МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Центрально-Черноземной полосы имени В. В. Докучаева»
(ФГБНУ «НИИСХ ЦЧП»)

ЗБОРИЩУК Ю.Н., ТУРУСОВ В.И.

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ КАМЕННОЙ СТЕПИ

Монография

Каменная Степь
2019

УДК 631.412:470(32)
ББК П 032
З 41

Рецензент:
Чевердин Ю.И., д.б.н., заведующий отделом
агропочвоведения и агролесомелиорации
ФГБНУ «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Центрально-Черноземной полосы имени В. В. Докучаева

З 41 Зборищук Ю.Н., Турусов В.И.
Микроэлементы в почвах Каменной Степи. Монография. – Воронеж: издательство «Истоки», 2019. – 94 с.

ISBN 978-5-4473-0242-9

Описано содержание валовых и подвижных форм основных микроэле-ментов в почвах Каменной Степи и их влияние на рост и развитие растений. Профильное распределение валового содержания микроэлементов характеризуется снижением их вниз по профилю независимо от экологических условий и антропогенных нагрузок в Каменно-степном ландшафте. Карбонатный геохимический барьер обусловливает относительную аккумуляцию большинства микроэлементов в горизонте $B1_{ca}$ исследованных почв. В пределах одного участка содержание подвижных форм микроэлементов может значительно (в два-три раза) отличаться при абсолютном равенстве содержания валовых количеств. Повышенное содержание валовых и подвижных форм никеля в почвах связано с повышенным локальным фоном по никелю и способностью элемента образовывать комплексы с низкомолекулярными органическими веществами.

УДК 631.412:470(32)
ББК П 032

Рекомендовано к публикации Ученым советом ФГБНУ «НИИСХ ЦЧП»
от 14 ноября 2018 г., протокол № 12

ISBN 978-5-4473-0242-9 © Издательство «ИСТОКИ», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4
ГЛАВА 1. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ КАМЕННОЙ СТЕПИ 7
1.1. Климат 8
1.2. Рельеф 10
1.3. Почвообразующие породы 11
1.4. Гидрология 13
1.5. Почвенный покров 14
1.6. Растительный покров 14
ГЛАВА 2. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ 19
2.1. Бор 19
2.2. Хром 27
2.3. Марганец 30
2.4. Кобальт 33
2.5. Никель 34
2.6. Медь 37
2.7. Цинк 40
2.8. Кадмий 43
2.9. Свинец 47
ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 51
МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 52
ГЛАВА 4. НЕКОТОРЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ КАМЕННОЙ СТЕПИ 54
ГЛАВА 5. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ КАМЕННОЙ СТЕПИ 59
ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 65
6.1. Микроэлементы в почвах залежи и под лесополосой ... 65
6.2. Микроэлементы в почвах катены 68
6.3. Подвижные формы микроэлементов 70
6.4. Доля подвижных микроэлементов от валовых 71
6.5. Корреляционный анализ 74
Заключение 80
Список использованной литературы 82
Приложения 90

ВВЕДЕНИЕ

В научной литературе до сих пор нет единого определения понятия микроэлементы. Профессор Е.П. Троицкий (1969) писал: «Каждый химический элемент, малые дозы которого обусловливают нормальное течение биологического процесса, назовем микроэлементом… Один и тот же химический элемент может быть в одних случаях микроэлементом, а в других – макроэлементом в зависимости от той роли, которую он выполняет в системе живого вещества». В настоящее время можно считать почти доказанным, что почти все из известных микроэлементов обязаны своим влиянием на биоразнообразие, обмен веществ и устойчивое развитие живой материи, способности входить в состав или активировать отдельные компоненты энзиматических структур.

Физиологи растений в то же время говорят об условности термина «микроэлемент», если исходить из формального смысла этого понятия, отражающего лишь вероятную величину потребности растений в том или ином химическом элементе (Чернавина И.А., 1970). По мнению почвоведов-геохимиков к группе микроэлементов (тяжелых металлов и металлоидов) относятся химические элементы с атомной массой более 50 (Водяницкий Ю.Н., 2009). Следует отметить, что ни отдельно металл, ни отдельно белковая часть фермента не обладают высокой энергией активации, и лишь совместное их присутствие обеспечивает высокую реакционную способность (Якушевская И.В., 1973).

Роль микроэлементов в почвообразовании в основном сводится к активации биохимических реакций как в составе ферментативных систем, так и в не их. Микроэлементы, вероятно, связаны с большинством ферментов участвующих в сложных превращениях почвенных органических веществ. Они служат заметным фактором синтеза и разрушения почвенного органического вещества.

Данных о содержании микроэлементов в почвах Каменной Степи относительно немного. В объёмной и разнообразной по набору микроэлементов как физиологически важных, так и загрязнителей в монографии Н.А. Протасовой и А.П. Щербакова (2003) приводятся данные по содержанию микроэлементов (мг/кг в черноземе обыкновенном глинистом целинного участка Каменной Степи, как эталоне «фонового» содержания и ПДК (мг/кг): Mn-860, Cr-100, Ni-31, Cu-24, Zn-66, Co-16, Mo-2,3, B-45.

Г.В. Мотузова (2007) приводит следующие фоновые значения валового содержания тяжелых металлов в чернозёмах (мг/кг): Ni-45, Cu-25, Zn-68, Co-15, Cd-0,24, Pb-20. Эти значения практически совпадают с вышеприведенными. Среди изученных нами элементов высокой опасностью характеризуются Zn, Cd, Pb, умеренной – Cr, Co, Ni, Cu и малой – Mn. По данным Горбуновой Н.С. (2005) валовое содержание Mn, Cu, Zn Ni в почвообразующих породах Каменной Степи ниже кларка литосферы, что свидетельствует о заметном рассеянии этих элементов в черноземах ЦЧП. Согласно этому автору Cd и Pb концентрируются в процессе почвообразования в черноземах ЦЧП.

Марганец, медь и свинец обладают в черноземах более высокой степенью подвижности, чем цинк. Отсюда высока вероятность дефицита подвижного цинка в почвах региона (Горбунова Н.С., 2005). Заметная часть всех определяемых в черноземах микроэлементов, вероятно, находится в относительно прочно связанном состоянии (Коляда, 2012).

Полученные нами данные по валовому содержанию микроэлементов в горизонте А (мг/кг) черноземов Каменной Степи представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Валовое содержание микроэлементов в горизонте А (мг/кг) черноземов Каменной Степи

Объект	B	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Пашня 1	17	46	482	12,5	39	21	67	0,20	14
Лесополоса	16	48	434	12,0	39	21	66	0,18	13
Пашня 2	10	44	480	13,5	39	22	66	0,18	15
Залежь	17	42	455	11,5	37	22	65	0,22	13
Заповедник	19	48	499	12,5	40	24	74	0,21	13

Из приведенных в таблице данных следует, что определенное нами валовое содержание микроэлементов в горизонте А меньше в 2 раза приводимых Н.А. Протасовой и А.П. Щербаковым (2003) по бору, хрому и марганцу. Нами обнаружены практически одинаковые валовые концентрации всех исследованных микроэлементов в горизонте А вне зависимости от характера использования. Исключение составляет бор в пашне 2, где его валовое содержание заметно ниже, скорее всего из-за проявления на склоне эрозионных процессов.

Для почв, различающихся по грансоставу и кислотности, в литературе приводятся и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов. ОДК для черноземов имеют следующие значения (мг/кг): Ni-80, Cu-120, Zn-220, Cd-2,0, Pb-130. В методической работе «Система агроэкологического мониторинга...» (2006) приводятся данные о валовом содержании тяжелых металлов в гумусовом горизонте чернозёмов обыкновенных и лугово-чернозёмной почве (табл. 2).

Таблица 2 – Валовое содержание микроэлементов, мг/кг

Почва	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr
Чернозем обыкновенный	26,3	57,2	0,32	17,6	39,4	71,5
Лугово-черноземная почва	19,9	53,6	0,41	16,9	36,9	58,7

Ввиду относительно слабой изученности микроэлементного состава почв Каменной Степи, понятна актуальность задачи – исследовать содержание микроэлементов в этих почвах при различном использовании. Для этого были выбраны образцы почв по горизонтам в 10 разрезах по пяти видам использования.

При этом оценку микроэлементного состава почв предлагается проводить сравнением полученных данных с имеющимися результатами, в частности с величинами предельных валовых концентраций тяжелых металлов, считающихся фитотоксичными, в почве (мг/кг): Cd – 3-8, Cr – 75-100, Cu – 60-125, Ni – 100, Pb – 100-200, Zn – 70-400, Mn – 1500-3000 (Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989). В Каменной Степи, по нашим данным, ни по одному из исследованных микроэлементов не был превышен порог фитотоксичности (табл. 2).

Фактической основой для написания данного обобщения послужили результаты многолетних полевых и аналитических работ, по итогам которых была намечена ландшафтная катена от заповедных участков у лесополосы 40 до склона балки Таловой.

ГЛАВА 1. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ КАМЕННОЙ СТЕПИ

Государственный природный заказник федерального подчинения «Каменная Степь» расположен в Таловском районе Воронежской области, на водоразделе бассейнов рек Битюг и Хопер.

Он был создан для охраны уникальных лесокультурных лесостепных ландшафтов и разработки научно обоснованной агроландшафтной системы земледелия. На этой территории экспедицией В.В. Докучаева впервые были проведены работы по агролесомелиорации степных почв и заложены основы рационального использования черноземов. В результате сформировался уникальный лесостепной оазис. В заказнике сохранились участки ненарушенных степей, к сожалению небольшие по размеру. Это одно из немногих мест, где сохранились ненарушенными классические черноземные почвы в косимой и некосимой заповедной степи.

Каменная Степь расположена на юго-востоке Центрально-Черноземной полосы, на границе двух природных зон – лесостепной и степной. Занимая территорию на водоразделе между Волгой и Доном (в междуречье рек Хопра и Битюга), этот район значительно возвышается над уровнем моря и окружающей местностью. Наиболее высокая отметка над уровнем моря достигает здесь 204 м (между поселками Осиновый и Верный), а наиболее низкая (117 м) – в районе реки Чиглы.

Более ста лет назад на территории Каменной Степи были частые засухи и суховеи, являвшиеся, по мнению В.В.Докучаева, результатом иссушения степей в течение последних нескольких тысяч лет. Иссушение степных территорий происходило вследствие расчленения территории оврагами и балками и понижения уровня грунтовых вод. Для борьбы с засухой была разработана программа по упорядочиванию ведения сельского хозяйства, которая начала реализовываться с 1889 года.

В течение XX столетия положения этой программы послужили основой для проведения мероприятий по лесомелиорации, орошению, снегозадержанию в начале на территории Каменной Степи, а затем на всей территории Центрально-Черноземной полосы.

