

УДК 631.416.9(571.15)

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В МЕЖГОРНО-КОТЛОВИННЫХ АГРОЛАНДШАФТАХ ГОРНОГО АЛТАЯ¹

© 2021 г. О. А. Ельчиновича¹, *, А. В. Пузанов¹, Т. А. Рождественская¹, С. Я. Двуреченская¹¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038 Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия

*E-mail: eoa59@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020 г.

После доработки 28.01.2021 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Выявлены особенности накопления и распределения микроэлементов в системе почва–сельскохозяйственные растения в межгорных котловинах Горного Алтая. Содержание марганца, меди и цинка в почвенном покрове убывало от черноземов обыкновенных и темно-каштановых почв среднегорных котловин к каштановым и светло-каштановым почвам высокогорных. Величины коэффициентов радиальной дифференциации марганца, меди и цинка в гумусовом горизонте (<1) свидетельствовали о биогеоном накоплении и аккумулятивном распределении этих элементов как в каштановых почвах, так и черноземах обыкновенных. Коэффициент радиальной дифференциации молибдена варьировал в широких пределах: от 0.6 до 3.2. Его значительная величина в черноземе обыкновенном Уймонской котловины (2.3–3.2) в горизонте Вк обусловлена наличием карбонатного биогеохимического барьера. На содержание и характер профильного распределения биогеоном элементов влиял комплекс почвенных факторов: чем тяжелее был гранулометрический состав, больше содержание органического вещества, карбонатов, емкость катионного обмена, тем больше валовое содержание исследованных микроэлементов. Большая часть поглощенных растениями (овсом и луговыми травами) марганца, меди и цинка локализовалась в корневой системе и меньшая – транспортировалась в надземные органы. Для марганца, меди и цинка характерным был барьерный тип накопления с коэффициентом корневого барьера >1. Интенсивность накопления молибдена в корнях была меньше по сравнению с надземными органами ($K_{кб} < 1$). Сопряженное исследование почвы и растений показало, что содержание в почвах марганца (в почвах среднегорных котловин), меди и цинка было больше кларка, но меньше ПДК и ОДК, а превышение максимально допустимого уровня для кормов содержания марганца и молибдена в растениях агроландшафтов межгорных котловин Горного Алтая было незначительным и носило единичный и локальный характер. Концентрации марганца, меди и цинка в пастбищной траве и сене были больше, чем в надземной массе овса.

Ключевые слова: высокогорные и среднегорные котловины, почвы, надземная масса, корни, микроэлементы, внутрипрофильное распределение, коэффициент радиальной дифференциации, коэффициент корневого барьера.

DOI: 10.31857/S0002188121060041

ВВЕДЕНИЕ

Межгорные степные котловины – характерный элемент рельефа Горного Алтая. Они относятся к внутригорным эрозионно-тектоническим впадинам и понижениям и располагаются на высоте от 500 до 2500 м над уровнем моря. В центральной и преимущественно юго-восточной части на высоте 1100 м располагаются высокогорные сухие котловины, на высоте 500–1100 м – среднегорные. Общей особенностью климата этих территорий является его континентальность и сухость [1].

В настоящее время межгорные котловины являются центрами хозяйственной деятельности, где традиционное землепользование сочетается с элементами инновационных технологий, в т.ч. и ресурсосберегающих. Во второй половине прошлого столетия почти вся территория среднегорных котловин была распахана. Основной культурой является овес, возделываемый на сено, который убирают в фазе молочной спелости. Климатические условия Уймонской и Абайской котловин позволяют возделывать скороспелые сорта овса и яровой пшеницы на зерно.

Во второй половине прошлого века появился термин “тяжелые металлы” (ТМ), который сразу

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (№ госрегистрации 121031200177-1).

же приобрел негативное звучание. С этим термином связано представление о чем-то токсичном, опасном для живых организмов. Представление об обязательной токсичности ТМ, по мнению Алексева [2], является заблуждением, т.к. в эту же группу попадают медь, цинк, молибден, кобальт, марганец, железо, т.е. те элементы, большое биологическое значение которых давно обнаружено и доказано. Некоторые из них в сельском хозяйстве получили название микроэлементов, что было связано с теми концентрациями, в которых они необходимы живым организмам. В настоящей работе обсуждаются проблемы содержания марганца, меди, цинка и молибдена как микроэлементов, но количество которых в почве и растениях регламентируется нормативными документами.

Микроэлементный состав почв межгорных котловин ранее был изучен Мальгиным [3], позднее — Балыкиным с соавт. [4–7]. В настоящее время изучение региональных особенностей распределения микроэлементов в компонентах агроландшафтов и их взаимосвязь с биогеохимическими условиями окружающей среды все еще остается весьма актуальным. Такая информация необходима для обоснования возможности производства экологически безопасной сельскохозяйственной продукции или разработки мероприятий по его обеспечению. Цель работы — выявление особенностей накопления и распределения микроэлементов в системе почва—сельскохозяйственные растения в межгорных котловинах Горного Алтая.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были почвы и растительность высокогорных (Чуйской, Курайской) и среднегорных (Канской, Уймонской и Абайской) котловин.

Чуйская котловина находится на высоте 1700–1900 м над уровнем моря. Продолжительность безморозного периода 50–60 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1000–1100 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 10–150 мм, коэффициент увлажнения — 0.1–0.2.

Курайская котловина расположена на высоте 1500–1600 м над уровнем моря. Климат резкоконтинентальный, продолжительность безморозного периода — <50 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1000–1100 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 230–260 мм, коэффициент увлажнения — 0.2–0.3 [8]. Основной фон растительного покрова высокогорных котловин составляют сухостепные растительные формации, под которыми на покровных маломощных карбонатных каменистых суглинках и супесях формируются каштановые почвы.

Канская котловина расположена на высоте 1000–1100 м над уровнем моря. Продолжительность безморозного периода составляет 55–65 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1100–1200 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 330–350 мм, коэффициент увлажнения — 0.5–0.6. В целом климат очень прохладный, засушливый и полусухой [8]. Основной фонд почвенного покрова Канской котловины образуют почвы каштанового и темно-каштанового подтипов и черноземы обыкновенные.

Абайская котловина находится на высоте 1010–1150 м н.у.м. Продолжительность безморозного периода — 60–70 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1200–1310 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков — 400–450 мм, коэффициент увлажнения — 0.6–0.8 [8]. Основу почвенного покрова образуют черноземы обыкновенные.

