.P., Bugayeva M.V., Ledyayeva N.V., Salnikova Ye.A., Basargina O.M. *Innovatsii i proizvodstvennaya bezopasnost'*, 2021, no. 2 (32), pp. 46–59. <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2021-32-2-46-59>. (in Russ.).
- Gekhayev T.Ya. *Agrokimiya*, 2007, no. 3, pp. 57–60. (in Russ.).
- Kashin V.K. *Agrokimiya*, 2018, no. 8, pp. 46–51. (in Russ.).
- Karnaukhova N.A., Syyeva S.Ya. *Timiryazevskiy biologicheskiy zhurnal*, 2023, no. 2, pp. 6–18. (in Russ.).
- Pusz A., Wiśniewska M., Kamiński A., Knosala P., Rogalski D. *Resources*, 2024, vol. 13(5), 66. <https://doi.org/10.3390/resources13050066>.
- Angle J.S., Linacre N.A. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, vol. 7(3), pp. 241–254. <https://doi.org/10.1080/16226510500215779>.
- Peralta J.R., Gardea-Torresdey J.L., Tiemann K.J., Gomez E., Arteaga S., Rascon E., Parsons J.G. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, vol. 66, pp. 727–734.
- Boguslavskaya N.V. *Ekologicheskaya bezopasnost' v APK. Referativnyy zhurnal*, 2010, no. 2, p. 518. (in Russ.).
- Mamayeva G.G. *Ekologicheskaya bezopasnost' v APK. Referativnyy zhurnal*, 2006, no. 2, p. 328. (in Russ.).
- Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Gorbachev I.V. *Geokhimiya*, 2012, no. 4, pp. 393–402. (in Russ.).
- Kabata A. *Trace elements in soils and plants*. London – New-York: CRC Press Taylor and Francis Group Boca Raton, 2011, 534 p.
- Alekseyev Yu.V. *Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh*. [Heavy metals in soils and plants]. Leningrad, 1987, 140 p. (in Russ.).
- Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeokhimii*. [Fundamentals of Biogeochemistry]. Moscow, 2003, 400 p. (in Russ.).
- Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M., Laydinen G.F. *Ustoychivost' rasteniy k tyazhelym metallam*. [Plant resistance to heavy metals]. Petrozavodsk, 2007, 172 p. (in Russ.).
- Rucin'ska-Sobkowiak R. *Acta Physiol. Plant.*, 2016, vol. 38, 257. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2277-5>.
- Sukiasyan A.R. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 2016, vol. 10(8), pp. 413–416.
- Perel'man A.I., Kasimov N.S. *Geokhimiya landshafta*. [Geochemistry of the landscape]. Moscow, 1999, 768 p. (in Russ.).

* Corresponding author.

22. *Gigiyenicheskiye normativy 2.1.7.2511-09. Oriyentirovochno dopustimyye kontsentratsii (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve.* [Hygienic standards 2.1.7.2511-09. Approximately permissible concentrations (APC) of chemical substances in soil]. Moscow, 2009, 11 p. (in Russ.).
23. Koval'skiy V.V. *Trudy Biogeokhimicheskoy laboratorii*, 1991, vol. 22, pp. 5–24. (in Russ.).
24. Kabata-Pendias A., Motowicka-Terelak T., Piotrowska M., Terelak H., Witek T. *Ocena Stopnia Zanieczyszczenia Gleb i Roslin Metalami Ciezкими i Siark.* Ramowe Wytyczne Dla Rolnictwa, IUNG. Poland, Puławy, 1993, 23 p.
25. Feshchenko V.P. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, no. 10 (120), pp. 33–36. (in Russ.).
26. Golov V.I., Samokhvalova O.S., Anan'yeva E.V., Timofeyev A.N. *Vestnik KrasGAU*, 2007, no. 2, pp. 59–62. (in Russ.).
27. Zaytsev G.N. *Matematika v eksperimental'noy botanike.* [Mathematics in experimental botany]. Moscow, 1990, 296 p. (in Russ.).
28. *Khimiya tyazhelykh metallov, mysh'yaka i molibdena v pochvakh* [Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils], ed. N.G. Zyrin. Moscow, 1985, 300 p. (in Russ.).
29. Ghelich S., Zarinkamar F., Soltani B.M., Niknam V. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, vol. 21, pp. 14091–14098.

Received July 30, 2024

Revised November 27, 2025

Accepted November 27, 2025

Сведения об авторах

Пузанов Александр Васильевич – доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по научной работе, puzanov@iwep.ru

Бабошкина Светлана Вадимовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии, svetlana@iwep.ru

Балыкин Сергей Николаевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии, balykins@rambler.ru

Салтыков Алексей Владимирович – научный сотрудник лаборатории биогеохимии, saltykovav@yandex.ru

Рождественская Тамара Анатольевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории биогеохимии, rtamara@iwep.ru

Трошкова Ирина Александровна – младший научный сотрудник лаборатории биогеохимии, egorka_iren@mail.ru

Information about authors

Puzanov Alexander Vasilyevich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Deputy Director for Research, puzanov@iwep.ru

Baboshkina Svetlana Vadimovna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Biogeochemistry Laboratory, svetlana@iwep.ru

Balykin Sergey Nikolaevich – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Biogeochemistry Laboratory, balykins@rambler.ru

Saltykov Aleksey Vladimirovich – Researcher, Biogeochemistry Laboratory, saltykovav@yandex.ru

Rozhdestvenskaya Tamara Anatolyevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Biogeochemistry Laboratory, rtamara@iwep.ru

Troshkova Irina Aleksandrovna – Junior Researcher, Biogeochemistry Laboratory, egorka_iren@mail.ru