В 1956 году на территории пос. Каменная Степь был организован Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева, с 1970 года при институте начал функционировать Центрально – Черноземный селекционный центр. Экспериментальной базой института являются два крупных опытно-производственных хозяйства – Докучаевское и Таловское. Земельная площадь хозяйств 12895 га, из них пашня 9275 га, 550 га заняты лесными полосами (Рымарь В.Т., Покудин Г.П., 1997; Рымарь В.Т., Щеглов Д.И., 2006). В 1996 году территория «Каменная Степь» получила статус природного заказника федерального значения.

Современная Каменная Степь имеет совершенно иной ландшафт по сравнению с тем, который был здесь в период работы экспедиции В. В. Докучаева. Система взрослых защитных лесных насаждений различного назначения окаймляет поля, занятые сельскохозяйственными культурами. Защитные лесополосы в сочетании с системами прудов по балкам и бывшим оврагам, создают на полях своеобразные условия произрастания растений и обитания различных организмов, резко отличающиеся от условий на открытых местах.

1.1. Климат

Характерной особенностью климата региона является изменчивость, непостоянство режима осадков. Количество осадков может составить от 50 до 150% среднегодовой нормы. Влажные годы сменяются сухими без всякой видимой закономерности, но можно заметить некоторую цикличность в величинах годовой суммы осадков. Характерно чередование многолетних сухих и коротких влажных периодов. В XX веке продолжительность каждого из периодов колебалась от 3 до 10 лет. Сумма активных (выше 10°С) температур составляет 2622° С. Безморозный период длится 149 дней. Среднегодовая сумма осадков за период наблюдений местной метеостанции – около 470 мм (в 1942 г. – 323 мм, а в 1976 г. – 640 мм). За период вегетации выпадает 235 мм (или около 50% от среднегодовой суммы осадков). За последние десятилетия годовое количество осадков возросло до 550-600 мм за счет увеличения зимних осадков со 150 до 350 мм. В жидком виде выпадает около 75% осадков, 12% – в твердом виде и 13% – в смешанном. В Каменной Степи уровень грунтовых вод поднялся в Докучаевском колодце с 7,5 метров в конце XIX века до 4,5 метров в конце XX века.

Характерной чертой климата Каменной Степи, как и всей степной зоны, является большое непостоянство погодных условий, складывающихся в тот или иной год. В условиях юго-востока Центрально-Черноземной полосы практически каждый третий год является засушливым. По данным метеонаблюдений на территории Каменной Степи периоды с избытком тепла и недостатком влаги чередуются с прохладными периодами повышенного увлажнения с интервалом примерно 4-6 лет.

Самым теплым месяцем является июль. Среднесуточная температура составляет +20,5°С. Наиболее холодные месяцы – январь и февраль, средняя суточная температура февраля составляет –9,6°С. Продолжительность вегетационного периода составляет 188 дней, а периода с активными температурами – 158 дней.

Атмосферные осадки в степной зоне распределяются в течение года неравномерно. Согласно климатической характеристике района расположения Каменно-степного заказника основное количество осадков выпадает в теплое время года (около 75%) и только небольшая часть (25%) приходится на долю твердых осадков, выпадающих в холодный период. Среднегодовое количество осадков за период с 1915–1960 гг. составило 412 мм. Средняя годовая скорость ветра – 4,3 м/сек (Винокурова И.К., 1967).

За последние 120 лет на территории обследуемого района возросла средняя годовая температура, количество атмосферных осадков также увеличилось (табл. 3).

Таблица 3 – Некоторые климатические показатели для территории Каменной Степи

Климатический показатель	Период 1914–1960 гг.	Период 2005–2008 гг.
Средняя годовая температура воздуха, 0С	5,4	7,3
Годовое количество осадков, мм	412	534
Средняя годовая скорость ветра, м/с	5,4	3

Однако эти изменения климатических условий в сторону усиления увлажненности происходят согласно закономерным флуктуациям климата, которые проявляют себя в пределах коротких промежутков времени (1–3 десятилетия) (Чубуков Л.А., Шварева Ю. Н., 1973).

1.2. Рельеф

Каменная Степь представляет собою слабоволнистую равнину, изборожденную пологими балками и степными западинами. Встречаются здесь и ветвистые овраги, местами глубоко врезанные в толщу подпочвенных пород. В начале образования ландшафта Каменной Степи формы его были более выражены, с течением времени они несколько выровнялись, чему во многом способствовала активность Днепровского оледенения, захватившего одним из своих языков этот район. Передвигаясь на юг, ледник отложил морену, валуны которой встречаются на поверхности Каменной Степи.

Участок между рекой Чиглой и балкой Таловой в целом представляет собою равнину с постепенным понижением на запад к реке Чигле и более резким падением к балке Таловой. С западной стороны в балку Таловую впадают более мелкие балки. В тех местах, где эти балки не облесены, наблюдаются эрозионные процессы, образующие промоины с отвесными берегами и обнажениями подстилающих пород, что обычно свидетельствует о начале образования оврагов.

На плоских, не дренированных участках встречаются многочисленные «блюдца», западинки, бугорки и небольшие всхолмления, вызывающие неравномерное распределение осадков на поверхности почвы (особенно при весеннем таянии снега и летом при интенсивных ливневых дождях). На распаханных полях эти формы микрорельефа выражены слабее.

В геоморфологическом отношении территория заказника занимает водораздельный участок между р. Чиглой и балкой Таловой, и представляет собой равнину с постепенным понижением на запад к р. Чигле и более резким падением на восток – к балке Таловой. Западную часть равнины пересекает целая система балок с серией построенных на них прудов.

Для территории Каменной Степи, как и для большинства ландшафтных комплексов Центрального Черноземья, характерен склоновый тип местности. Данный тип местности может способствовать развитию эрозионных процессов, явлений вторичного гидроморфизма, т.е. образованию подтопленных и переувлажненных почв (мочаров) (Сорокина Н.П., 2007). На распаханных полях неровности выражены слабее.

По данным 2006 года на территории заказника было отмечено 95 ареалов сезонно-переувлаженных почв в период с марта-начала апре-

ля (после снеготаяния) по май-июнь. Одна треть ареалов переувлаженных почв приурочена к западинам на плоском водоразделе, две трети ареалов расположены в вогнутых частях склонов, ложбинах и лощинах (Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И., 2007; Зборищук Ю.Н., Рымарь В.Т., Чевердин Ю.И., 2007).

Соотношение типов местности в Каменной Степи следующее: 37,2% центральным частям водоразделов; 45,3% – плакорный, охватывающий периферийные части водоразделов; 17,4% приходится на территории склонов крутизной более 3°, с преобладанием смытых почв (Сорокина Н.П., 2007).

Формирование и трансформации древних и современных форм мезо- и микрорельефа на территории Центрально-Черноземной полосы (ЦЧП), возможно, происходили в эпохи оледенений и межледниковий и были, вероятно, связаны с криогенными процессами (Алифанов В.М., 2001).

На территории Каменной Степи выраженность микрорельефа наиболее четко проявляется в после дождевой период: микроповышения рельефа сравнительно быстро просыхают, а понижения большее время остаются влажными, а раз в 3–4 года ранней весной они заполнены водой. Палеокриогенные особенности микрорельефа до некоторой степени влияют на характер и неоднородность атмосферного увлажнения, а, следовательно, динамику гидрологического режима и некоторые особенности строение почвенного профиля.

1.3. Почвообразующие породы

Среди почвообразующих пород в Каменной Степи преобладают четвертичные отложения. Это покровные карбонатные лессовидные суглинки, ледниковые отложения – глинистый моренный мелкозем, аллювиальные отложения и овражно-балочный делювий. Мощность покровных отложений достигает примерно 11 метров. Общая мощность четвертичных отложений составляет на водоразделах 20 м, а на западных склонах – до 8–10м. В северо-западной части территории Каменной Степи мощность четвертичных отложений увеличивается до 50 м.

Как и весь юг Центрально-Черноземной полосы, Каменная Степь отличается сплошным распространением верхнемеловых и третичных отложений. В основе более поздних напластований лежит мел, наибольшая мощность которого (около 50 м) отмечена около балки Та-

ловой. К югу и западу мел опускается ниже и залегает на кварцевых песках с фосфорной галькой. Сверху мел покрывают третичные отложения – песчаные и глинистые породы. Этот слой покрыт сверху более поздними четвертичными отложениями – намытыми делювиальными и ледниковыми глинами. По берегам балок встречаются более молодые аллювиальные и овражно-аллювиальные образования различного состава.

На территории заказника выделяют следующие толщи подстилающих пород: песчаные и глинистые породы палеогенового возраста и толщу карбонатной днепровской морены (мощностью 20–30 м). При близком залегании глин палеогена могут формироваться линзы аллохтонных грунтовых вод (верховодка), обогащенных легкорастворимыми солями.

Почвообразующие породы представлены карбонатными лессовидными суглинками и глинами. Мощность этих отложений составляет, в среднем, 2–3 м на водоразделах.

Считается, что образование толщ лессовидных суглинков связано с отложением взвешенных частиц из вод тающего ледника. Возраст данных отложений соответствует среднему плейстоцену и составляет 250–300 тыс. лет (Ковда В.А., Самойлова Е.М., 1963).

Карбонатные лессовидные суглинки имеют ряд особенностей, определяющих свойства образующихся на них черноземов: преобладание пылеватой фракции (0,01–0,05 мм), вертикальная делимость породы, присутствие карбонатов. Благодаря вертикальной делимости, водопроницаемость породы различна: в вертикальном направлении породы промачиваются на глубину около 1 м/сут, в латеральном – на 0,02 м/сут. (Кригер Н. И., 1965; Самойлова Е.М., 1983). Наличие карбонатов способствует коагуляции микроагрегатов, однако в определенных условиях карбонаты могут выщелачиваться и порода может давать просадку, таким образом формируются западины (Никанорова Н.Н., 1953).

Гранулометрический состав карбонатных лессовидных суглинков изменчив, но доминирующей фракцией является илистая (частицы менее 0,001 мм) на долю которой приходится, в среднем 37–42%, пылеватая фракция (0,01–0,001мм) – 18–31%; фракция крупной пыли (0,01–0,05мм) – 8–27% (Никанорова Н.Н., 1953).

В минералогическом составе илистой фракции преобладают гидрослюда, присутствуют смешанослойные и лабильные минералы

монтмориллонитового типа, каолинит, хлориты, гидроксиды железа. Преобладающая ассоциация среди глинистых минералов монтмориллонит – гидрослюда. (Протасова Н.А., 2004).