Уймонская котловина — одно из немногих мест Горного Алтая, имеющая относительно благоприятные агроклиматические и почвенные условия для развития сельского хозяйства. Находится на высоте 1000 м н.у.м. Продолжительность безморозного периода — 75–95 сут. Сумма активных температур ($>10^{\circ}\text{C}$) равна 1450–1500 $^{\circ}\text{C}$. Годовое количество осадков равно 300–350 мм, коэффициент увлажнения — 0.6–0.8 [8]. Почвообразующие породы представлены чехлом лессовидных карбонатных суглинков, иногда достигающих значительной мощности (3–4 м) или же маломощными щебнистыми, как правило, карбонатными суглинками. Природные условия Уймонской котловины способствуют развитию обыкновенных и южных черноземов.

Согласно систематическому списку, разработанному и предложенному сотрудниками Института почвоведения и агрохимии СО РАН [9], почвы исследованной территории относятся к группе почв межгорных котловин и представлены каштановыми и черноземными почвами. При проведении полевых исследований использовали сравнительно-географический метод, позволяющий выявить коррелятивные зависимости между почвами, их свойствами, составом и совокупностью факторов почвообразования. При описании почвенного разреза применяли морфологический метод — изучение почв по внешним признакам, и профилно-генетический — изучение почвы с поверхности на всю глубину последовательно по генетическим горизонтам с последующим сопоставлением их свойств. Пробы почв отбирали по генетическим горизонтам в двойные полиэтиленовые пакеты. Всего было сделано 8 почвенных разрезов и отобрано 28 почвенных проб.

Пробоподготовка почвы на общий анализ заключалась в высушивании почвенных образцов на воздухе, растирании сухой почвы в фарфоровой ступке и пропускании через сито с диаметром отверстий 1 мм. Растительные образцы отбирали в местах, сопряженных почвенному разрезу, с площади 0.25 м² в 3-х повторностях. Надземную массу высушивали и взвешивали. Корни отбирали с этих же площадок на глубину максимального их распространения в виде монолитов размером 0.2 × 0.2 м, промывали их в проточной воде, затем — дистиллированной. Для определения содержания химических элементов рентгено-флуоресцентным методом с использованием синхротронного излучения почву и растения растирали в яшмовой ступке. Для определения содержания гумуса в почвенной пробе предварительно отбирали корни и корешки, растирали в фарфоровой ступке и пропускали через сито с диаметром отверстий 0.25 мм.

Для определения свойств почвы использовали систему химических, физико-химических и других анализов (сравнительно-аналитический метод). Гумус определяли по методу Тюрина, гранулометрический состав — методом пипетки (вариант Качинского с подготовкой почвы к анализу пирофосфатным методом), рН_{H₂O} — потенциометрическим методом, карбонаты — ацидиметрическим методом, емкость катионного обмена — методом Бобко—Аскинази для карбонатных почв. Определение содержания химических элементов в почве и растениях проводили методом РФА СИ (рентгено-флуоресцентный анализ с использованием синхротронного излучения). В работе использовали оборудование ЦКП “СЦСТИ” на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4—ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022 [10]. Пределы обнаружения для проб почв: Mn — 50, Cu, Zn — 3, Mo — 0.35 ppm; для растительных проб: Mn — 10, Cu, Zn — 1, Mo — 0.15 ppm.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенной работы были установлены основные особенности исследованных почв (табл. 1). В межгорных котловинах широко распространены каштановые почвы, где достаточно четко выделяются все 3 подтипа каштановых почв: темно-каштановые, каштановые и светло-каштановые. Общая особенность отложений, на которых формируются каштановые почвы межгорных котловин — высокое содержание скелетных включений (50—80%). Более половины мелкозема приходится на крупные фракции (песчаную, пылеватую) и только 9—15% — на илстую. Легкий гранулометрический состав с высоким содержанием крупнозема и незначительным содержанием тонкодисперсных фракций характерен для всех подтипов

каштановых почв. Содержание илистой фракции — <10%, в составе мелкозема преобладают фракции среднего песка и крупной пыли.

Реакция среды в профиле каштановых почв — щелочная и сильнощелочная. Каштановые почвы отличаются мощными карбонатными горизонтами с высоким содержанием карбонатов. Карбонаты обнаружены с самой поверхности. Для каштановых почв характерно низкое содержание и резкое снижение содержания гумуса вниз по профилю. Содержание гумуса в гумусовом горизонте составляет в темно-каштановых почвах 4.3% под пашней, 5.9 — под сенокосом, в каштановых — 4.7 в светло-каштановых — 2.7%. Качественный состав весьма специфичен для каштанового типа почв и имеет фульватную природу, что обусловлено криоаридными условиями гумусообразования в котловинах [11]. Емкость поглощения, обусловленная интегральным влиянием гумусированности и дисперсности мелкозема, низкая. Показатели агрохимических свойств заметно ухудшаются от темно-каштановых почв к светло-каштановым.

Гранулометрический состав черноземов обыкновенных среднегорных котловин неодинаков и неоднороден по профилю, что связано с разнообразием почвообразующих пород. Он варьирует от супесчаного в верхних горизонтах до средне- и тяжелосуглинистого — в нижних. Преобладают среднесуглинистые, в той или иной степени каменистые почвы. Мелкозем гумусового горизонта этих почв содержит много пыли и песка.

Содержание гумуса в гумусовом горизонте варьирует от 6.8 в Абайской котловине до 9.4% — в Уймонской. В составе гумуса преобладают гуминовые кислоты. Реакция среды в гумусовом горизонте нейтральная или слабощелочная, вниз по профилю она изменяется до явно щелочной. Карбонаты присутствуют с поверхности и содержание их с глубиной увеличивается до значительных величин (до 20%). Емкость обмена в черноземах межгорных котловин наибольшая в гумусовом горизонте и с глубиной снижается. В составе обменных катионов преобладает кальций. Перечисленные особенности оказывают существенное влияние на элементный состав почв.

Исследованные микроэлементы подразделяются на 2 группы: элементы с относительно постоянной концентрацией (Cu, Zn) и элементы с высоким варьированием концентраций в окружающей природной среде (Mn) [11].

Содержание марганца в почвенном покрове исследованной территории Горного Алтая характеризуется убыванием концентрации элемента от почв среднегорных котловин к высокогорным (рис. 1). Наибольшие концентрации обнаружены в почвах Уймонской и Абайской котловин.

