

УДК 631.4

**ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В ПОЧВАХ СТЕПНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ**

© 2022 г. Г.Д. Чимитдоржиева, Е.А. Бодеева, Э.О. Чимитдоржиева

*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6. E-mail: galdorj@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.07.2021. После доработки 14.12.2021. Принята к публикации 13.01.2022.

Представлены результаты экспериментальной работы по исследованию трансформационного потока тяжелых металлов: меди, цинка, никеля и свинца из почвообразующих пород в каштановые почвы, далее в целинный травостой и гумусовые вещества. Почвообразующими породами служат делювиальные и делювиально-пролювиальные отложения, а также отложения песков и галечников, которые в результате их выветривания, перемещения и переотложения обуславливают неодинаковый гранулометрический, минералогический и химический состав пород, отражаясь на составе почвенного покрова. Каштановые почвы характеризуются засушливым климатом, долгим пребыванием в мерзлом состоянии, низкой биопродуктивностью, маломощностью, легким гранулометрическим составом, низкогумусностью. Для экстракции гумусовых веществ использовали метод Гримме. Определение содержания микроэлементов проводили атомно-абсорбционным методом с прямой электротермической атомизацией проб. Тяжелые металлы определялись на атомно – абсорбционном спектрофотометре – AAS-15 Perkin Elmer. Выявлено, что вследствие обедненности пород медью и никелем их в почвах мало, а цинка и свинца больше, что соответственно отражается на растительности и гумусе.

*Ключевые слова:* тяжелые металлы, почвообразующие породы, растительность, каштановые почвы, гумусовые вещества, Западное Забайкалье.

**DOI: 10.24412/1993-3916-2022-2-62-70**

Тяжелые металлы (ТМ), некоторые из которых относятся к микроэлементам (МЭ), содержатся во всех компонентах окружающей среды: в горных породах, почвах, водах, растительных и животных организмах, в воздухе, некоторые из которых являются жизненно важными элементами. К основным источникам загрязнения относятся: аэральное, гидрогенное, с осадками, от сточных вод, с золой, с разливами нефти и т.д., а также литогенное. Поступление их в окружающую среду зависит от многих факторов, в первую очередь поступают высоко кларковые элементы (Водяницкий, 2017). Влияет еще и характер технофильности элементов, в котором Pb занимает 4 место, Cu – 8, Zn – 10 и чуть ниже Ni. Среди средне кларковых элементов свинец наиболее технофилен. Почва – основной источник микроэлементов, поступающих в пищевые цепи, где ТМ участвуют во всех почвенных биохимических процессах накопления, трансформации, переноса веществ и энергии. В почвах нормирование загрязненности почв основано на концепции ПДК и на токсикологическом подходе. Однако количество ТМ в почвах зависит от их содержания в подстилающих горных породах, которые в свою очередь определяются наличием в них минералов-носителей и минералов-концентраторов. По современной классификации значимости ТМ для живых организмов элементы определяются на жизненно необходимые – Cu, Zn; условно необходимыми – Ni и потенциально токсичными – Pb (Ребров, Громова, 2008). Поэтому экологическому контролю должны подлежать как физиологически значимые, так и другие, потенциально токсичные, микроэлементы (Gong et al., 2019).

Большое экологическое значение имеют потенциально токсичные и малоизученные микроэлементы, которые также участвуют в биологическом круговороте – в обмене организмов с окружающей средой (Одум, 1986). Известно, что ТМ в почвах снижают биологическую активность (Yang et al., 2006; Терехова, 2021). Различные виды растений характеризуются избирательной способностью в накоплении ТМ, что обусловлено их биологическими особенностями (Кальницкий, 1987). Накопление ТМ в растительности зависит от количества загрязняющих веществ

и биологических особенностей видов растений (Минкина и др., 2018). Геохимические особенности закрепления и распределения элементов по формам соединений обуславливаются буферной способностью почв, химическими свойствами самих элементов и сопряженностью с источниками техногенной эмиссии (Минкина и др., 2016). Низкая биологическая продуктивность степных фитоценозов вовлекает микроэлементы в биогенную миграцию надземной фитомассы на 1-2 порядка меньше в сравнении со средним захватом их годовым приростом растительности суши (Кашин, Убугунов, 2020).

В почвах, как первым, так и завершающим звеном в круговороте химических элементов является гумус, который не только аккумулирует энергию и вещества, но и, разлагаясь, высвобождает новые синтезированные органические соединения для питания микроорганизмов и растений. Поведение металлов в почвах (закрепление, перераспределение, высвобождение) является одной из основных актуальных задач при изучении их трансформации из породы в почву, растения и гумусовые вещества. Содержание микроэлементов в растениях и их взаимосвязей с почвенным гумусом как важный фактор функционирования степных экосистем изучен весьма слабо. Отсюда целью работы являлось определить степень накопления Cu, Zn, Ni, Pb в цепи: почвообразующая порода → почвы → растительность (надземная масса, корневая часть) → гумусовые вещества (гуминовые кислоты, фульвокислоты, негидролизующий остаток гумуса (НО)).