1.4. Гидрология

В Каменной Степи различают три горизонта грунтовых вод. Первый водоносный горизонт залегает на четвертичных отложениях – лессовидных суглинках и моренных отложениях; второй приурочен к глинистым толщам палеогенового и неогенового возраста; третий – в меловой толще.

Грунтовые воды четвертичных отложений жесткие, солоноватые. Водо-носность этого горизонта очень слабая. Четвертичные грунтовые воды залегают на глубине от 1,5 до 10 м в зависимости от абсолютных отметок местности («Вопросы...», 1953).

Грунтовые воды палеогеновых отложений залегают на глубине 15–19 м. Минерализация вод умеренная. Грунтовые воды мела залегают на глубине 64-65 м.

Годовая амплитуда колебаний уровня грунтовых вод изменяется в зависимости от места залегания и составляет в степи – 0,7 м, на полях – 1,02 в лесных полосах – 1,71 м. Минимальное положение уровня наблюдается в осенне-зимний период. Весной наблюдается резкий подъем уровня грунтовых вод; максимума он достигает в июне. Атмосферные осадки почти ежегодно достигают уровня подземных вод («Вопросы...», 1953).

На формирование ландшафтных комплексов Каменной Степи большое влияние оказывает верховодка. Сохранившаяся во многих местах глинистая морена, а иногда и тяжелые покровные суглинки служат водоупором, обусловливая появление неглубоко залегающих (2,5–10м) местных грунтовых вод. Верховодка оказывает прямое воздействие на характер почв и растительность Каменной Степи.

В основном грунтовые воды в Каменной Степи залегают на глубине 3–5 м от дневной поверхности. На водоразделах глубина залегания грунтовых вод достигает 8–9 м, а на склонах и в верховьях балок грунтовые воды поднимаются до 1 м и более.

Химический состав грунтовых вод весьма непостоянен во времени из-за нерегулярности выпадения осадков, различной водопроницаемости покровных суглинков в вертикальном и латеральном направлении и, наконец, антропогенного влияния. Изучение грунтовых вод Камен-

ной Степи, их динамики и вещественного состава – одно из условий обоснованного решения проблемы трансформации черноземов обыкновенных.

1.5. Почвенный покров

Почвенный покров Каменной Степи в основном представлен чернозёмами обыкновенными средней мощности средне – и тяжелосуглинистыми на лессовидных карбонатных суглинках. Они занимают более 40% территории. 35% приходятся на типичные чернозёмы, приуроченные к повышенным водоразделам и верхним частям склонов. В верховьях балок, по ложбинам и в микропонижениях встречаются пятна лугово-чернозёмных почв, а по днищам балок – аллювиальные почвы.

По грансоставу преобладают среднесуглинистые и тяжёлосуглинистые почвы. Большинство черноземов среднегумусные. Мощность гумусового горизонта колеблется от 39 до 71 см. По величине pH почвы Каменной Степи преимущественно нейтральные, встречаются также слабокислые и близкие – к нейтральным.

Почвенный покров Каменной Степи, по нашему мнению, изучен недостаточно. Это касается вопросов эволюции почв в связи с динамикой почвообразовательных процессов, которые обусловлены как природными, так и антропогенными факторами, полноты изученности диагностических признаков различных почв, структуры почвенного покрова. Сюда же относится фрагментарность сведений о валовом содержании, подвижных доступных формах микроэлементов в профиле почв и ландшафтах и экосистемах Каменной Степи. Последний недочет информации тем или иным способом и пытается устранить проделанная нами работа.

1.6. Растительный покров

Современный растительный покров Каменной Степи совершенно не похож на нативный, существовавший до активной преобразовательной деятельности человека. Каменностепский ландшафт называют агролесоландшафтом, что указывает на ведущую роль агро- и лесных экосистем.

В Воронежской области распространены степи ковыльные и типчаковые. Степная флора насчитывает около 300 видов. В состав её

входят злаки, бобовые, осоки и представители других семейств. Экологически степная растительность весьма неоднородна. Выделяются следующие жизненные формы степных растений: 1) кустарники (бобовник, степная вишня), 2) полукустарники (дрок красильный, полынок), 3) полукустарнички (чабрец Маршалла), 4) многолетние травы дерновинные (ковыль, типчак), 5) корневищные (пырей ползучий, костер безостый), 6) корневищно-дерновинные (мятлик узколистный, осока приземистая), 7) стержнекорневые (нивяник), 8) корнеотпрысковые (вьюнок полевой), 9) кистекорневые (астра ромашковая, мелколепестник острый), 10) ползучие (крупка сибирская, ястребинка ползучая), 11) луковичные (тюльпаны, гусиный лук, гиацинтик беловатый), 12) клубневые (чина клубненосная), 13) двулетние (колокольчик сибирский, румянка), 14) однолетние (проломник удлиненный, песчанка тимьянолистная), 15) мхи (Tortula, Thuidium, Mnium), 16) лишайники (кладония), 17) синезеленые водоросли (стратоносток).

В местах, где при использовании воздействие стравливания минимально, формируются ковыльные степи, иногда чередующиеся с участками, где господствует костер прямой и степной. По мере усиления выпаса и сбивания степи скотом ковыльная степь замещается типчаковой, костровой. Ковыли быстрее других злаков выбывают из травостоя под влиянием усиленного выпаса.

Величина проективного покрытия колеблется от 70% в ковыльных степях, до 80-95% – в разнотравных. В настоящее время типчаковая степь (сформировавшаяся в результате выпаса на ковыльной) сохранилась на плакоре Таловского района (Краснянские степи). Он занят тырсово-ковыльно-типчаковой ассоциацией, состоящей из трех ярусов. Общее проективное покрытие – 50-70 %, видовое обилие – 15-20.

На участках косимой залежи встречаются те же виды растений, но распределение их рассеянное (диффузное). Травостой на некосимой залежи густой (95–100% покрытие), на косимой – сравнительно изрежен (покрытие около 75%). Вся некосимая степь имеет мощный растительный войлок. Сухая масса растений с 1 м^2 составляет около 2400 г (без войлока) (Никанорова Н.Н., 1953).

Разрабатывая общий проект «Особой экспедиции» В.В. Докучаев (1951) сделал особый упор на высаживание древесной растительности на опытном участке. Лес планировали высаживать по водоразделам, открытым пространствам. Преобладающая форма древесных насаждений – полосы и ленты различной ширины, составленные из разно-

образных древесных и кустарниковых пород. Также планировались насаждения леса в сухих и обводненных балках. В настоящее время на территории Каменной Степи насчитывается 242 лесные полосы разного назначения, занимающие 512,6 га, или 8,2% от общей площади землепользования.

В подавляющем большинстве (73%) насаждения Каменностепного оазиса размещаются на плоских плакорах или пологих (до 3˚) плакорных склонах; 66 % приходится на полезащитные полосы; почти четвертую часть составляют прибалочные и водоохранные насаждения; довольно большую площадь (около 10%) занимают садозащитные и озеленительно-декоративные полосы.

По интенсивности роста и продолжительности насаждения на плакорном и склоновом типе местности существенно не различаются. Здесь самые старые, почти 120-летние насаждения характеризуются высокими запасами древесины – 322-370 м3/га. Если учитывать и промежуточное лесопользование в виде рубок ухода и санитарных рубок, то общая продуктивность некоторых лесополос составит 500 м3/га и более. Производительность склоновых насаждений на 20-30 % меньше. В настоящее время нет достаточных данных, чтобы назвать причины такой разницы. Можно предположить, что они кроются в различиях почвенно-гидрологических условий (Ерусалимский В. И. и др., 2007).

По поводу характера растительного покрова Каменной Степи существует множество точек зрения: Б.А. Келлер (1921) считал, что на этой территории когда-то преобладали крупнодерновинные ковыльные степи; В.В. Алехин (1934) утверждал, что это была территория переходная к типичным южно-русским степям с преобладанием в степных сообществах ковыля Лессинга (Stipa Lessingiana) и тырсы (S.capillata L.).

Ф.Н. Мильков (1992) относил Каменную Степь к полосе разнотравно-типчаково-ковыльных степей, Н.С. Камышев (1976) считал, что на плакорах данного региона ранее были не настоящие ковыльные, а ковыльно-типчаково-разнотравные луговые степи.

В растительном покрове залежей по обилию преобладали ковыли (Stipa pennata, Stipa Lessingiana, S.capillata), типчак (Festuca ovina) и тонконог (Koeleria cristata), разнотравье.

По мнению В.В. Алехина (1934) местоположение мелко-ковыльных степей с ковылем Лессинга приурочено преимущественно к юж-

ным склонам. Среди других растений наибольшим обилием отличаются бобовые: узколистная вика, клевер горный, желтая люцерна, а из разнотравья – горицвет волжский, лапчатка (Potentilla opaciformis), шалфей поникший, подорожник (Plantago d Urvilleana), австрийский полынок (Artemisia austrica).

Малонарушенные настоящие ковыльные степи в прошлом встречались только в балке Таловой на склонах юго-восточной экспозиции. Под охрану были взяты степные залежи: микрозаповедник № 1 – 1882 и 1908 гг.; микрозаповедник № 2 – 1885, 1890, 1895 и 1900 гг.; микрозаповедник № 3 – 1914 г. Все залежи, независимо от возраста, настолько походили друг на друга по видовому составу, что их охарактеризовали как единый массив с явным преобладанием злаков, в особенности – типчака. Обильны были также тонконог, мятлик луговой.

Еще в 1923 г. А.И. Мальцев обращал внимание на то, что степные залежи, находящиеся среди лесных полос, изменяют свою структуру, травостой становится более влаголюбивый, появляются древесно-кустарниковые заросли степных кустарников – караганника, ракитника, терна.

Косимые залежи, подвергающиеся ежегодному скашиванию травостоя, в настоящее время больше напоминают настоящие степи.

Кроме охраняемых степных залежей на плакорах (микрозаповедники № 1 и № 2) степная растительность постоянно существовала в Каменной Степи на склонах балок. В настоящее время, под воздействием разнообразной хозяйственной деятельности (создание водохранилищ, террасирование склонов, выпас скота и т.д.) вся степная растительность Каменной Степи претерпела значительные изменения.

На склонах восточных экспозиций балки Таловой исчезли ковыльные степи. Их заместили различные антропогенные варианты типчаковых, кострецовых и злаково-разнотравных (шалфей поникающий, лапчатка серебристая, подмаренник настоящий, овсяница валийская, тонконог гребенчатый, мятлик луковичный и др.) степных сообществ.