Таблица 1. Физико-химические свойства почв котловин

Разрез	Горизонт	Глубина взятия образца, см	Гумус	Ил	Физическая глина	CaCO ₃	ЕКО	рН _{H₂O}
			%			мг-экв/100 г		
Высокогорные котловины								
Чуйская котловина, пастбище, светло-каштановая почва								
P.02-14	Ак	0–9	2.7	7.8	23.5	7.2	17.9	7.9
	Вк	15–25	1.2	6.1	12.6	5.6	15.2	8.4
	Вск	>40	0.3	1.8	4.7	2.8	11.2	7.3
Курайская котловина, пастбище, каштановая почва								
P.01-14	Ак	0–15	4.7	1.3	10.8	4.2	12.7	7.1
	Вк	21–31	2.0	1.1	6.3	5.9	4.2	7.5
Среднегорные котловины								
Канская котловина, пастбище, темно-каштановая почва								
P.03-14	Ак	0–10	5.9	3.5	16.0	3.5	27.3	7.4
	Вк	33–43	1.9	8.7	20.3	8.2	16.7	7.8
Канская котловина, пашня, темно-каштановая почва								
P.04-14	Апах	3–13	4.3	2.7	18.6	3.1	30.9	7.5
	Вк	40–50	1.8	9.8	21.7	10.0	5.7	7.7
Уймонская котловина, пашня, чернозем обыкновенный								
P.05-14	Апах	1–11	9.4	7.2	33.8	3.8	30.7	6.8
	Вк	29–39	5.4	11.6	26.2	8.0	11.5	7.7
	Ск	45–56	3.6	5.1	18.0	19.0	7.7	8.3
Уймонская котловина, естественный сенокос, чернозем обыкновенный								
P.06-14	Ак	3–13	9.1	8.2	30.1	4.3	24.4	7.1
	Вк	16–26	2.1	16.2	41.9	10.6	11.3	8.1
	Ск	45–56	1.1	11.1	11.6	20.3	9.4	9.0
Абайская котловина, пашня, чернозем обыкновенный								
P.03-19	Ак'	0–6	6.8	3.6	28.7	4.8	41.8	7.8
	Ак''	7–13	6.9	4.2	28.9	4.8	33.1	7.8
	АВк	15–25	6.9	14.2	33.1	5.0	25.1	7.8
	Вк	34–45	5.7	13.2	39.6	14.2	20.9	8.1
	Ск	50–60	0.8	17.3	43.1	14.2	9.5	8.0
Абайская котловина, пашня, чернозем обыкновенный								
P.04-19	Ак'	0–10	8.4	7.3	13.3	5.0	30.6	7.5
	Ак''	10–17	8.6	7.2	14.6	4.9	22.1	7.5
	АВк	17–27	8.1	16.0	26.1	6.0	18.3	7.9
	Вк	35–45	5.0	18.2	26.7	19.1	13.0	8.3
	Ск	50–60	0.4	7.8	10.5	18.3	7.3	8.3

Распределение марганца в почвенной толще также неоднородно. Для всех исследованных почв отмечено биогенное накопление элемента. Содержание марганца в гумусово-аккумулятивном горизонте значительно больше, чем в почвообразующей породе. Если содержание марганца в горизонте С не превышает его кларк для почв ми-

ра [12], то в верхних горизонтах отмечены показатели, близкие к ПДК [13]. Миграция марганца вниз по профилю сводится к минимуму в связи с тем, что процессы выщелачивания в нижележащие горизонты ограничены недостаточной обеспеченностью исследуемой зоны влагой, а также содержанием карбонатов с самой поверхности.

Для марганца характерна резко выраженная тенденция к биогенной аккумуляции в гумусовых горизонтах [14]. Биогенное накопление марганца также свойственно почвам юга Западной Сибири [15].

Биогеохимия меди в основных природных компонентах Горного Алтая была изучена ранее Мальгиным [3]. Им было установлено, что большая часть территории Горного Алтая содержит микроэлемента почти в 2 раза больше кларка, рассчитанного для почв СССР [16]. Модальным классом содержания валовой меди является диапазон от 20 до 40 мг/кг. Повышенное содержание валовой меди в почвенном покрове Горного Алтая Мальгин [3] объяснял обогащенностью микроэлементом горных пород, на дериватах которых формируется почвенный покров. Вновь полученная нами информация близка ранее опубликованной. Максимальные концентрации характерны для черноземных почв среднегорных котловин, минимальные — для каштановых почв высокогорных и Канской среднегорной котловины (рис. 2). Вместе с тем содержание меди в каштановых почвах не превышает ОДК [17] для песчаных и супесчаных почв, составляющую 33 мг/кг, и в черноземах обыкновенных — ОДК для суглинистых и глинистых почв с $pH_{KCl} > 5.5$, составляющую 130 мг/кг.

Имеющиеся в литературе данные о влиянии почвообразовательного процесса на внутрипрофильное распределение меди довольно противоречивы. Ряд авторов отмечает ярко выраженную аккумуляцию меди в гумусовом горизонте, другие указывают на равномерное распределение ее по профилю. По данным [18], медь является элементом биогенной аккумуляции. Полученные нами данные подтверждают вышесказанное.

Содержание цинка во всех исследованных почвах превышает кларк [13] и ОДК [17] для песчаных и супесчаных почв, составляющую 55 мг/кг, в почвах легкого гранулометрического состава Чуйской, Курайской и Канской котловин, но находится в пределах ОДК для суглинистых и глинистых почв с $pH_{KCl} > 5.5$, составляющую 220 мг/кг, в почвах Уймонской и Абайской котловин (рис. 3). Полученные результаты вполне согласуются с приведенными ранее данными для каштановых почв Чуйской котловины [19] и черноземов обыкновенных Уймонской котловины [4]. Для цинка характерно ярко выраженное биогенное накопление как в каштановых, так и черноземных почвах.

В отличие от выше рассмотренных элементов, содержание и распределение молибдена даже в однотипных почвах значительно различается (рис. 4). Содержание молибдена в почвах меньше концентрации какого-либо другого необходимого микроэлемента. В каштановых почвах в гумусовом горизонте содержание элемента варьирует

от 1.03 до 1.13 мг/кг, в черноземах обыкновенных — в более широких пределах: от 0.82 до 1.45 мг/кг, что близко к среднему содержанию валового молибдена в почвах Алтайского края (0.8–1.4 мг/кг) [20]. Для почв мира Виноградов [12] определил кларк молибдена в почвах 2 мг/кг. Для внутрипрофильного распределения микроэлемента характерно наибольшее накопление в гумусовом горизонте в каштановой почве Курайской котловины, черноземе обыкновенном Уймонской котловины, в материнской породе — черноземе обыкновенном Абайской котловины. В остальных исследованных почвах максимум содержания молибдена приурочен к горизонту Вк. Данных по внутрипрофильному распределению молибдена в почвах в литературе немного. В работе [21] указывали на возможность накопления микроэлемента в горизонте А, связывая это с тем, что его содержание возрастает по мере увеличения содержания органического вещества. По мнению [22], во всех подтипах черноземов Центрального Черноземья, а также в каштановых и черноземных почвах Алтайского края [20] также наблюдается его биогенная аккумуляция.