### Материалы и методы

Объектами исследований послужили каштановые (*Kastanozems*) почвы (Классификация ..., 2004), которые являясь самыми восточными на территории России, располагаясь в котловинах между гор, занимают предгорно-теневую и центральную наиболее прогреваемую и континентальную части днищ. Следует отметить, что эти почвы подвергаются дефляционным процессам. В настоящее время это негативное явление усугубляется глобальным изменением климата, усиливающим темпы аридизации.

*Почвообразующие породы* в межгорных котловинах и у горных кряжей, обусловленные сложным происхождением представляют большую пестроту четвертичных отложений в виде легких суглинков, супесей и песков различного генезиса.

Дефицит влаги в каштановых почвах является основным фактором, лимитирующим биологическую активность, трансформацию органического вещества и, в конечном итоге, урожай сельскохозяйственных культур. Растительный покров забайкальских степей имеет своеобразную ксерофильность, что видно по широкому распространению растений-подушек, растений-куринок, проникновению арктоальпийских видов (астра альпийская, эдельвейс сибирский и др.), наряду с сохранившимися доледниковыми реликтами (бересклет священный, ильм низкий и др.). Эдификаторами сухой степи являются полыни (*Artemisia frigida*<sup>1</sup>, *Artemisia gmelinii* и др.), тонконог стройный (*Koeleria cristata*), типчак ленский (*Festuca cristatum*), осока твердоватая (*Carex duriuscula*) и др. Таким образом, под сухостепной растительностью в условиях резко континентального климата под влиянием длительной сезонной мерзлоты и ограниченного количества осадков (180-250 мм/год) формируются каштановые почвы легкого гранулометрического состава. Они характеризуются в регионе наибольшей суммой температур вегетационного периода (1700-1800°C) и наибольшей длиной безморозного периода (106-116 дней), отсюда их считают самыми теплообеспеченными почвами в регионе. Экстрааридность климата способствует формированию здесь ксерофитной растительности, характеризующейся низкорослостью, разреженностью травостоев (проективное покрытие различных сообществ варьирует от 25% до 60%) и низкой биологической продуктивностью. Надземная масса определена методом укоса без разделения растений на виды. Корни учтены методом почвенных монолитов 25 x 25 см на глубине 0-20 см. Органический углерод почв и растений определен на автоматизированном элементном анализаторе CNHS/O Perkin Elmer в лаборатории биохимии почв ИОЭБ СО РАН. Для экстракции гумусовых веществ (ГВ) использовали метод Гримме (Степанова, 1976). Навески почв, не содержащие растительных остатков, подвергали многократной обработке смесью 0.5н NaOH с 0.01 М ЭДТА<sup>2</sup> до обесцвечивания раствора над почвой

<sup>1</sup> Латинские названия растений приводятся по работе С.К. Черепанова (1995).

<sup>2</sup> ЭДТА – этилендиаминтетрауксусная кислота.

после центрифугирования. После того, как извлечение ГВ смесью NaOH и ЭДТА прекращалось, навеску почвы обрабатывали сначала 0.01н. HCl, затем H<sub>2</sub>O<sub>дист.</sub> до получения бесцветного раствора. Экстракты объединяли и доводили до определенного объема. Две трети объема раствора брали для осаждения ГК, которое проводили в течение 24 ч при pH = 1.5-2 и температуре 80°C. После центрифугирования и промывания осадок гуминовых кислот (ГК) растворяли с помощью 0.02н. NaOH. Фильтрат после осаждения ГК, отнесли к группе фульвокислот (ФК). В 200 мл вытяжки по Гримме и отдельно в 100 мл ГК и ФК после выпаривания на водяной бане и озоления осадков смесью H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и HClO<sub>4</sub>, растворения в горячей воде и доведения объема до 100 мл, определяли микроэлементы. В негидролизуемом остатке количество микроэлементов определяли по разнице между их содержанием в гумусовых веществах и суммой элементов в ГК и ФК. Определение содержания микроэлементов проводили в зольном остатке после деструкции органической основы растительных проб в муфеле с постепенным подъемом температуры до 480°C в сертифицированном на техническую компетентность Аналитическом центре Республики Бурятия: Cu, Zn, Ni, Pb – атомно-абсорбционным методом с прямой электротермической атомизацией проб. ТМ определялись на атомно – абсорбционном спектрофотометре – AAS-15 Perkin Elmer (ИОЭБ СО РАН). В почвах определяли валовое содержание микроэлементов, поскольку в почвенно-геохимических исследованиях основная доля информации получается в основном за счет их валовых содержаний. Сбор полевых материалов производили в фазу цветения растений доминантов на пробных площадках 100 x 100 м в соответствии с методическими рекомендациями, основанными на принципах изучения биологического круговорота (Базилевич, 1993). Большой интерес представляет микроэлементный состав не отдельных видов растений, а суммарных фитоценозов с определенной площади. Поэтому для учета продуктивности надземной массы, содержания и выноса ею микроэлементов срезали растения на уровне 1.5-2 см от поверхности почвы с площади 1 м<sup>2</sup> в 4-5-кратной повторности. Одновременно с взятием проб растительности отбирали пробы почв в полиэтиленовые пакеты из корнеобитаемого слоя (0-20 см).