Степные участки с абсолютным заповедыванием превратились в древесно-кустарниковые сообщества лесополос. Степная растительность микрозаповедников, используемая в качестве сенокосов, представляет собой территориальную мозаику из пяти основных степных сообществ, в которых по обилию в разнообразных сочетаниях преобладают кострец береговой (Bromopsis riparia), мятлик узколистный (Poa pratensis angustifolia), василек (Centaurea scabiosa), белая тавол-

жанка (Filipendula hexapetala), различные виды клеверов, вероник и других растений. Мозаичность растительного покрова микрозаповедников определяется присутствием на их площади степных западин; неравномерностью подтока грунтовых вод из-за относительной выровненности территории; некоторой пестротой их почвенного покрова; наличием многочисленных кротовин и сурчин.

Проведенное геоботаниками сравнение современного растительного покрова залежей и предыдущих описаний показали заметное, особенно по флористическому составу, усугубление процесса олуговения травостоя залежей. Предполагается, что олуговение связано с общим потеплением климата, поднятием уровня грунтовых вод на плакорах Каменной Степи; влиянием лесных полос, вплотную окружающих микрозаповедники; антропогенным влиянием и другими причинами (Мильков Ф.Н., 1992; Рымарь В.Т., Покудин Г.П., 1997).

Один из исследуемых нами участков (№5) расположен на территории ботанических микрозаповедников, организованных более 100 лет назад. Изначально на этой территории были пахотные земли, поэтому исконно степной растительный покров был нарушен.

Как отмечалось в работе Н.С. Камышева (1976), степные залежи (участок 5), находящиеся среди лесных полос, изменяют свою структуру: травостой становится более влаголюбивый, место травяных растений занимают древесно-кустарниковые сообщества.

Большинство насаждений, созданных на рубеже XIX и XX вв., были смешанными по составу, среди них главенствующую роль (около 2/3 по площади) играли насаждения дуба черешчатого в первом ярусе. Кроме того, в насаждения входили ясень, вяз, береза. Липы, груша, клены ясенелистный и остролистный произрастают в насаждениях дуба как сопутствующие породы в одном с ним ярусе, либо во втором. Третий ярус представлен подростом первого и второго ярусов, но дуб там отсутствует.

По мере роста и развития лесных культур в них происходят существенные изменения первоначального состава лесных пород, что связано с их различной устойчивостью, долговечностью и конкурентоспособностью при совместном произрастании. К 60-летнему возрасту лесополос сохранились лишь отдельные деревья вяза, клена ясенелистного, остролистного, липы, груши. Практически все лесные полосы из-за низкой сквозистости крон сложены мертвопокровными парцеллами.

ГЛАВА 2. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ

В публикации «Micronutrients …», 1982 утверждается, что результаты микроэлементного анализа почв необходимо корректировать так, чтобы они были в согласии с результатами анализа растений. Для этого необходимы коррекционные коэффициенты, чтобы уменьшить или минимизировать искажающий эффект определенного свойства почв с существенным влиянием на содержание микроэлементов в почвах.

Наиболее существенно на корреляцию в системе почвы – растения влияют ЕКО, органический углерод, pH, карбонаты, электропроводность, TI. Претендующий на роль физиологически важного микроэлемента химический элемент должен удовлетворять следующим условиям незаменимости:

1) растения при отсутствии микроэлемента не могут покрыть все потребности роста;

2) потребность в микроэлементе не может быть покрыта другим элементом;

3) микроэлемент непосредственно участвует в питании растений.

Среди нескольких десятков элементов-загрязнителей, элементов-токсикантов к физиологически важным, по нашему мнению, могут быть уверено отнесены бор, марганец, кобальт, медь, цинк, молибден, йод. Микроэлементный состав почв, в том числе и черноземов Каменной Степи, является индикатором их состояния, свойств и генезиса. Микроэлементный состав может считаться в значительной степени итогом многообразных биогеохимических процессов. По мере развития, усложнения и углубнения процессов почвообразования структура системы микроэлементов усложняется.

Формирование микроэлементного состава черноземов Каменной Степи происходит в условиях, по большей части , непромывного водного режима в которых процессы выщелачивания микроэлементов ослабляются, а их биогенная аккумуляция усиливается (Протасова Н.А., Щербаков А.П., 2003).

2.1. Бор

Бор (B) – единственный неметалл в III группе периодической системы. В земной коре он распределен неоднородно. Содержание B в

магматических породах возрастает с увеличением их кислотности. В осадочных породах этот элемент связан с глинистой фракцией. Наибольшие количества В концентрируются в морских эвапоратах и морских глинистых осадках. Содержание в них бора может служить индикатором палеосолености. Следует, однако, отметить, что геохимия В характеризуется аномально широкими вариациями его концентраций в породах. В обстановке суши В присутствует в кислородных химических соединениях и образует ряд минералов, главным образом гидроксидов и силикатов, из которых наиболее широко в почвах представлены минералы группы турмалина.

Изучение поведения В в почвах показало, что В гораздо сильнее сорбируется почвой, чем другие анионы (например, Cl~ и NO3~). Тип сорбции В на поверхности глин сходен больше с сорбцией катионов, нежели анионов. В целом В сильнее удерживается полуторными окислами, чем глинистыми минералами, и водный оксид алюминия более эффективен в этом отношении, чем водный оксид железа. Бор содержится в продуктах вулканических извержений, осадочных породах, артезианских и морских водах, почвах и входит в состав растительных и животных организмов. Содержание бора в почвах составляет от 1 до 100 мг/кг.

Виноградов А.П. оценивает среднее содержание бора в почвах в 10–20 мг/кг. По нашим данным, для Русской равнины средневзвешенное содержание валового бора составляет в пахотном слое около 25 мг/кг. В пахотном слое черноземов эта величина составляет около 40 мг/кг (Зборищук Ю.Н., Зырин Н.Г., 1974).

В почвах можно обнаружить три основных механизма фиксации бора: анионный обмен, молекулярная адсорбция и химическое осаждение. На распределение подвижного бора в почвах оказывают влияние тип водного режима, грансостав, гидролитическая кислотность, сумма поглощенных оснований и характер использования почв.

Бор относится к числу рассеянных в природе микроэлементов и в небольших количествах встречается повсеместно (Перельман А.И., 1972). Он в небольших количествах содержится в вулканических извержениях, осадочных породах, артезианских и морских водах, почвах и входит в состав растительных и животных организмов. В почвах и почвообразующих породах бор встречается в составе многочисленных минералов.

По содержанию бора в почвах А.П. Виноградов (1957) выделяет на земном шаре два типа областей. Первый тип – области с обычным содержанием В в почвах – древние равнины; второй тип – геосинклинальные области – области недавнего вулканизма с почвами, богатыми В. Территория Центрального Черноземья относится к первому типу областей. Содержание В в почвах колеблется в очень широких пределах – от 1 до 100 мг/кг (Каталымов М.В., 1965). А.П. Виноградов полагает, что среднее содержание В для всех почв близко к 10-20 мг/кг. В.В. Ковальский и Г.А. Андрианова (1970) для чернозёмов указывают величину 31,3 мг/кг. Что касается содержания подвижного бора в почвах Русской равнины, то приводится среднее значение 1,66 мг/кг (Зырин Н.Г., Зборищук Ю.Н., 1975).

Бор характеризуется специфическими особенностями связи с минералами. Среди первичных минералов наибольшее влияние на уровень содержания бора оказывает присутствие турмалина. Это устойчивый минерал, который может длительно сохраняться при выветривании и почвообразовании в составе песчаных фракций. Второй максимум накопления приходится на тонкодисперсные фракции. Фиксация бора глинистыми минералами определяется особенностями их кристаллохимии.

Геохимически бор включается в одну группу с йодом и бромом. Данная группа близка к сере и хлору и наряду с высокой биофильностью отличается также интенсивной галогеохимической миграцией. В условиях коры выветривания и почвообразования бор, йод и бром относятся к элементам группы почвенных галлофилов.

Основные черты геохимии бора следующие:

1) В гипергенных условиях хорошо растворимы только бораты щелочных металлов, а кальций и магний образуют с бором относительно малорастворимые соединения, то есть кальций и магний нужно рассматривать как осадители бора, в том числе и в большинстве почв Каменной Степи.

2) Низкая растворимость борных соединений кальция и магния ограничивает миграционную способность бора в условиях земной поверхности.

3) Бор также хорошо осаждается с некоторыми соединениями алюминия, железа, марганца.

4) Бор подвижен в кислой и особенно щелочной среде, поэтому аккумуляция его приурочена к зонам распространения кислых и щелочных вод и к области их соприкосновения с сульфатными и хлоридными водами, несущими ионы кальция и магния.

Бор в почвах находится в четырёх формах (Goldschmidt V.M., Peters G., 1932; Mitchell R.L., 1964):

1) Алюмоборосиликаты – соединения типа турмалина, не растворимые даже в концентрированных кислотах.

2) Органо-борные соединения.

3) Бораты кальция, магния, натрия, растворимые в горячей воде или кислотах.

4) Борно-кислые соединения, растворимые в воде.

М.В. Каталымов (1965) выделяет 2 группы соединений В: сложные бороргаические и минеральные. Бороргаические соединения почв представлены соединениями типа эфиров борной кислоты с сахарами и многоатомными спиртами, которые образуются в процессе жизнедеятельности растений и попадают в почву с растительными остатками. Минеральные соединения бора, образующиеся в процессе минерализации его органических соединений, представлены боратами, содержащимися в материнской породе, а также продуктами распада последних. М.В Каталымов (1965), F.M.Eaton и L.Wilcox (1939) полагают, что основная масса В в почве находится в форме боро-силикатов и других борных минералов. P. Cornillon (1967) выделяет три основных механизма фиксации В в почвах: анионный обмен, молекулярная адсорбция и химическое осаждение. Возможны три типа механизма обмена анионов: 1 – протекает лишь на поверхности кристаллических частиц, 2 – идёт диффузно на известную глубину и даже на всю толщу минерала, 3 – происходит в процессе его перекристаллизации (Ермоленко Н Ф.1966).

Растворимость В зависит от форм его связи в почве. Наиболее растворимыми соединениями В являются борная кислота и её соли. В почвенных условиях она достаточно подвижна, слабо фиксируется почвой и может вымываться осадками (Бобко Е.В.,1963).

Гидраты оксидов Fe и Al, а также гуминовые кислоты всегда содержат группы OH, с которыми борная кислота может давать менее подвижные комплексные соединения. Борная кислота, поглощаясь на поверхности почвенных коллоидов, образует соли с основаниями и ка-

тионами металлов или комплексные кислоты с радикалами OH. Такие же реакции могут протекать между борной кислотой и глинистыми минералами. Известно, что оксиды Al и Fe, а также глинистые минералы, способны связывать значительные количества бора. Максимальное связывание B оксидом Al происходит при pH 5.4–7.7, а оксидом Fe и глинистыми минералами – при pH 8-9. При этом оксид Al способен адсорбировать B почти в 10 раз больше, чем оксид Fe. Растения могут усваивать B из его водорастворимых соединений, а также из соединений, растворимых в слабых кислотах.