Более наглядно процессы перераспределения химических элементов в почвенном профиле характеризует коэффициент радиальной дифференциации (табл. 2) — отношение среднего содержания данного химического элемента в том или ином почвенном горизонте к среднему содержанию его в почвообразующей породе. Этот термин был предложен в 1970-х гг. взамен употреблявшегося ранее термина элювиально-аккумулятивный коэффициент [23]. Показано, что коэффициенты радиальной дифференциации марганца, меди и цинка в гумусовом горизонте > 1 , что еще раз свидетельствует о биогенном их накоплении и аккумулятивном распределении. В горизонте Вк величина коэффициента немного < 1 . Коэффициент радиальной дифференциации молибдена варьирует в более широких пределах: в гумусовом горизонте — от 0.6–0.8 в Абайской котловине до 2.0–2.7 в Уймонской. Значительная величина коэффициента в черноземе обыкновенном Уймонской котловины (2.3–3.2) в горизонте Вк связана с наличием карбонатного биогеохимического барьера.

Изучение содержания микроэлементов в почве, а также сопряженное исследование растений имеет большое значение для решения ряда прикладных агрохимических и агроэкологических задач. Для марганца, меди и цинка характерно максимальное накопление в корнях как полевых культур, так и растений сенокосов и пастбищ. Содержание вышеперечисленных микроэлементов в надземной массе значительно меньше. Оно находится в пределах нормальных концентраций (пределах нормальной регуляции) [24] и максимально допустимого уровня для кормов [25]: для