О взаимосвязи элементов в системе «растение – почва» судили по величине коэффициента биологического поглощения (КБП; Добровольский, 2003) – отношения содержания элементов в золе растений к их валовому содержанию в почве. КБП отражает потенциальную биогеохимическую подвижность элементов в почве. Статистическая обработка результатов проведена стандартными методами с использованием программы Microsoft Excel. Парные коэффициенты корреляции рассчитаны между содержаниями микроэлементов: 1) в породе – почве; 2) в почве – растительности (надземная и корневая массы); 3) в почве – гумусовых веществах (гуминовых кислотах, фульвокислотах и негидролизуемом остатке), результаты которых показали прямую значимую связь для всех элементов.

### Результаты и обсуждение

Основу почвенного покрова сухих степей составляют формирующиеся в жестких условиях увлажнения, типичные маломощные каштановые почвы, с содержанием гумуса – 2.2-2.7% (Чимитдоржиева, 2017), супесчаного или легкосуглинистого гранулометрического состава (содержание физической глины 15-23%) со слабой водоудерживающей способностью и низкой влагоемкостью, с кислотностью почв близкой к нейтральной pH = 6.7-6.8, с низкой суммой поглощенных оснований –17-18 мг-экв. на 100 г почвы (табл. 1). Приводим морфологические описания разрезов, сделанных в разных котловинах, из которых дана аналитическая характеристика почв и определены содержания ТМ со статистической обработкой.

*Разрез 4бч.* Республика Бурятия, Удинская котловина, 51° 43' 60" с.ш., 108° 20' 40" в.д., высота 739 м н.у.м., с. Ацагат. Растительность: змеевка растопыренная (*Cleistogenes squarrosa*), житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum*), мятлик кистевидный (*Poa botryoides*), лапчатка бесстебельная (*Potentilla acaulis*), остролодочник остролистный (*Oxytropis oxyphylla*), лук полевой (*Allium odorum*), осока твердовая (*Carex duriuscula*), полынь холодная (*Artemisia frigida*) и карагана алтайская (*Caragana pugnata*). Проективное покрытие 40-50%.

Почвенные горизонты.

А 0-21 см. Буровато-желтая супесь, непрочнокомковатая, сухая, плотная, обильно пронизана корнями, каменистая, переход в нижележащий горизонт неравномерный, неясный по цвету.

В1 21-36 см. Буровато-коричневая супесь, непрочнокомковатая, сухая, пронизана мелкими

корнями, встречаются вкрапления карбонатов, каменистый переход к нижнему горизонту по вскипанию от НС1.

Вк 36-52 см. Буровато-желтая супесь, непрочнокомковатая, каменистая, присутствуют карбонаты в виде белесых пятен, бурно вскипает от НС1, сухая, нижняя сторона структурных отдельностей покрыта белесой карбонатной пропиткой, снизу горизонта крупные рыхлые включения сизо-зеленого цвета.

Ск 52-75 см. Буровато-коричневая супесь, бесструктурная, карбонатные пятна бурно вскипают от НС1, сухая, горизонт подстилают крупные камни скальных пород.

Почвообразующая порода: элювиальные супеси (Четвертичная система, верхнечетвертичные отложения).