Н.Г. Зырин и З.В. Пацукевич (1964) полагают, что растениям в некоторой степени доступны и нерастворимые в воде соединения бора. В усвояемые формы может переходить B почвенных минералов вследствие их выветривания и B органических веществ в результате их разложения. Подвижность B в почвах и его доступность растениям увеличиваются при внесении органических удобрений (Пейве Я.В., 1980). В кислых почвах бор находится в форме органических и труднодоступных минеральных соединений, связанных, главным образом, с оксидом Al. Усвояемый бор образуется здесь в результате расщепления бороорганических соединений и растворяющего действия кислого почвенного раствора на труднодоступные минеральные соединения B с образованием борной кислоты. В щелочной среде борорганические соединения становятся более стойкими и малодоступными растениям (Каталымов М.В.,1965). Нерастворимые формы микроэлементов служат резервом, из которого они постепенно поступают в почвенный раствор.

Н.А. Протасова и А.П. Щербаков (2003), основываясь на многолетних исследованиях почв Центрального Черноземья, говорят о сравнительно одинаковой обеспеченности бором различных подтипов чернозёмов и лугово-чернозёмных почв, вследствие однообразного содержания этого элемента в почвообразующих породах данного региона. Также их исследования подтверждают выводы Н.Г. Зырина и З.В. Пацукевич (1964) о том, что уровень B в почвах определяется не их типом, а характером материнских пород. Для типичных, реже обыкновенных и южных чернозёмов характерно незначительное накопление B в гумусовом горизонте по отношению к материнской породе.

В целом в чернозёмах региона сохраняются исходные запасы B благодаря водному режиму непромывного типа и нейтральной реак-

ции. Для B и его основного минерала турмалина часто характерно равномерное распределение по профилю. Отсутствие дифференциации количества B по профилю почв и очень небольшие различия в его содержании между подтипами чернозёмов Болгарии Т. Палавеев (1958) объясняет трудным высвобождением B из минералов и сильновыраженной миграцией освободившегося B.

По данным М.В. Каталымова (1965), только 25% B связано в чернозёмах с органическим веществом, поэтому в отличие от многих микроэлементов валовой B не коррелирует с гумусом. В.Б. Ильин (1973) считает, что абиогенная миграция B в ландшафтах затруднена вследствие интенсивного его поглощения растениями и микрофлорой. Однако растения усваивают не весь бор, а доступный, которого в почвах мало. Поэтому в малый биологический круговорот веществ вовлекается небольшая часть элемента. А.И. Перельман (1975) отмечает, что в степных почвах B находится в малодоступной форме и выносится из них слабо.

Н.А. Протасова и А.П. Щербаков (2003) говорят о зависимости содержания водорастворимого B в почвах Центрального Черноземья от того, насколько они выщелочены и оподзолены – в таких чернозёмах содержится меньше водорастворимых соединений B. R.L. Mitchell (1964) отмечает, что большие количества доступного B приурочены к почвам с высоким содержанием органического вещества. Однако это не является единственным определяющим фактором. Т. Палавеев (1958) полагает, что распределение подвижного B в почвах связано с интенсивностью процессов промывания. Оказывают влияние также такие почвенные показатели, как величина pH, гранулометрический состав, гидролитическая кислотность, сумма поглощённых катионов, а также характер использования. Особенно велико влияние гранулометрического состава. Чем легче по грансоставу почва, тем беднее она подвижным B. Например, чернозёмы средне- и легкосуглинистые содержат не более 1мг/кг подвижного B.

Известно, что Ca способствует фиксации B почвой, однако бораты Ca доступны растениям. Ca гумуса также связывает B, и этот процесс усиливается с увеличением pH. Концентрация подвижного B в почвах не является величиной постоянной. Исследования P. Cornillon (1967) показали, что количество растворимого B в почве варьирует в зависимости от выпадающих осадков. Меньшие количества B отвечают засушливым периодам, в то время как более высокое количество – пе-

риоду дождей. При небольшом количестве воды в раствор переходят легкорастворимые соединения В, при значительном – более стабильные соединения. Исследования, проводимые Н.А. Протасовой и А.П. Щербаковым, показали, что максимальное количество подвижного В в пахотном слое выщелоченного чернозёма наблюдается в начале вегетационного периода, минимальное – в его конце вследствие интенсивного поглощения элемента культурными растениями (Протасова Н.А. и др.1986).

В FAO soil bulletin, № 48 (1982) с использованием большого массива данных показано, что бор почвы и бор в растениях значимо коррелируют с шестью почвенными свойствами и между собой. По полученным результатам, согласно изданию, как и в случае с другими микроэлементами лучшая количественная информация о поведении бора была получена при анализе результатов вегетационного опыта с пшеницей.

Наивысшей была корреляция с pH и электропроводностью. Самое заметное воздействие на содержание бора в растениях и в почве оказывает ЕКО. ЕКО – свойство почв ответственное за нарушение корреляции подвижного бора в почве и содержанием бора в растениях. Содержание подвижного В в почвах увеличивается с увеличением ЕКО, достигая максимума при значениях ЕКО 35-45 мг-экв/100г почвы и уменьшается при дальнейшем увеличении ЕКО. Содержание подвижного бора в растениях количественно менее зависимо от ЕКО и максимум достигается уже при значениях показателя 20 мг-экв/100г почвы.

Бор имеет важное значение для метаболизма растений. Полагают, что его роль особенно существенна в переносе сахаров, поскольку боратно-полисахаридный комплекс более подвижен, нежели полярные молекулы сахаров. Влияние бора на метаболизм сахарной свеклы исследовалось многими авторами, показавшими, что определенная добавка В – необходимое условие синтеза сахара. Свойство борной кислоты образовывать комплекс с полисахаридами играет, как полагают, важную роль в пассивной сорбции этого элемента (Mengel K., Kirkby E.A., 1978). Один из наиболее важных факторов, воздействующих на биологическую доступность В для растений, – pH почв. Самый низкий коэффициент потребления В наблюдается при pH около 7. В щелочных почвах доступность В растет с повышением pH почв. Это может вызывать угрозу накопления В, особенно в промываемых солонцах (Bhumbla D. R., Chhabra R., 1962).

Поглощение B зависит от температуры и возрастает в теплые периоды. Бор относительно неподвижен в растениях, однако благодаря перемещению в основном через ксилему он заметно накапливается в старых листьях, причем наивысшие его содержания наблюдаются в их концах и на краях. Надземные части растений по сравнению с корнями содержат обычно больше бора. Бор по своей физиологической роли отличается от других микрокомпонентов питания: анионы бора не были идентифицированы в качестве компонента какого-либо специфического энзима. Несмотря на то, что B необходим для высших растений, его биохимическая роль до сих пор неясна. К настоящему времени проведено большое число физиологических экспериментов, обычно с растениями, испытывающими дефицит бора. Обзоры полученных в них результатов можно найти в ряде работ (Корякина В.Ф. 1974).

Функции бора связаны со следующими основными процессами:

1) метаболизмом углеводов и переносом сахаров через мембраны;

2) синтезом нуклеиновых кислот (ДНК и РНК) и фитогормонов;

3) образованием стенок клеток;

4) развитием тканей (предполагается участие его в качестве агента переноса).

Для некоторых видов растений характерно развитие дефицита бора и его недостаточность для ряда основных сельскохозяйственных культур – например, сахарной и кормовой свеклы, сельдерея, подсолнечника, бобовых, яблонь. Из числа специфических симптомов недостаточности B первыми проявляются задержка и ненормальное развитие ростовых точек, голубовато-зеленая окраска молодых листьев и ухудшение образования плодов.

Способы определения доступности B и потребности в нем растений интенсивно исследовались. Было установлено, что анализы на содержание воднорастворимого бора в почвах и растительных тканях позволяют диагностировать и предсказывать дефицит этого элемента. Некоторые виды растений обладают низкой потребностью в боре и могут быть чувствительны к повышенным уровням содержания, даже если последние лишь ненамного превышают необходимые для нормального роста. Поэтому токсичное действие B возрастает при интенсивном применении борсодержащих удобрений.

Кроме борного голодания, которое легко устранить, существует проблема избытка бора. Избыток этого элемента вызывает торможение роста всего растения (Мальгин М.А., 1978), на старых листьях и

по краям появляется жёлтая кайма, затем эти ткани отмирают (Бумбу Я.В., 1986), в итоге лист приобретает куполообразную форму. При сильном избытке бора поражаются и более молодые листья, при этом снижается урожай (Нелюбова Г.Л., Церлинг В.В.,1979). При избытке бора в питательной среде в небольших количествах он скапливается в листьях растений, а катионнообменная ёмкость корней снижается.

Согласно данным В.В. Ковальского, Г.А. Андрианова (1970), пороговая концентрация бора в почве, выше которой проявляется отрицательное влияние этого микроэлемента на организм, составляет 30 мг/кг. Шеуджен А.Х. и др. (1995) установили ПДК бора для растений в почве, равную 100мг/кг. Такой широкий диапазон объясняется тем, что различные виды растений по-разному реагируют на избыток бора.

2.2. Хром

Металлический хром был впервые изучен А. Беекерелем в 1843 году, а в 1883 году был выделен металлический хром. В химических реакциях Cr наиболее часто проявляет степени окисления +2; +3 и +6. Среди них относительно устойчивы соединения Cr^{+3}. Хром химически малоактивен. С увеличением степени окисления возрастают кислотные свойства хрома. Ион Cr^{2+} образуется на первой стадии растворения хрома в кислотах или при восстановлении Cr^{3+} в кислом растворе. Хром образует большое количество солей с кислородсодержащими кислотами и обнаруживается во всех природных объектах.

Поведение хрома в окружающей среде зависит как от pH, так и от ОВП. При одном и том же значении Eh в 500 мВ в интервале pH 5-7 преобладает Cr^{3+}, а при pH>7 – Cr^{6+} (Шеуджен А.Х., 2003). Хром в почвах содержится в количестве 5–50 мг/кг, а в сильнозагрязненных почвах до 2000 мг/ кг. Трехвалентный хром по поведению в почвах и химическим свойствам очень похож на алюминий, особенно по отношению к изменению кислотности среды.

Хром и его соединения адсорбируются гумусом и глинистыми минералами с образованием комплексных соединений. Окисление трехвалентного хрома происходит постоянно в условиях, характерных для большинства почв. Форма, подвижность и миграция соединений хрома определяются:

1) содержанием элемента в почвообразующих породах;

2) составом и условиями формирования почв, содержанием в них глинистых минералов, полуторных окислов железа, алюминия, реакцией среды и окислительно-восстановительного режима;

3) равновесием между органическими и минеральными компонентами в системе почва – растение.