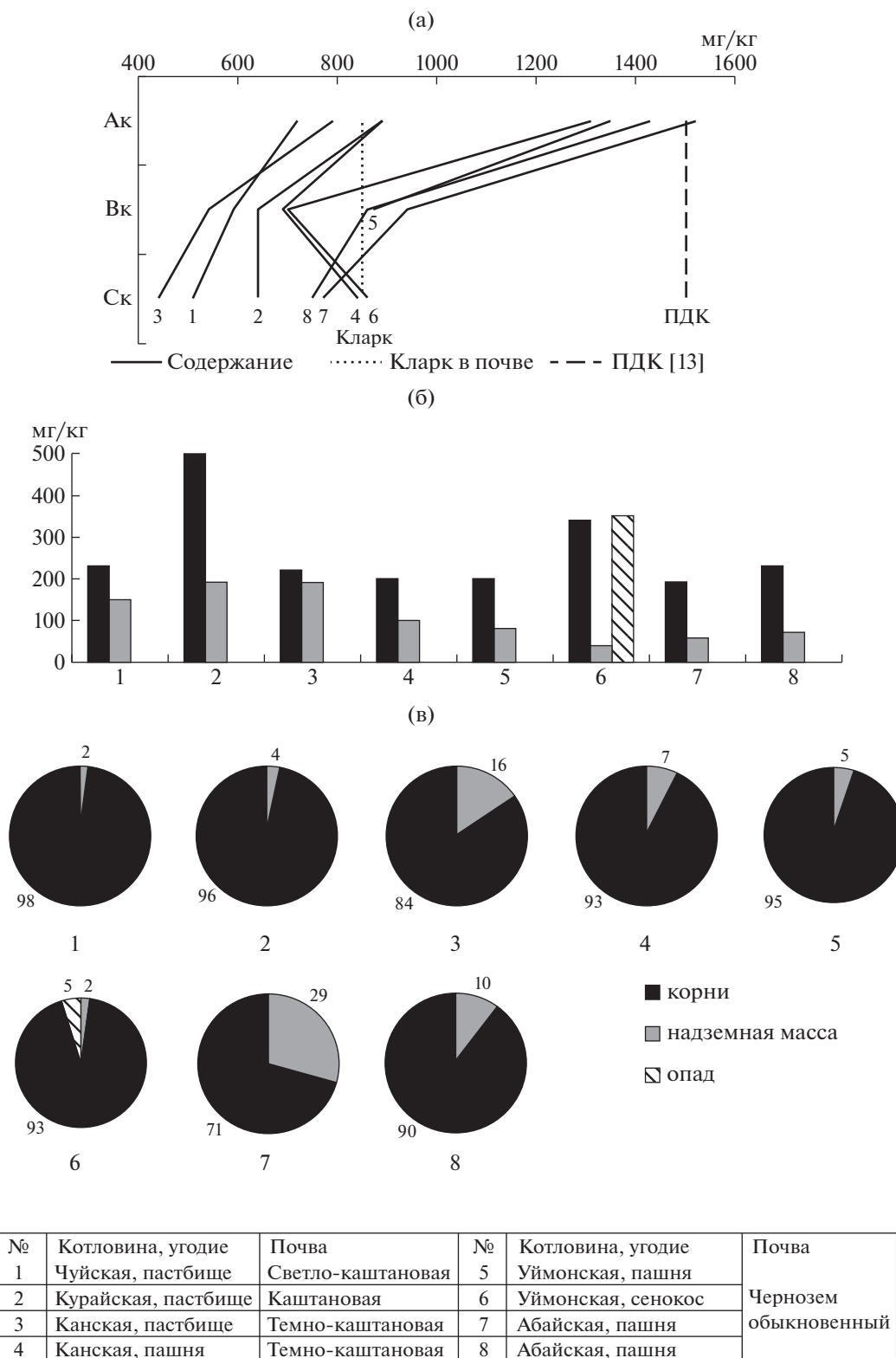
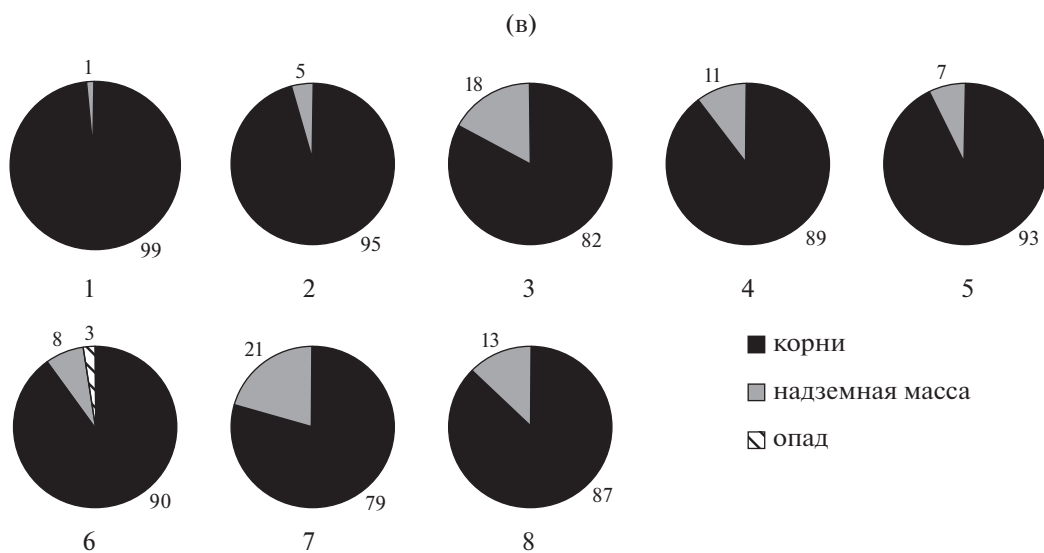
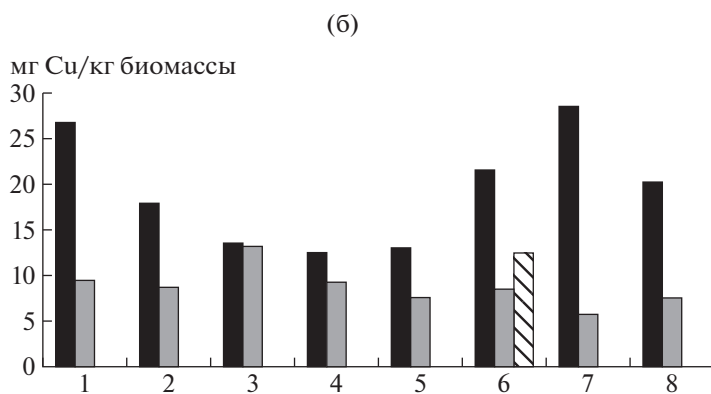
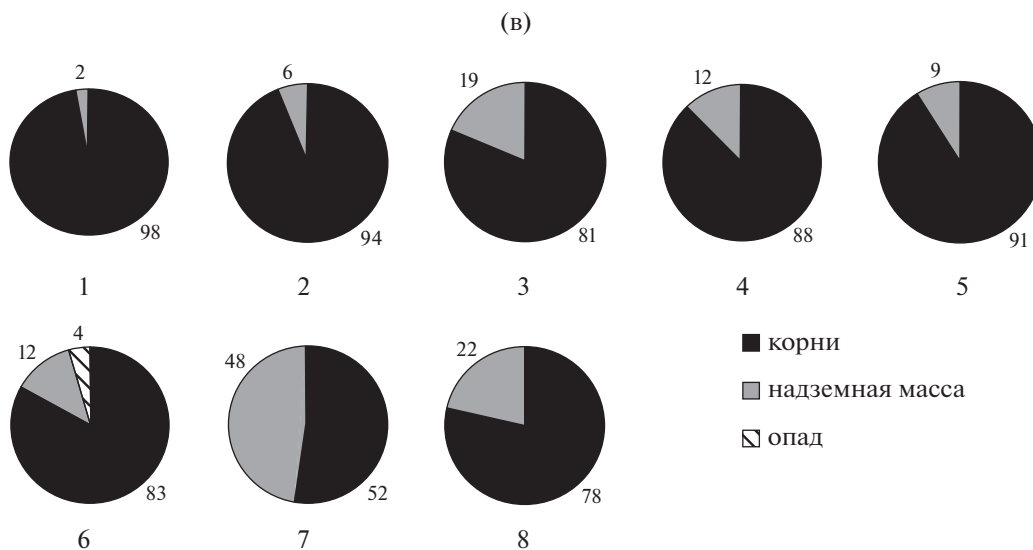
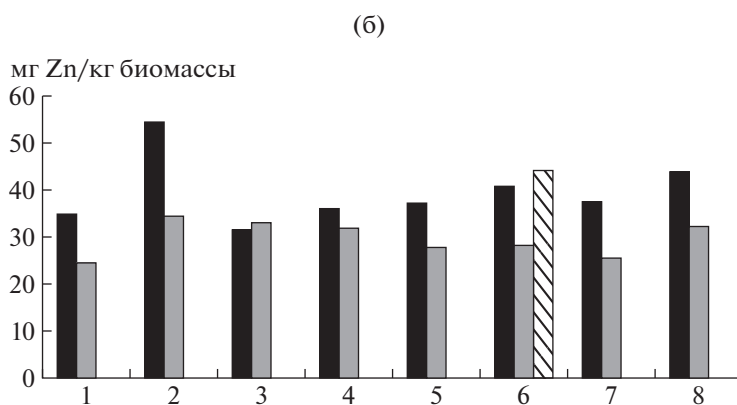
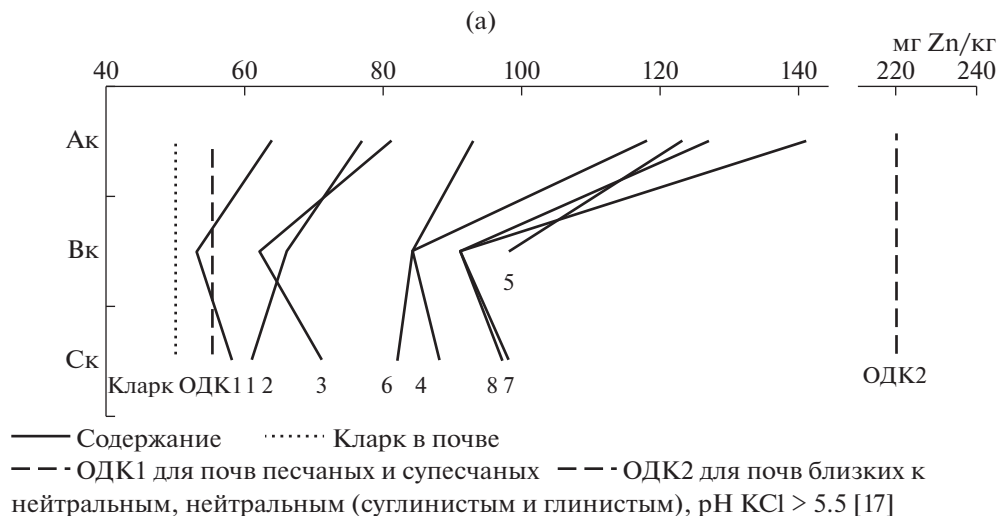


Рис. 1. Распределение марганца в системе почва–растение: (а) – содержание и распределение элемента в почве, (б) – содержание элемента в растительности, (в) – распределение запасов элемента в растительности. То же на рис. 2–4.