**Таблица 1.** Характеристика каштановых почв.

Место закладки почвенных разрезов	Горизонт, глубина, см	Гумус	Азот общий	рН <sub>водн.</sub>	Сумма обменных оснований, мг-моль/экв. на 100 г почвы	Содержание частиц (%) размером < 0.01 мм
		%				
Разрез 4бч Удинская котловина, с. Ацагат	А 0-21	2.6	0.2	6.4	19.1	27.3
	АВ 21-36	1.4	0.1	6.7	18.4	25.9
	Вк 36-82	0.2	–	7.3	17.5*	27.8
	Ск 82-150	–	–	8.3	16.0*	21.7
Разрез 5бч, Иволгинская котловина, с. Тапхар	А 0-21	2.1	0.1	6.8	17.1	22.3
	АВ 21-46	1.1	0.06	7.1	15.9	15.4
	Вк 46-106	0.1	–	8.3	12.0*	15.2
	Ск 106 -150	–	–	8.4	12.0*	15.5
Разрез 6бч, Тугнуйская котловина, с. Мухоршибирь	А1 0-26	2.2	0.2	6.7	18.5	27.5
	АВ 26-44	1.3	0.1	6.9	17.2	21.7
	В 44-70	0.7	–	7.2	13.9	19.3
	Вк 70-88	0.2	–	8.0	16.0*	15.5
	Ск 88-150	0.1	–	8.4	14.0*	15.3

**Примечание к таблице.** 17.5\* – емкость поглощения.

*Разрез 5бч.* Республика Бурятия, Иволгинская падь, п. Тапхар, 51° 43' 60" с.ш., 107° 22' 00" в.д., высота 815 м н.у.м.

Растительность: ковыль Крылова (*Stipa krylovii*), люцерна серповидная (*Medicago falcato*), житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum*), лапчатка бесстебельная (*Potentilla acaulis*), гетеропаппус алтайский (*Heteropappus altaicus*), тонконог гребенчатый (*Koeleria cristatum*), осока твердоватая (*Carex duriuscula*), вероника седая (*Veronica incana*), полынь холодная (*Artemisia frigida*). Проективное покрытие 40-50%.

Почвенные горизонты.

А 0-21 см. Светло-серая супесь, непрочнокомковатая, плотная, обильно пронизана корнями, сухая, переход в нижележащий горизонт неравномерный по цвету.

В1 21-46 см. Буровато-желтая супесь, бесструктурная, плотная, сухая, встречаются единичные корни. Переход в следующий горизонт по линии вскипания.

Вк 46-106 см. Буровато-желтая супесь, бесструктурная, сухая, плотная, встречаются белесые карбонатные пятна, вскипающие от НС1, присутствуют единичные корни, переход в горизонт С по интенсивности вскипания постепенный.

Ск 106-148 см. Буровато-желтая супесь, бесструктурная, сухая, плотная, встречаются белесые карбонатные пятна, вскипает менее интенсивно, чем вышележащий горизонт.

Почвообразующая порода: пролювиальные песчаные отложения (четвертичная система, ниже- и среднечетвертичные отложения).

*Разрез 6бч.* Республика Бурятия, Тугнуйская котловина, 51° 10' 890" с.ш., 108° 02' 210" в.д.,

высота 758.3 м н.у.м.

Растительность: ковыль Крылова (*Stipa krylovii*), житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum*), лапчатка бесстебельная (*Potentilla acaulis*), марь остистая (*Chenopodium cristatum*), гетеропаппус алтайский (*Heteropappus altaicus*), тонконог гребенчатый (*Koeleria cristata*), змеевка растопыренная (*Cleistogenes squarrosa*), осока твердоватая (*Carex duriuscula*), вероника седая (*Veronica incana*), полынь холодная (*Artemisia frigida*). Проективное покрытие 40-50%.

Почвенные горизонты.

A1 0-26 см. Буровато-коричневатый (каштановый) легкий суглинок, непрочнокомковатый, уплотнен, обильно пронизан корнями растений, от НС1 не вскипает, переход выделяется по цвету неравномерный.

AB 26-34 см. Светло-коричневато-буроватый легкий суглинок, непрочнокомковатый, уплотнен, имеются включения корней, не вскипает от НС1, переход по цвету, плотности и структуре.

B 34-60 см. Бурая супесь, бесструктурная, средней плотности, имеются включения корней, не вскипает от НС1, переход в следующий горизонт по линии вскипания.

Bк 60-78 см. Буровато-белесоватая супесь, бесструктурная, уплотнена, встречаются единичные включения корней, бурно вскипает от НС1, переход в следующий горизонт по цвету и плотности.

Ск 78-150 см. Белесая супесь, бесструктурная, уплотнена, встречаются единичные включения корней, бурно вскипает от НС1.

Почвообразующая порода: пролювиально-делювиальные отложения (юрская система, тугнуйская свита, средний отдел).

В почвообразующих породах меди, цинка и никеля содержатся в количествах, меньших их Кларка (20, 50 и 40 мг/кг соответственно), что объясняется тем, что они состоят главным образом из кварца (70-75%), характеризующегося наименьшей концентрацией рассеянных элементов. Тогда как количество свинца гораздо выше кларка (10 мг/кг; табл. 2), так как породы обогащены этим металлом.