В почвах хром представлен следующими формами его соединений:

1) неподвижные;

2) прочносвязанные в составе первичных и вторичных глинистых мине-ралов с полуторными окислами железа и алюминия;

3) обменносвязанные на поверхности полуторных оксидов и глинистых минералов;

4) связанные с органическим веществом почв;

5) водорастворимые соединения.

Токсичность Cr зависит от степени его окисления и присутствия доступных для растений хроматов.

Концентрация валового хрома в почвах, как правило, возрастает от сельских поселений к индустриальным центрам (Водяницкий Ю.Н., 2009). Для подвижных форм элемента предельно допустимая концентрация (ПДК) составляет 6 мг/кг, а для валовых – она еще устанавливается. Отсутствие обоснованного значения ПДК для валового хрома не позволяет оценить его относительную опасность. Токсичность Cr часто зависит от его окислительного состояния. Хромат оксианиона CrO_4^{2-} активно мигрирует в почвах. Восстановленная форма (Cr^{3+}) часто образует малорастворимый гидроксид и прочные комплексы с почвенными минералами. Вероятность редукции Cr^{6+} до Cr^{3+} позволяет надеяться на уменьшение влияния этого токсина (Водяницкий Ю.Н., 2009).

При мониторинге и оценках состояния компонентов окружающей среды, учитывая заметную токсичность Cr, его следует обязательно включать в число исследуемых приоритетных загрязнителей. Кларк хрома $8{,}3 \cdot 10^{-3}$ % (Перельман А.И., Касимов Н.С.,1999). В земной коре и биосфере преобладает малоподвижный Cr^{+3}. Менее распространены окисленные, менее стабильные формы Cr^{+6}. В кислой и нейтральной среде в восстановительных для хрома условиях он слабо подвижен (Cr^{+3}) и может, вероятно, мигрировать в щелочной резко окислительной обстановке в форме CrO_4^{2-} . В почвах мира кларк хрома $5\text{-}7 \cdot 10^{-3}$ %. Приведенные существенно разные величины кларка своим существованием наглядно иллюстрируют нерешенность проблемы оценки этого важного показателя.

Для хрома не характерна биогенная миграция. В резко окислительной щелочной среде возможно его окисление до Cr^{+6} с появлением

легко растворимых хроматов. Обычно хром концентрируется на сорбционно-глеевых барьерах в иллювиальных и глеевых горизонтах луговых и осолоделых почв.

Анализ распределения хрома в континентальных отложениях показывает, что наиболее значительные его концентрации характерны для ультраосновных и основных горных пород. Содержание хрома в кислых изверженных и осадочных породах значительно ниже и в общем случае изменяется в пределах 5-120 мг/кг, достигая максимальных значений в глинах.

Поведение хрома в почвах детально изучалось многими исследователями. Было установлено, что большая часть хрома в почвах присутствует в виде Cr^{3+}, входит в состав минералов или образует различные Cr^{+6}- и Fe^{+3}– оксиды. Поскольку Cr^{+3} в очень кислой среде инертен (при pH 5,5 он почти полностью выпадает в осадок), его соединения в почвах считаются весьма стабильными. С другой стороны, Cr^{+6} крайне нестабилен и легко мобилизуется как в кислых, так и в щелочных почвах. Эль-Бассам и др. подчеркивают, что поведение хрома зависит как от pH, так и от окислительно-восстановительного потенциала почв. Гриффин и др. обнаружили, что адсорбция хрома глинами также сильно зависит от pH среды. Например, с увеличением pH адсорбция Cr^{+6} уменьшалась, а адсорбция Cr^{+3} увеличивалась. На поведение хрома в почвах большое влияние могут оказывать и органические комплексы. В частности, доминирующее влияние органиче-ского вещества сказывается в стимуляции восстановления Cr^{+6} до Cr^{+3}.

Легкость, с которой растворимый Cr^{+6} при нормальных почвенных условиях переходит в нерастворимый Cr^{+3}, является важным моментом в поведении этого элемента, поскольку именно с ней связана относительная доступность хрома для растений. Как правило, в литературе приводятся данные о восстановлении Cr^{+3} и Cr^{+4}. В то же время в почвах может наблюдаться и окисление Cr^{+3}, по-видимому, в результате окисляющей способности соединений хрома (Любимова И.Н., 1979).

Содержание хрома в почвах зависит от такового в материнских породах. Именно поэтому его наиболее высокие концентрации отмечены для почв на основных и вулканических породах. Общее среднее содержание Cr в поверхностном слое почв США и мира в целом оценивается в 54-65 мг/кг соответственно. В почвах Китая, образовавшихся на известняках, содержание хрома изменяется в пределах 22-500 мг/кг, при среднем значении 150 мг/кг.

Снижение подвижности хрома в почвах может приводить к его дефициту в растениях. Хром – физиологически важный микроэлемент, жизненно необходимый для животных и человека. Легко растворимый в почвах Cr^{+6} токсичен для растений и животных. С этих позиций большой интерес представляет изучение изменчивости состояний окисления хрома.

В результате антропогенного загрязнения отмечается возрастание содержания хрома в поверхностном слое почв. Главными его источниками являются некоторые промышленные отходы (гальванические осадки, отходы кожевенных заводов и производств, где хром используется в составе пигментов и красителей) и осадки сточных вод. Поступающий из техногенных источников хром обычно накапливается в тонком поверхностном слое почв.

Известно, что известкование, а также применение фосфора и органических веществ заметно снижают токсичность хроматов в загрязненных почвах. При загрязнении почв Cr^{+6} подкисление и затем применение восстанавливающих агентов (например, серы и листовой подстилки) могут использоваться для интенсификации восстановления этого иона, после чего рационально проведение известкования почв, которое содействует осаждению соединений Cr^{+3} . В природных условиях проявления редукции и последующая судьба Cr(VI) часто обусловлены суммарной химической и биологической кинетикой редукции. Хром относится к химическим элементам слабого биологического захвата. Для этого элемента не характерна биогенная аккумуляция в почвах. В степях в резкоокислительной щелочной среде возможно окисление хрома до Cr^{+4} с образованием легкорастворимых хроматов калия и кальция.

2.3. Марганец

Кларк элемента в литосфере 0,09 %, в почве – 0,085 % (Виноградов А.П., 1962). Почвообразующие породы Русской равнины – покровные, валунные, лессовидные суглинки, глины, лессы содержат, как правило, много марганца. Валовое содержание Mn в пахотном слое основных почв европейской России 300–1300 мг/кг. В слое 0-20см черноземов обыкновенных его валовое количество в среднем около 650 мг/кг, при типичных значениях 530–680 мг/кг.

Марганец химически достаточно активен. При нагревании он энергично реагирует с неметаллами – кислород, азот, углерод, фтор.

В соединениях марганец проявляет валентность от 2 до 7, наиболее устойчивы степени окисления +2;+4 и +7. Двухвалентный Mn – типичный металл, образующий многочисленные соединения. Возможности водной миграции Mn^{2+} шире, чем у Fe^{2+}. В болотных ландшафтах на карбонатных породах в условиях карбонатного оглеения наблюдается заметная миграция марганца, а в условиях повышения окислительного потенциала – и его аккумуляция (Шеуджен А.Х., 2003).

В почве марганец находится в следующих формах: минеральная фракция, растворимый марганец, обменный марганец и фракция органических комплексов (Барбер С.А.,1988). Среди множества форм марганца лишь две легко доступны растениям – водорастворимая и обменная.

Оксиды марганца обладают способностью катализировать реакции полимеризации органических соединений почвы, окисляя фенолы и хиноны, они участвуют в гумусообразовании. Окисление Mn^{2+} микроорганизмами происходит с участием продуктов неполного восстановления кислорода. Ферментативное окисление марганца с участием каталазы имеет место при низкой скорости образования H_2O_2 и при низком содержании легкоокисляемого органического вещества.

Несмотря на большое количество данных, подтверждающих и детально характеризующих участие марганца в процессах функционирования растительной клетки, относительно мало известно о механизме действия этого элемента (Чернавина И.А. 1970). Установлено значение трехвалентного марганца для фотосинтеза и тесная взаимосвязь элемента с пигментным комплексом II, ответственным за выделение кислорода. В присутствии марганца наблюдается активирование фотосинтетической пиридиннуклеотидредуктазы. Имеются доказательства участия марганца во многих окислительно-восстановительных процессах растений. Mn найден в составе катализаторов анаэробной и аэробной фаз дыхания. Роль марганца в окислительно-восстановительных трансформа-циях дыхательных субстратов связана с его каталитическим влиянием в сочетании с пероксидазной системой растений.

Для биосферы и ландшафтов наиболее характерны Mn^{+2}, Mn^{+3}, Mn^{+4}. Поведение и формы нахождения марганца в биосфере определяются в основном соотношением pH и Eh, а в почвах осаждение элемента происходит при участии компонентов биоты. Марганец более активный водный мигрант, чем железо. Подавляющая часть марганца

в природных водах (более 90%) мигрирует во взвешенном состоянии. Марганец, в частности двухвалентный, плохо гидролизуется, поэтому в почвах доминируют оксиды марганца (Водяницкий Ю.Н. и др., 2004). Они, возможно, закрепляют в почвах катионногенные тяжелые металлы. В то же время окисление анионогенного хрома оксидами марганца приводит к увеличению его подвижности и повышению токсичности хрома (Водяницкий Ю.Н. 2009).

Черноземы, как правило, обычно содержат больше Mn, чем почвы гумидных ландшафтов из-за преобладания щелочной окислительной среды, которая препятствует миграции марганца.

Марганец присутствует в почвах в составе оксидов и гидроксидов, образующих часто пленки на почвенных отдельностях, конкрециях, включения. Различают следующие формы марганца в почвах: минеральная, растворимая, обменная и фракция органо-минеральных комплексов. При этом в последнем случае повышение значений pH заметно уменьшает количество вытесняемого марганца как обменного, так и связанного с органическим веществом почвы (Барбер С.А., 1988). Оксиды марганца, по большей части, прочно фиксируют тяжелые металлы-манганофилы Co, Ni, Zn (Manceau et.al, 2000). Хотя Fe и Mn образуют в коре выветривания и почвах единое новообразование, они отчетливо разделены в микромасштабе формирования содержания и структуры ортштейнов, что вероятно свидетельствует о раздельном образовании кристаллов гидроксидов железа и оксидов марганца (Manceau et.al, 2002).