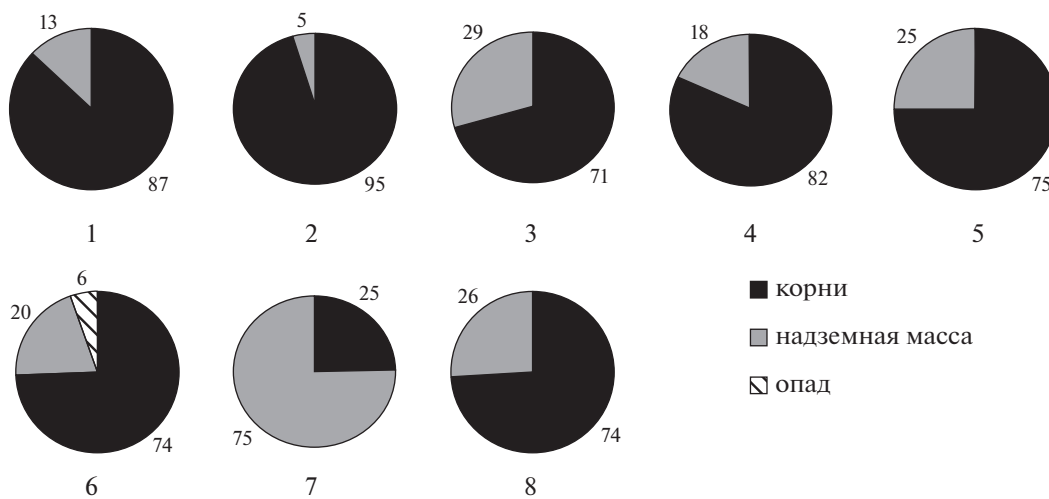
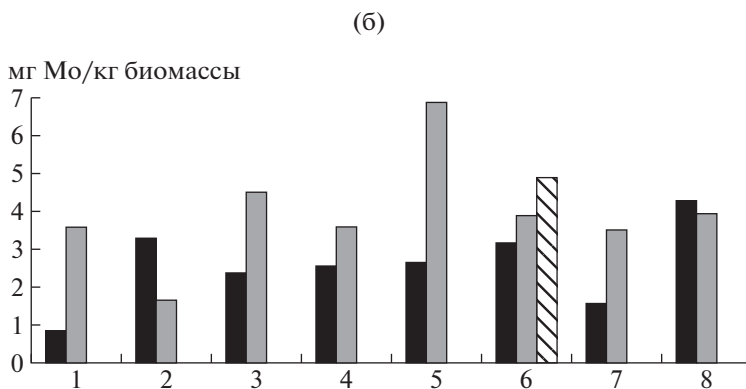
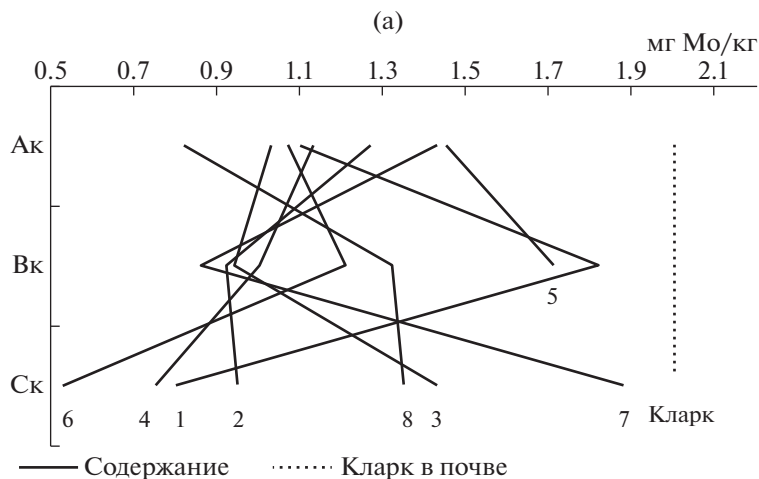
№	Котловина, угодие	Почва	№	Котловина, угодие	Почва
1	Чуйская, пастбище	Светло-каштановая	5	Уймонская, пашня	Чернозем обыкновенный
2	Курайская, пастбище	Каштановая	6	Уймонская, сенокос	
3	Канская, пастбище	Темно-каштановая	7	Абайская, пашня	
4	Канская, пашня	Темно-каштановая	8	Абайская, пашня	

Рис. 2. Распределение меди в системе почва–растение: (а) – содержание и внутрипрофильное распределение меди в почве, (б) – содержание меди в растительности, (в) – распределение запасов меди в растительности, %.



№	Котловина, угодие	Почва	№	Котловина, угодие	Почва
1	Чуйская, пастбище	Светло-каштановая	5	Уймонская, пашня	Чернозем обыкновенный
2	Курайская, пастбище	Каштановая	6	Уймонская, сенокос	
3	Канская, пастбище	Темно-каштановая	7	Абайская, пашня	
4	Канская, пашня	Темно-каштановая	8	Абайская, пашня	

Рис. 3. Распределение цинка в системе почва–растение: (а) – содержание и внутрипрофильное распределение цинка в почве, (б) – содержание цинка в растительности, (в) – распределение запасов цинка в растительности. %.



№	Котловина, угодие	Почва	№	Котловина, угодие	Почва
1	Чуйская, пастбище	Светло-каштановая	5	Уймонская, пашня	Чернозем обыкновенный
2	Курайская, пастбище	Каштановая	6	Уймонская, сенокос	
3	Канская, пастбище	Темно-каштановая	7	Абайская, пашня	
4	Канская, пашня	Темно-каштановая	8	Абайская, пашня	

Рис. 4. Распределение молибдена в системе почва—растение: (а) — содержание и внутрипрофильное распределение молибдена в почве, (б) — содержание молибдена в растительности, (в) — распределение запасов молибдена в растительности. %.