*ТМ в почвах.* Известно, что унаследованный почвами от породы количественный состав МЭ претерпевает значительные изменения под совокупным воздействием всех факторов почвообразования (Мотузова, 2003). Трансформация меди из пород в органогенные горизонты почв значительна (табл. 2), где и связь высока ( $r = 0.9$ ), однако она ниже значений ПДК (55 мг/кг).

Халькофильный цинк как важный элемент клеток, участвует в биохимических процессах, в избыточном количестве выступает как токсичный элемент и относится к 1 классу опасности. Для цинка характерно осаждение в виде сульфидов и в комплексе с органическими веществами, содержащими О и N группами. В каштановых почвах вследствие обедненности пород цинком, его содержание ниже ПДК (100 мг/кг). Установлена тесная корреляционная связь в почвах с гранулометрическим составом и количеством элемента в породе  $r = 0.9$ .

Тесна связь никеля в почве и породе,  $r = 0.8$ . Ка (коэффициент аккумуляции) Ni составил 1.1-1.7 в каштановых почвах, что свидетельствует о биогенном его накоплении, по шкале он относится к условно необходимому элементу для растений.

Почвообразующие породы обогащены свинцом – 22.9, и отмечена зависимость его количества в почвах от их гранулометрического состава  $r = 0.54$ . Свинец – высокотоксичный элемент, относящийся к 1 классу опасности. Он быстро связывается почвенными частицами, преимущественно органическими (Водяницкий, 2017). Несмотря на то что в почвенном органическом веществе много карбоксильных групп, свинец хелатируется функциональными группами ароматических колец, формируя бидентантные комплексы (Мотузова, 2003; Manseau et al., 1996; Manseau et al., 2002). Известно также, что изучаемые все 4 элемента образуют внутрисферные комплексы с органическими соединениями (Xia et al., 1997a, 1997b).

Значительная часть Си в каштановых почвах связана с их минеральной частью, а Zn в них равномерно распределен в гумусовых веществах и минеральной основе. Уровень концентрации Рв в минеральной части почв значителен – 61-65%. Это объясняется тем, что Рв является металлом с переменной валентностью (+2 и +3), которая позволяет ему более активно вести себя в минеральной среде. Итак, в каштановых почвах свинец, как медь и никель в большей степени связан с минеральной частью почв в отличие от цинка.

*Микроэлементы в растительности.* Являясь важной составной частью живого вещества, растительность участвует в процессах миграции и превращениях химических элементов на поверхности Земли. Биопродуктивность пастбищ на каштановых почвах Западного Забайкалья низкая, с широким диапазоном отношения надземной фитомассы к подземной. А из почв в растения трансформируются элементы в разных количествах, но одинаково мало в надземную массу целинного разнотравья вследствие наличия барьерности. Коэффициент корреляции между содержанием меди в органогенном слое почв и количеством ее в надземной массе травяной растительности в каштановых почвах – 0.82. В корневой массе медь накапливается более интенсивно и находится в зависимости от содержания ее в почвах.

Цинк в растениях найден в количестве 37 мг/кг, однако он почти равномерно распределен по надземной и корневой массам (табл. 2), что ниже значений ПДК (100 мг/кг).

Никель, наряду с Cu и Zn, выступает как элемент, необходимый растительному организму, который в надземной массе трав сухих степей составляет 0.29-0.42 мг/кг. Содержание Ni в растениях коррелирует с его количеством в почве ( $r = 0.96$ ), также тесна связь между содержанием Ni в почве и в золе растений ( $r = 0.93$ ). В корнях Ni накапливается более интенсивно и находится в прямой связи с его содержанием в почве,  $r = 0.95$ , в золе корней –  $r = 0.97$ . Количество Ni в фитоценозах ниже средней концентрации в растительности континентов – 2.0 мг/кг (Добровольский, 2003) и максимально допустимого (3 мг/кг) по СанПин (Гигиенические ..., 1997). Содержание его можно оценить как дефицитное – менее 2 мг/кг (Kabata-Pendias, 2011). КБП никеля находится в пределах 0.3-0.4 в разнотравье сухих степей, в корнях – 0.6-0.9 соответственно, т.е. он является элементом среднего захвата.

Количество Pb в надземной массе трав – 0.5-0.7 мг/кг, что ниже средней концентрации в растительности континентов – 1.25 мг/кг (Добровольский, 2003) и находится в пределах нормальных концентраций – 0.1-5.0 мг/кг (Минеев, 1988). Таким образом, Pb, несмотря на его значительное содержание в органогенном слое почв, вследствие низкого его биологического поглощения, не накапливается в растениях. Корреляция между количеством Pb в почвах и в надземной фитомассе средняя ( $r = 0.57$ ). Поступление ограниченного количества свинца в надземную часть объясняется избирательной способностью растений и токсичностью металла.