Наиболее легкодоступными, по многочисленным данным, являются фосфат и карбонат Mn, а также гидроксиды и окислы этого элемента. Марганец органо-минеральных комплексов почв потенциально доступен. При недостатке марганца в растении накапливается закисное железо, а при его избытке – окисное железо, в результате чего развивается хлороз растений (Протасова Н.А., Щербаков А.П. 2003). У растений признаки недостатка марганца чаще всего наблюдаются на карбонатных почвах, к которым с некоторой долей условности могут быть отнесены черноземы обыкновенные. Есть данные, что Mn положительно влияет на морозоустойчивость растений.

В пахотном слое почв европейской России содержится в среднем от 20 до 200 мг/ кг Mn подвижного (Зборищук Ю. Н., Зырин Н.Г., 1977). Черноземы обыкновенные и лугово-черноземные почвы характеризуются наименьшими количествами подвижного марганца в слое 0-20см

среди почв Русской равнины в силу определенных особенностей условий почвообразования и характера свойств почв. В пределах степной зоны, судя по имеющимся литературным данным (Протасова Н.А., Щербаков А.П., 2003), марганец скорее рассеивается в почвах региона, во всяком случае, в их пахотных горизонтах.

2.4. Кобальт

В природе кобальт мало распространен. Его кларк в литосфере $4 \cdot 10^{-3}$ %, в почве – $1 \cdot 10^{-3}$ % (Виноградов А.П., 1962). В биосфере кобальт мигрирует слабо и преимущественно рассеивается. Со относится к подвижным и слабоподвижным мигрантам в восстановительной глеевой среде и инертным – в окислительной обстановке. В почвообразующих породах кобальта часто значительно меньше кларка литосферы и для Со в этих случаях характерно сильное рассеяние.

В химических соединениях кобальт проявляет переменную валентность: в простых соединениях наиболее устойчив двухвалентный кобальт, а в комплексных соединениях – трехвалентный. По химическим свойствам кобальт близок к железу, но менее активен. В кислотах кобальт растворяется с образованием солей Со. Тесно связанный с биогеохимическими циклами железа и марганца, Со встречается в ионной форме Co^{2+} и Co^{3+}. В кислой среде кобадьт относительно подвижен, но не мигрирует из-за заметной сорбции оксидами железа и марганца (Шеуджен А.Х., 2003). С увеличением pH сорбция Со оксидами марганца резко увеличивается.

В гумидных ландшафтах кобальт выщелачивается из почв, мало его и в растениях. В сухом климате кобальт мигрирует в почвах слабо и дефицит Со наблюдается реже. Заметная часть кобальта в различных экологических условиях мигрирует с глинистыми взвесями. При высоком ОВП происходит окисление Co^{2+} до Co^{3+} и накопление элемента вместе с гидроксидами марганца (Шеуджен А.Х., 2003). Примерно 95% кобальта почвы закреплено органическим веществом, в решетке глинистых минералов и окклюдировано полуторными окислами в труднодоступном для большинства растений состоянии и лишь 5% кобальта находится в обменной форме. Элемент часто образует устойчивые окислы и является геохимическим спутником марганца и железа (Зырин Н.Г., Титова А.А., 1979). В природных условиях геохимических циклов железа и марганца кобальт встречается в ионных формах Co^{+2} и Co^{+3} и образует комплексный анион $Co\ (OH)^{-3}$.

Кобальт входит в состав витамина B_{12}, который содержит 4,5% кобальта. Элемент играет важную роль в кроветворении, синтезе белков, усвоении жиров и углеводов животных (Девис Д., Перрет М., 1980). Фибрин крови является кобальтовым белком (Ковальский В.В, 1974). Недостаток витамина B_{12} вызывает заболевание животных акобальтозом. Роль кобальта в жизни растений до сих пор недостаточно изучена. Со положительно влияет на устойчивость растений к неблагоприятным условиям среды.

Содержание кобальта в почвах определяется в основном составом и происхождением почвообразующих пород и типом почвообразования. Согласно данным Н.Г. Зырина, А.А.Титовой (1979) и Ю.Н. Зборищук (1977) валовое содержание Со в пахотном слое европейской части бывшего СССР увеличивается с северо-запада на юго-восток и восток к Уралу. Среднее валовое содержание Со в слое 0-20 см почв европейской России составляет 2,5–20 мг/кг. Содержание подвижного Со в пахотном слое почв европейской России составляет 0,3–4,2 мг/кг. Максимальными величинами содержания как валового, так и подвижного Со отличаются черноземы обыкновенные.

В почвах Со находится в следующих формах: валовая, водорастворимая, легкообменная, кислоторастворимая и необменная.

Подвижность и доступность кобальта почвы зависит от гранулометрического состава, величины pH, содержания гумуса. Известно, что чем выше pH, тем больше Со связывается гуминовыми кислотами. К факторам, способствующим увеличению подвижности и доступности кобальта в почве относят снижение pH, внесение физиологически кислых удобрений, разложение пожнивных и корневых остатков.

По данным Н.А. Протасовой и А.П. Щербакова (2003) существует тес-ная связь между распределением Со, гумуса, обменных оснований и величины pH в профиле черноземов обыкновенных. Распределение подвижного кобальта по профилю черноземов обыкновенных аналогично таковому для валового кобальта.

2.5. Никель

Никель геохимически сходен с кобальтом. Биогеохимическая роль элемента не вполне выяснена, хотя он часто встречается в растениях, что позволяет предположить сходное с Со воздействие никеля на физиологические процессы. Никель оказывает неспецифическое вли-

яние на ряд металлоферментных комплексов. Он способствует образованию спиральной структуры нуклеиновых кислот, входит в состав гормона инсулина. Никель активирует аргиназу, трипсин, оксилоацетатдекарбоксилазу, ряд пептидаз, действующих на азотсодержа-щие группировки. Никель принадлежит к числу элементов, вызывающих эндемические болезни растений – хлорозы и некрозы (Протасова Н.А., Щербаков А.П., 2003). Для злаковых растений получены данные о влиянии никеля на активность нитратредуктазы, играющей важную роль, как в восстановлении нитратов, так и в азотфиксации. Физиологи установили сходство биологического действия никеля и кобальта в процессах кроветво-рения.

Кларк никеля в литосфере $1 \cdot 10^{-2}$ %, в почвах – $5 \cdot 10^{-3}$ % (Виноградов А.П., 1957). В осадочных породах содержится от 5 до 90 мг/кг Ni. В почве содержится 20-50 мг/кг никеля. Предельно допустимая концентрация элемента в почвах – 50 мг/кг. Среднее содержание никеля в почвах России от 11 до 33 мг/кг, в том числе в черноземах около 30 мг/кг.

Валовое содержание Ni в почвах зависит от его количества в почвообразующих породах, особенностей почвообразовательного процесса. В степных ландшафтах он малоподвижен и не выносится из почвенной толщи. Накопление никеля обнаруживается в иллювиальных карбонатных горизонтах черноземов, илистой фракции, обогащенной минералами типа монтмориллонита. В.А. Ковда (1985) считал, что никель адсорбируется гидроксидами Fe и Mn, глинистыми минералами и гумусом. Ni образует растворимые комплексные соединения с органическим веществом почв. В нейтральной и окислительной средах Ni слабо подвижен, а в резко восстановительной среде он инертен. На щелочном барьере никель осаждается, и миграция осуществляется только в составе взвесей.

В распределении никеля, кобальта и железа в земной коре отмечается большое сходство. Так, наиболее высокие содержания никеля характерны для ультраосновных пород (1400-2000 мг/кг); с увеличением кислотности горных пород его концентрации уменьшаются до 5-15 мг/кг в гранитах. В осадочных породах содержится от 5 до 90 мг/кг, причем наиболее высокие значения характерны для глинистых отложений, а наиболее низкие – для песчаников. Доказано существенное химическое сродство никеля с марганцем в составе оксида вернадита. В верхних горизонтах почв никель присутствует главным образом в

органически связанных формах, часть из которых может быть представлена легкорастворимыми хелатами. Формы соединений никеля, связанные с оксидами железа и марганца, по-видимому, наиболее доступны для растений. В биосфере относительно тесные геохимические связи никеля, марганца и железа нарушаются, и каждый из элементов мигрирует и аккумулируется по-разному.

В континентальных отложениях никель присутствует в основном в виде сульфидов и арсенидов и часто замещает железо в железомагнезиальных соединениях. При выветривании никель легко высвобождается, а затем осаждается с оксидами железа и марганца. Подобно двухвалентным катионам марганца и железа двухвалентный никель относительно стабилен в водных растворах и способен мигрировать на значительные расстояния.

Распределение никеля в почвенном профиле зависит от содержания как органического вещества, так и аморфных оксидов и глинистой фракции, которое определяется типом почв. Содержания никеля в почвах мира колеблются в широких пределах – от 1 до примерно 100 мг/кг, а в почвах США – от <5 до 200 мг/кг.

Самые высокие концентрации никеля наблюдаются в глинистых и суглинистых почвах, в почвах на основных и вулканических породах и в почвах, богатых органикой. Особенно высокими уровнями содержаний отличаются торфянистые серпентинитовые почвы, в которых никель присутствует в виде легкорастворимых органических комплексов. Почвы аридных и семиаридных регионов, вероятно, также характеризуются высокими концентрациями никеля. Общее среднее для почв земного шара оценивается в 20 мг/кг. В настоящее время никель считается серьезным поллютантом, поступающим в окружающую среду с выбросами металлообрабатывающих предприятий и в связи с растущими темпами сжигания угля и нефти. Применение твердого осадка сточных вод и некоторых фосфатных удобрений также может быть важным источником его поступления в почвы. Антропогенные источники никеля, в частности промышленная деятельность, приводят к существенному увеличению его содержания в почвах. В осадках сточных вод никель присутствует главным образом в форме легкодоступных органических хелатов, т. е. может быть фитотоксичным. Обработка почв, например внесение фосфатов или органического вещества, способствует снижению доступности Ni для растений.

2.6. Медь

Среди пород земной коры повышенные содержания меди свойственны основным и средним горным породам, а пониженные – карбонатным (Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989). Cu образует большое число минералов, из которых наиболее распространенные первичные минералы – простые и сложные сульфиды. Они довольно легко выветриваются и высвобождают ионы меди. Особенно характерно это для кислых сред, где Cu можно считать одним из наиболее подвижных тяжелых металлов зоны гипергенеза. В то же время катионы меди в почвах и осадочных породах проявляют большую склонность к сорбционному взаимодействию с минеральными (например двуокись марганца) и органическими компонентами (фульво- и гуминовые кислоты) (Перельман А.И., Касимов Н. С. 1999). Ионы Cu могут также легко осаждаться такими анионами, как сульфид, карбонат и гидроксид, то есть, медь может быть относительно малоподвижным элементом в почвах, и ее суммарные содержания обнаруживают сравнительно слабые вариации в почвенных профилях (Зырин Н.Г. и др., 1979; Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989).