Таблица 2. Коэффициенты радиальной дифференциации почв (K_p) и корневого барьера ($K_{кб}$)

Разрез	Горизонт	K_p				$K_{кб}$			
		Mn	Cu	Zn	Mo	Mn	Cu	Zn	Mo
Высокогорные котловины									
Чуйская котловина, пастбище, светло-каштановая почва									
P.02-14	Ак	1.4	1.3	1.1	1.4	1.5	2.8	1.4	0.2
	Вк	1.2	1.2	0.9	2.3				
Курайская котловина, пастбище, каштановая почва									
P.01-14	Ак	1.4	1.3	1.3	1.3	2.6	2.0	1.6	2.1
	Вк	1.0	1.0	1.1	1.0				
Среднегорные котловины									
Канская котловина, пастбище, темно-каштановая почва									
P.03-14	Ак	1.8	1.3	1.1	0.7	1.2	1.0	1.0	0.5
	Вк	1.2	0.9	0.9	0.7				
Канская котловина, пашня, темно-каштановая почва									
P.04-14	Ак	1.1	1.3	1.1	1.5	2.0	1.3	1.1	0.7
	Вк	0.8	1.3	1.0	1.3				
Уймонская котловина, пашня, почва чернозем обыкновенный									
P.05-14	Ак	1.6	1.4	1.5	2.7	2.5	1.7	1.3	0.4
	Вк	1.0	1.4	1.2	3.2				
Уймонская котловина, естественный сенокос, почва чернозем обыкновенный									
P.06-14	Ак	1.5	1.7	1.4	2.0	8.5	2.5	1.4	0.8
	Вк	0.8	1.3	1.0	2.3				
Абайская котловина, пашня, почва чернозем обыкновенный									
P.03-19	Ак	2.0	1.3	1.4	0.8	3.2	5.0	1.5	0.4
	Вк	1.2	1.0	0.9	0.5				
Абайская котловина, пашня, почва чернозем обыкновенный									
P.04-19	Ак	1.9	2.3	1.3	0.6	3.3	2.7	1.4	1.1
	Вк	1.1	1.8	0.9	1.0				

меди 5.7–13.2 при норме 3–12 мг/кг, для цинка – 24.4–33.0 при норме 20–60 мг/кг, или выше нормальных показателей: для марганца – 40–190 мг/кг, но меньше верхней пороговой концентрации (≥ 500 мг/кг) [24]. Концентрация марганца, меди и цинка в пастбищной траве и сене больше, чем в надземной массе овса.

По-другому складывается распределение молибдена между надземной и подземной частями растений. Максимальные концентрации элемента характерны, наоборот, для надземной массы и варьируют в широких пределах: от 1.6 до 6.9 мг/кг при норме 1.0–2.5 мг/кг [16], а некоторые (овес, Уймонская котловина) превышают МДУ для кормов [25]. Это значительно больше, чем содержание в зерновых культурах, возделываемых на каштановых почвах и черноземах обыкновенных (0.2–0.5 мг/кг), и в разнотравье (0.6–0.7 мг/кг) Алтайского края [20]. На преимущественное на-

копление молибдена в надземной массе озимой пшеницы в фазе молочной спелости (3.29 против 0.95 мг/кг в корнях) указано в работе [26], естественной растительности (0.88 в листьях против 0.59 мг/кг в корнях) [27].

Расчет коэффициентов корневого барьера (отношения содержания элемента в корне к его содержанию в надземных органах) показал, что для марганца, меди и цинка характерным является барьерный тип накопления ($K_{кб} > 1$) (табл. 2). Интенсивность накопления молибдена в корнях меньше по сравнению с надземными органами ($K_{кб} < 1$).

Основным биологическим источником при-внесения марганца, меди и цинка в почвы являются корни за счет большего удельного веса в структуре общей биологической массы, на долю которых приходится 43–86% у овса и 82–97% у луговых трав. Например, в подземной массе овса сосредоточено: марганца – 71–95, цинка – 52–91,

меди – 79–93%. Для луговых трав этот показатель больше: марганца – 84–98, цинка – 81–98, меди – 82–99%. Ввиду того, что концентрация молибдена больше в надземной части, запасы его в корнях меньше, чем остальных элементов и составляют 25–75% в овсе и 71–87% в луговых травах. Незначительное участие опада в возвращении химических элементов в почву определено только на сенокосных угодьях: марганца – 2, цинка – 4, меди – 3, молибдена – 6%. На пастбище всю надземную массу поедает скот, находящийся здесь до наступления зимы. Также в хозяйствах практикуется выпас животных на пашне после уборки урожая до поздней осени. Поэтому на пашне и пастбище опад отсутствует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что основными физико-химическими особенностями исследованных почв, определяющими содержание и распределение микроэлементов, являются легкий гранулометрический состав каштановых почв и легко- и среднесуглинистый – черноземов обыкновенных с высоким содержанием крупнозема, а также резкое снижение содержания гумуса и емкости катионного обмена вниз по профилю, слабощелочная реакция среды верхних горизонтов и щелочная – нижних. Лучшими агрохимическими свойствами обладают черноземы обыкновенные и темно-каштановые почвы среднегорных котловин, худшими – светло-каштановые почвы высокогорной Чуйской котловины.

Содержание марганца, меди и цинка в почвенном покрове исследованной территории Горного Алтая характеризуется уменьшением содержания элементов от черноземов обыкновенных и темно-каштановых почв среднегорных котловин к каштановым и светло-каштановым почвам высокогорных. Коэффициент радиальной дифференциации марганца, меди и цинка в гумусовом горизонте >1 , что свидетельствует о биогенном их накоплении и аккумулятивном распределении как в каштановых почвах, так и черноземах обыкновенных. Коэффициент радиальной дифференциации молибдена варьирует в широких пределах: в гумусовом горизонте – от 0,6–0,8 в Абайской котловине до 2,0–2,7 – в Уймонской. Значительная величина коэффициента в черноземе обыкновенном Уймонской котловины (2,3–3,2) в горизонте Вк обусловлена наличием карбонатного биогеохимического барьера.

Большая часть поглощенных растениями (овсом и луговыми травами) марганца, меди и цинка локализуется в корневой системе и меньшая транспортируется в надземную. Для марганца, меди и цинка характерным является барьерный тип накопления, коэффициент корневого барье-

ра >1 . Интенсивность накопления молибдена в корнях меньше по сравнению с надземными органами ($K_{кб} <1$).

На содержание и характер профильного распределения биогенных элементов влияет комплекс почвенных факторов: гранулометрический состав, содержание органического вещества, наличие карбонатов, емкость катионного обмена, наличие геохимических барьеров (гумусовый, карбонатный горизонты). Чем тяжелее гранулометрический состав, больше содержание органического вещества, карбонатов и емкость катионного обмена, тем больше валовое содержание исследованных микроэлементов.

Сопряженное исследование почвы и растений позволило установить, что содержание в почвах марганца (в почвах среднегорных котловин), меди и цинка больше кларка, но меньше ПДК и ОДК, а превышение максимально допустимого уровня для кормов содержания марганца и молибдена в растениях агроландшафтов межгорных котловин Горного Алтая незначительное и носит единичный и локальный характер. Концентрация марганца, меди и цинка в пастбищной траве и сене больше, чем в надземной массе овса.