Итак, по степени биологического поглощения из почвы растительностью Zn и Cu относятся к группе с высокой, а Ni, Pb – с низкой интенсивностью, несмотря на это выявлен дефицит первых элементов в растительности сухих степей.

**Таблица 2.** Тяжелые металлы в породе, почве, растительности и гумусовых веществах сухих степей Забайкалья.

Почво-образующая порода	Почвенный слой 0-20 см	Растительность		Гумусовые вещества			
		Корни	Надземная часть	Всего	ГК	ФК	НО
Медь, мг/кг							
10.5±1.28	13.2±4.02	7.03±2.49	2.77±1.14	4.83±1.55	1.43±0.66	2.1±0.53	1.3±0.44
Цинк, мг/кг							
31.3±5.93	52.3±4.35	19.77±1.64	17.20±0.56	24.8±1.23	6.33±0.69	7.63±0.18	10.87±1.80
Никель, мг/кг							
18.3±4.06	24.87±3.67	1.67±0.15	0.3±0.04	10.10±1.55	3.10±0.46	3.63±0.41	3.53±0.76
Свинец, мг/кг							
22.87±4.36	32.1±0.90	1.67±0.11	0.6±0.07	10.93±0.58	3.27±0.22	4.6±0.28	3.40±0.12

*МЭ в гумусовых веществах.* При деструкции растений под влиянием микробиоценоза в почвах образуются гумусовые вещества, которые при взаимодействии с почвенными минеральными веществами составляют разные соединения и группы ГК, ФК и НО углерода. ГВ химически очень активны вследствие содержания карбоксильных, карбонильных, амидных, метильных, кетонных и

т.д. групп, в силу которых захватываются ТМ. Проанализирована степень захвата меди, цинка, никеля и свинца из почвы в целом ГВ, а также отдельными группами: ГК, ФК и НО. Заметна та же зависимость содержания анализируемых металлов в гумусе, следуя закономерности содержания как в породе → почвах → растительности. Большой процент связи с ГВ на каштановых почвах обнаружен у цинка – 47.4%, чуть меньше у никеля – 40.6%, свинца – 36% и меньше остальных элементов меди – 34.6%. Поскольку растительность содержит небольшое количество меди, то и в ГВ ее мало. Из собственно ГВ более активны ФК, которые связывают из почвы: цинк до 17%, свинец до 18%, никель до 19%. Таким образом, цинк, свинец и никель активно захватывается ГК. Вследствие большей емкости поглощения молекул гуминовых кислот происходит лучшее связывание с ними цинка, в результате чего образуются, по-видимому, труднорастворимые гуматы Zn (Веригина, Журавлева, 1962).

Из ТМ медь в небольшой степени реагирует с отдельными гумусовыми веществами. Однако цинк, находится в сравнительно большем количестве – 52.3 мг/кг (табл. 2) в гумусовом горизонте почвы, по сравнению с остальными изучаемыми элементами. Соответственно его значительно больше и в растительности – 70.6 мг/кг и в гумусовых веществах в целом – 24.8 мг/кг, также как и по группам: в ГК – 6.33 мг/кг, в ФК – 7.63 мг/кг, в НО – 10.87 мг/кг. Из изучаемых элементов более активным оказался цинк, возможно, это связано со сходством химических свойств Zn и Ca, поскольку в почвенно-поглощающем комплексе каштановых почв последнего мало.

Таким образом, выявлена прямая очень тесная корреляционная связь  $r = 0.71-0.99$  между переходом микроэлементов из почвообразующей породы в органогенные слои почв, далее в растительность и гумусовые вещества.

Почвенные ГВ способны образовывать комплексы с ионами свинца. При этом поглощение Pb полностью или частично происходит за счет вытеснения других ионов. В свою очередь, связанный с ГВ металл может быть полностью или частично вытеснен по механизму ионного обмена. Свинец обнаружен в гумусе в основном в составе ФК, поскольку они обладают большей дисперсностью и значительным количеством функциональных групп, чем ГК.

Способность к комплексообразованию у ФК выше, чем у ГК, достигая 43-63%, в НО – 26-27% и на ГК приходится всего 11-30% от его общего количества в гумусе.

Поступление микроэлементов в целинный травостой находится в большей зависимости от их содержания в породах и почвах, свойств химических элементов, от их биофильности и избирательных механизмов фитоценоза, от барьерных способностей корней. В растительности накапливаются преимущественно биофильные элементы: медь – до 53.2%, цинк – до 37.7% из количества, содержащегося в почвах, меньше всего – условно биофильный никель (1.2%) и токсичный свинец (1.9%) от количества, содержащегося в почве.

Изучаемые почвы сухих степей Забайкалья обеднены медью вследствие невысокого их количества в подстилающих почвообразующих породах легкого гранулометрического состава, отсюда ее мало в растительности. Цинка в породах выше кларка, но меньше ПДК, однако его больше накапливается в растительности и отсюда – в гумусовых веществах, где проявляется его биофильность и аналогия с кальцием, когда ощущается в почве его недостаток. Он активен в связи с гумусовыми веществами, в отличие от меди. Такая же реакционная активность наблюдается в захвате гумусовыми веществами никеля и свинца, где, по-видимому, сказываются химические свойства этих элементов, как способность к ионному обмену, комплексообразованию и т.д. Отсюда следует, что содержания изучаемых элементов в почвах находятся в связи с их количеством в породах, КБП растений, а также с захватом их гумусовыми веществами. В связи с особенностями химической структуры молекулы ГК (незначительная степень бензоидности, развитая боковая углеродная цепь с низкими кислыми функциональными группами; Чимитдоржиева, Цыбикова, 2018) не обеспечиваются высокими адсорбционными способностями почвы, вследствие чего изучаемые микроэлементы в незначительной степени связаны с гумусовыми веществами.

Каштановые почвы степных экосистем Западного Забайкалья характеризуются в сравнении с кларками нормальным содержанием Zn, повышенным – Pb (в 2.9 раза), пониженным – Ni (в 1.49 раза) и Cu (в 1.2 раза), что определяется преобладанием в качестве коренных пород гранитоидов – пород кислой группы.

### Выводы

1. Подстилающие почвообразующие породы легкого гранулометрического состава, обеднены Cu, Zn, Ni и обогащены Pb, количество которого превышает кларк литосферы.
2. Содержание микроэлементов в органогенном горизонте каштановых почв низкое, кроме свинца (выше ПДК). Металлы в основном связаны с минеральной частью: Cu – 56-66%, Ni – 51-61%, Pb – 61-66% от их валового количества, а Zn почти равномерно распределен в гумусовых веществах и минеральной основе (43-60%).
3. Каштановые почвы степных экосистем Западного Забайкалья характеризуются в сравнении с кларками нормальным содержанием Zn, повышенным – Pb в 2.9, пониженным – Ni в 1.4, Cu в 1.2 раза, что определяется преобладанием в качестве коренных пород гранитоидов – пород кислой группы.
4. Выявлено, что Zn оказался элементом наибольшего биологического поглощения растительностью в сухих степях Западного Забайкалья.
5. Гумусовые вещества почв связывают незначительное количество микроэлементов, которое зависит от содержания гумуса, от его группового и фракционного составов и химических свойств каждого элемента.
6. В гумусовых веществах микроэлементы (Cu, Ni, Pb) преимущественно связываются ФК, тогда как цинк адсорбирован в первую очередь ГК и гуминами.
7. Гумусовые вещества почв различаются по интенсивности захвата микроэлементов в следующем убывающем порядке: Cu и Pb – ФК → ГК → НО; Ni – ФК → НО → ГК; Zn – НО → ГК → ФК.

*Финансирование.* Работа выполнена по теме Госзадания № 121030100228-4 «Эволюционно-генетические, биогеохимические и продукционные функции почв Байкальского региона как компонента биосферы, оценка их ресурсного потенциала и разработка технологий рационального использования и охраны» 2021-2022.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Базилевич Н.И. 1993. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука. 293 с.
- Веригина К.В., Журавлева Е.Г. 1962. Микроэлементы в почвах и породах Ярославской области. М.: Изд-во АН СССР. С. 51-85.
- Водяницкий Ю.Н. 2017. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами. М.: Изд МГУ. 192 с.
- Добровольский В.В. 2003. Основы биогеохимии. М.: Академия. 400 с.
- Кальницкий Б.Д. 1987. Минеральные вещества в кормлении животных. Л.: Наука. 260 с.
- Кашин В.К., Убугунов Л.Л. 2020. Микроэлементный состав почв и степных фитоценозов Западного Забайкалья // Аридные экосистемы. Т. 26. № 2 (83). С. 86-95. [Kashin V.K., Ubugunov L.L. 2020. Microelementary Composition of Soils and Steppe Phytocoenoses in the Western Transbaikal Region // Arid Ecosystems. Vol. 10. No. 2. P. 161-170.]
- Классификация и диагностика почв России. 2004 / Ред. Л.Л. Шишов. М. Смоленск: Ойкумена. 342 с.
- Минеев В.Г. 1988. Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ. 285 с.
- Минкина Т.М., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А., Назаренко О.Г., Максимов А.Ю., Замулина И.В., Бурачевская М.В., Сушкова С.Н. 2018. Аккумуляция тяжелых металлов разнотравной степной растительностью по данным многолетнего мониторинга // Аридные экосистемы. Т. 24. № 3 (76). С. 43-55. [Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Nazarenko O.G., Maksimov A.Yu., Zamulina I.V., Burachevskaya M.V., Sushkova S.N. 2018. Accumulation of Heavy Metals by Forb Steppe Vegetation According to Long-Term Monitoring Data // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 3. P. 190-202.]
- Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Манджиева С.С., Козлова М.Н. 2016. Особенности содержания и подвижность тяжелых металлов в почвах поймы реки Дон // Аридные экосистемы. Т. 22. № 1 (66). С. 86-98. [Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Mandzhieva S.S., Kozlova M.N. 2016. Specific Features of Content and Mobility of Heavy Metals in Soils of Floodplain of the Don River // Arid Ecosystems. Vol. 6. No. 1. P. 70-79.]
- Мотузова Г.В. 2003. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М. 168 с.
- Одум Ю. 1986. Экология. Т. 1. М.: Мир. 328 с.
- Ребров В.Г., Громова О.А. 2008. Витамины, макро- и микроэлементы. М.: ГЭОТАР Медиа. 960 с.

- Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. 1997. *Санитарные правила и нормы* СанПиН 2.1.7.573-96. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России. 54 с.
- Степанова М.Д. 1976. Микроэлементы в органическом веществе почв. Новосибирск: Наука. 106 с.
- Терехова В.А., Прудникова Е.В., Кулачкова С.А., Горленко М.В., Учанов П.В., Сушко С.В., Ананьева Н.Д. 2021. Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв разной гумусированности при внесении тяжелых металлов и углеродсодержащих препаратов // Почвоведение. № 3. С. 372-384. [Terekhova V.A., Prudnikova E.V., Kulachkova S.A., Gorlenko M.V., Uchanov P.V., Sushko S.V., Ananyeva N.D. 2021. Microbiological Indicators of Heavy Metals and Carbon-Containing Preparations Applied to Agrosoddy-Podzolic Soils Differing in Humus Content // Eurasian Soil Science. Vol. 54. No. 3. P. 448-458.]
- Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). Спб.: Мир и семья. 992 с.
- Чимитдоржиева Э.О. 2017. Запасы углерода в постагрогенных сухостепных почвах Западного Забайкалья // Аридные экосистемы. Т. 23. № 3 (72). С. 59-65. [Chimitdorzhieva E.O. 2017. Carbon reserves in postagrogenic dry steppe soils of Western Transbaikalia // Arid Ecosystems. Vol. 7. No. 3. P. 178-183.]
- Чимитдоржиева Г.Д., Цыбикова Э.В. 2018. Своеобразие каштановых почв южных котловин Сибири // Аридные экосистемы. Т. 24. № 4 (77). С. 29-35. [Chimitdorzhieva G.D., Tsybikova E.V. 2018. Specific Features of Chestnut Soils in the Southern Basins of Siberia // Arid Ecosystems. Vol. 8. No. 4. P. 254-259.]
- Gong Q., Chen P., Shi R., Gao Y., Zheng S.A., Xu Y., Shao C., Zheng X. 2019. Health Assessment of Trace Metal Concentrations in Organic Fertilizer in Northern China // International Journal of Environmental Research and Public Health. Vol. 16. No. 6. P. 1031.
- Kabata-Pendias A. 2011. Trace elements in soil and plants. Boca Raton, London, N.Y.: CRC Press. 450 p.
- Manceau A., Boisset M.C., Sarret G., Hazemann J.L., Mench M., Cambier P., Prost R. 1996. Direct determination of lead speciation in contaminated soils by EXAFS spectroscopy // Environmental Science & Technology. Vol. 30. P. 1540-1552.
- Manceau A., Marcus M.A., Tamura N. 2002. Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques // Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. Washington, DC. Vol. 49. P. 341-428.
- Xia K., Bleam W., Helmke P.A. 1997a. Studies of the nature of Cu<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> binding sites in soil humic substances using X-ray absorption spectroscopy // Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 61. P. 2211-2221.
- Xia K., Bleam W., Helmke P.A. 1997b. Studies of the nature of binding of first row transition elements bound to aquatic and soil humic substances using X-ray absorption spectroscopy // Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol. 61. P. 2223-2235.
- Yang Z., Liu S., Zheng D., Feng S. 2006. Effects of cadmium, zinc and lead on soil enzyme activities // Journal of Environmental Sciences. Vol. 18. No. 6. P. 1135-1141.