Авторы выражают благодарность Ю.П. Колмогорову за проведение анализов и сотруднику Ф.А. Дарьину за содействие в выполнении работ в Центре синхротронного и терагерцового излучения ИЯФ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банникова О.И. Межгорные котловины Алтая как объекты географических исследований // Мат-лы III Международ. конф. “День Земли: экология и образование”. Бийск, 1998. С. 223–224.
2. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 142 с.
3. Мальгин М.А. Биогеохимия микроэлементов в Горном Алтае. Новосибирск: Наука, СО, 1978. 272 с.
4. Балыкин Д.Н. Микроэлементы в почвах и растениях Уймонской котловины (Центральный Алтай) // Вестн. АлтайГАУ. 2009. № 5 (55). С. 29–31.
5. Балыкин Д.Н., Пузанов А.В. Микроэлементы в черноземах Уймонской котловины (Центральный Алтай) // Ползунов. вестн. 2004. № 2. С. 190–195.
6. Балыкин Д.Н., Пузанов А.В. Марганец, медь, молибден и бор в почвах среднегорных котловин Алтая // Мир науки, культуры, образов. 2007. № 4 (7). С. 27–30.
7. Балыкин Д.Н., Пузанов А.В., Ельчинова О.А. Редкоземельные элементы в почвах межгорных котловин Алтая // Географ. и природ. ресурсы. 2015. № 1. С. 105–112.
8. Модина Т.Д., Сухова М.Г. Климат и агроклиматические ресурсы Алтая. Новосибирск: Универс. кн. изд-во, 2007. 230 с.

9. Почвы Горно-Алтайской автономной области. Новосибирск: Наука, 1973. 352 с.
10. *Piminov P.A.* Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // *Physic. Proced.* 2016. V. 84. P. 19–26.
11. *Волковинцев В.И.* О закономерностях гумусообразования и природе гумуса каштановых почв Горного Алтая // Тр. конф. почвоведов Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1964. С. 327–340.
12. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 259 с.
13. ГН 2.1.7.2041-06 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. 6 с.
14. *Ковда В.А., Якушевская И.В., Тюрюканов А.Н.* Микроэлементы в почвах Советского Союза. М.: Изд-во МГУ, 1959. 68 с.
15. *Ильин В.Б.* Биогеохимия и агрохимия микроэлементов. Новосибирск: Наука, СО, 1973. 368 с.
16. *Ковальский В.В., Андрианова Г.А.* Микроэлементы в почвах СССР М.: Наука, 1970. 180 с.
17. ГН 2.1.7.2511-09 Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. 12 с.
18. *Протасова Н.А., Щербаков А.П., Конаева М.Т.* Редкие и рассеянные элементы в почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. 168 с.
19. *Архинов И.А.* Биогеохимические особенности, определяющие ландшафтно-геохимическое поведение микроэлементов в почвах Алтая // *Вестн. АлтайГАУ.* 2014. № 4 (114). С. 23–27.
20. *Спицына С.Ф., Томаровский А.А., Оствальд Г.В.* Поведение молибдена в системе почва–растения на территории Алтайского края // *Вестн. АлтайГАУ.* 2014. № 2 (112). С. 53–57.
21. *Томпсон Л.М., Трой Ф.Р.* Почвы и их плодородие. М.: Колос, 1982. 320 с.
22. *Протасова Н.А., Беляев А.Б.* Макро- и микроэлементы в почвах Центрально-Черноземной зоны и почвенно-геохимическое районирование ее территории // *Почвоведение.* 2000. № 2. С. 204–211.
23. *Глазговская М.А.* Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. 2-е изд. Смоленск: Ойкумена, 2002. 288 с.
24. *Ковальский В.В., Раецкая Ю.И., Грачева Г.И.* Микроэлементы в растениях и кормах. М.: Колос, 1971. 236 с.
25. Временный максимально допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М., 1987. 5 с.
26. *Ахмедова З.Н.* Динамический баланс молибдена в агроценозе // *Изв. ДагестанГПУ. Естеств. и точн. науки.* 2009. № 2 (7). С. 23–29.
27. *Рамазанова А.И., Рамазанова Н.И., Ахмедова З.Н.* Содержание бора и молибдена в растениях основных фитоценозов равнинного Дагестана // *Вестн. ДагестанГУ. Сер. 1: Естеств. науки.* 2011. № 1. С. 132–137.

Microelements in Agrolandscapes of Altai Intermountain Basins

O. A. Elchininova^{a,*}, A. V. Puzanov^a, T. A. Rozhdestvenskaya^a, and S. Ya. Dvurechenskaya^a

^a *Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia*

^{*}*E-mail: eoa59@mail.ru*

In this paper, the peculiarities of accumulation and distribution of biogenic elements in the system “soil–agricultural plants” in the intermountain basins of the Altai Mountains were identified. The content of manganese, copper and zinc in the soil cover decreased from ordinary chernozems and dark chestnut soils in mid-mountain basins to chestnut and light chestnut soils of high mountains. Coefficients (<1) of radial differentiation of manganese, copper and zinc in the humus horizon indicated biogenic accumulation and accumulative distribution of these elements in chestnut soils and ordinary chernozems. As for molybdenum, this coefficient varied widely (0.6–3.2). Its high value (2.3–3.2) for ordinary chernozems of the Uymon basin in Bc horizon was due to the carbonate biogeochemical barrier occurrence. A complex of soil factors influenced on content and nature of profile distribution of biogenic elements. For instance, i.e. the heavier the granulometric composition and the higher the organic matter content and carbonate/cation exchange capacity, the greater the total content of the studied trace elements were. Most manganese, copper and zinc absorbed by plants (oats and meadow grasses) was localized in the root system, whereas their little amount – in the above-ground system. The barrier type of accumulation was characteristic for manganese, copper and zinc with root barrier coefficient (RBC) exceeding 1. The intensity of molybdenum accumulation in roots was lower than in above-ground parts (RBC<1). A concurrent study of soils and plants revealed that concentrations of manganese (in soils of mid-mountain basins), copper and zinc were above the Clark value, but lower than MAC (maximum allowable concentration) and APC (approximate permissible concentration). Excess in MAC (for forage) of manganese and molybdenum in plants of agricultural landscapes of intermountain basins of the Altai Mountains was single, local and insignificant. The concentrations of manganese, copper and zinc in pasture grass and hay were higher than in the above-ground mass of oats.

Key words: high- and middle mountain basins, soil, above-ground mass, roots, biogenic elements, intra-profile distribution, radial differentiation coefficient, root barrier coefficient.