Несмотря на то, что в агрономической практике важное значение имеют растворимые, а, следовательно, подвижные и доступные формы Cu в почвах, при геохимических исследованиях основная доля получаемой информации – это валовые содержания Cu в почвах. Кларк меди в литосфере – $4{,}7 \cdot 10^{-3}$. Что касается средних валовых содержаний Cu в почвах мира, то они колеблются в пределах 6–60 мг/кг, достигая максимума в ферраллитных почвах и минимума – в песчаных. Закономерности распределения Cu в почвах определяются, прежде всего, двумя фактора – почвообразующие породы и особенности почвообразовательных процессов.

В почвенном профиле медь обычно аккумулируется в верхних горизонтах. Это явление есть результат действия разных факторов, но прежде всего концентрация Cu в верхнем слое почвы отражает ее биоаккумуляцию, а также возможное антропогенное влияние. Преобладающей обычно в поверхностных горизонтах почвы подвижной формой меди является катион с валентностью +2, однако в почвах могут присутствовать и другие ионные формы. Впрочем, ионы меди способны прочно удерживаться в обменных позициях как на неорганических, так и на органических веществах. Процессы, контролирующие фиксацию меди в почвах, связаны со следующими явлениями:

1) адсорбция;

2) окклюзия и соосаждение;

3) образование органических хелатов и комплексообразование;

4) микробиологическая фиксация.

Микробиологическая фиксация меди является важным звеном в её биологическом круговороте. Она может иметь большое значение как для круговорота микроэлемента в почве, так и доступности его растениям. А.П. Виноградов (1957) определяет среднее содержание Cu в почвах, равное 20 мг/кг, в чернозёмах – 30 мг/кг.

В почве различают следующие формы меди (Пейве Я.В.,1980):

1) водорастворимая Cu;

2) обменная Cu, поглощенная органическими и минеральными коллоидами;

3) труднорастворимые медные соли;

4) медьсодержащие минералы;

5) металлорганические соединения.

Лишь очень небольшое количество Cu (менее 1%) находится в почве в виде водорастворимых солей. Для питания растений особое значение имеет не валовое содержание меди, а количество её подвижных форм в почве. Я.В. Пейве (1961) утверждал, что эта форма меди не является химически индивидуальным соединением, а характеризует наиболее растворимую часть меди, переходящую в вытяжки разбавленных кислот.

Проведенные И.Н. Антиповым-Каратаевым (1947), Я.В. Пейве (1961) и М.В. Каталымовым (1957) исследования показывают, что содержание подвижной меди в почвах бывшего СССР колеблется в пределах 30 мг/кг. Наиболее бедны медью (извлекаемой 1н. HCl) песчаные и супесчаные почвы (около 2 мг/кг). Больше подвижной меди содержат чернозёмы (от 7 до 30 мг/кг, среднее содержание 7–9 мг/кг).

Содержание подвижной меди в чернозёмах Центрального Черноземья близко к её среднему количеству, установленному В.В. Ковальским и Г.А. Адриановой (1970) для чернозёмов – 3,9 мг/кг. Концентрация подвижной меди в гумусовых горизонтах обычно составляет 9–30 % валового содержания. Вероятно, содержание органического углерода заметно влияет на корреляцию между концентрациями меди в почвах и в растениях (FAO soil bulletin № 48,1982).

Повышенным количеством подвижной меди характеризуются выщелоченные чернозёмы (4,9 мг/кг), пониженным – обыкновенные кар-

бонатные чернозёмы (2,6 мг/кг), что обусловлено физико-химическим действием карбоната кальция, сорбирующим и прочно удерживающим Cu на поверхности своих частиц (Виноградов А.П., 1957).

По данным Я.В. Пейве (1961), факторами, увеличивающими подвижность почвенной меди, являются:

1) подкисление почвы;

2) внесение физиологически кислых азотных и калийных минеральных удобрений;

3) минерализация органического вещества микроорганизмами;

4) накопление в почвах нитратов и аммиака.

Медь поступает в растения в форме катиона или хелатных соединений. В растительном организме она присутствует в виде ионов и комплексных органических соединений. В организме растений медь чаще всего связана с митохондриями и играет существенную роль в биохимических процессах. Физиологическая роль меди в значительной степени определяется также её вхождением в состав уринооксидазы – фермента, производящего окисление мочевой кислоты. Также к медьсодержащим энзимам относится тирозиназа – фермент, осуществляющий синтез пигмента меланина за счёт окисления аминокислоты тирозина. Отсутствие данного фермента вызывает альбинизм у растений. Медь входит в состав пластоцианина (который участвует в переносе электронов между первой и второй фотосистемами), соответственно, играет важную роль в процессе фотосинтеза (Мутускин А.А.,1970; Островская Л.К., 1961).

Благодаря способности меди переходить из двухвалентного в одновалентное состояние, она служит как донором, так и акцептором электронов – тем самым, выполняет функции и окислителя, и восстановителя (Фриден Я., 1964).

Значительна роль меди в азотном обмене растений. Достаточная обеспеченность их этим элементом является необходимым условием включения его в органические соединения. Особая роль принадлежит меди в фиксации атмосферного азота (Жизневская Г.Я, 1964). Оптимальным уровнем обеспеченности растений медью считается её содержание в почве не ниже 2,5–3,5 мг/кг (Даутов Р.К., Минибаев В.Г., Гайсин И.А, 1985). При более низком содержании появляются признаки медной недостаточности: повышается интенсивность транспирации и дыхания листьев; нарушается регулирующий механизм устьиц; ослабляется фотосинтез и активность ферментов группы оксиредуктаз

(Тарасов В.М., Коваленко В.Ф., 1973). В степных ландшафтах с нейтральными и щелочными водами и почвами медь малоподвижна, что определяет относительно высокое содержание меди в черноземах.

А.А. Кулагин, Ю.А. Шагиева (2005) указывают на существование двух видов реакции растений на избыток меди: латентное отравление, когда они уже не могут давать оптимальные приросты, а симптомы отравления почти не выявляются, и острое отравление, когда повреждения резко выражены. Высокое содержание органического вещества и карбонатов, щелочная реакция среды, наличие значительного количества глинистых минералов способствуют увеличению концентрации меди в почвах.

Преобладающая часть высвобождаемого из почвообразующих минералов микроэлемента мигрирует с глинистыми частицами, адсорбирующими медь. Наиболее энергично Cu мигрирует с сернокислыми грунтовыми водами, где образуется легкорастворимый по большей части сульфат меди. В гипергенных условиях Cu является одним из самых подвижных химических элементов. Однако такая миграция непродолжительна, и медь в почвах относительно малоподвижна и ее суммарное содержание обнаруживает сравнительно слабую вариацию в пределах почвенных профилей (Кабата-Пендиас А., Пендиас Х., 1989).

Участие меди в процессах обмена, жизненно важных функциях растений связано с вхождением меди в дыхательный фермент цитохромоксидаза и медьсодержащий белок пластоцианин (Чернавина И.А., 1970). Пластоцианин – переносчик электронов при фотосинтезе, он участвует в образовании сильного фотовосстановителя Х. Медь активирует реакции восстановления нитритов, фиксацию молекулярного азота, ее действие связано с функцией протеаз, когда при дефиците меди имеет место задержка распада белка.

2.7. Цинк

Кларк цинка в литосфере и почвах $8{,}3 \cdot 10^{-3}$ % (Перельман А.И., Касимов Н.С.,1999). Известно около 70 минералов цинка. Одни из часто встречаемых почвообразующих пород европейской части России – лессы и лессовидные суглинки содержат 40-80 мг/кг цинка, а покровные суглинки – 30-70 мг/кг. В пределах черноземной зоны часто создаются экологические условия для рассеяния цинка. В ландшафтах цинк

может иметь высокую интенсивность миграции. В то же время цинк относительно легко адсорбируется как минеральными, так органическими компонентами почв. Одной из причин колебания содержания Zn в почве является разнообразие почвообразующих пород.

В пахотном слое основных типов почв европейской части России содержится 10-90 мг/кг цинка (Зборищук Ю.Н., Зырин Н.Г.,1978). В пахотном слое черноземов обыкновенных по литературным данным среднее содержание цинка около 60 мг/кг, а в лугово-черноземных почвах – 90 мг/кг.

По токсичности цинк относится к первому классу опасности. Техногенное загрязнение цинком интенсивно и разнообразно. Антропогенное поступление элемента в почву происходит с цинковыми удобрениями, осадками сточных вод и с воздушной промышленной пылью. Представляют опасность локальные, интенсивные источники загрязнения цинком.

Распределение цинка по профилю почв относительно равномерно и хорошо согласуется с особенностями и характером почвообразовательного процесса. Существование тех или иных форм цинка в почвах определяется составом и свойствами почвообразующих пород, генезисом почв, массообменном в почве, реакцией среды и окислительно-восстановительными условиями.

Для цинка характерно комплексообразование с органическим веществом почв и осаждение в виде сульфида с закреплением в органогенных почвах и торфах. Окисление сульфида и органики может вызвать выход Zn в почвенный раствор.

Распределение цинка по профилю большинства почв достаточно равномерное. Усложняют распределение цинка по профилю органическое вещество, глинистая фракция, карбонаты. Гуминовые кислоты в состоянии золя при нейтральной реакции способны образовать гумат цинка и этот элемент накапливается. С возрастанием значений текстурного индекса (TI) концентрации цинка как правило уменьшаются до минимума в почвах среднего гранулометрического состава и увеличиваются в дальнейшем по мере утяжеления грансостава почв (FAO soil bulletin № 48, 1982).

В органогенных почвах протекающие в окислительных условиях реакции приводят к окислению сульфидов цинка и органического вещества. Это создает условия для перевода цинка в подвижную форму в почвенный раствор. Подвижность цинка в почвах, в основном, кон-

тролируется образованием вторичных минералов (Водяницкий Ю.Н, 2009). Тетраэдрическая координация цинка в составе высокодисперсного и химически активного почвенного ферригидрита доказывает, что ферригидрит это главная цинксодержащая фаза многих почв гумидного климата.

С увеличением электропроводности почв содержание цинка в растениях уменьшается, в то время как извлекаемый цинк почв имеет вначале тенденцию к увеличению, а затем уменьшается при достаточно высоких значениях электропроводности.

Содержание подвижного цинка в слое 0-20 см почв европейской России составляет 0,2–3,2 мг/кг. Баланс Zn в горизонте А почв в различных экосистемах свидетельствует, что атмосферное поступление этого металла превышает его миграцию за счет выщелачивания и образования биомассы. Основной и наиболее подвижной формой Zn в почвах считается Zn^{2+} , однако в почвах могут присутствовать и некоторые другие ионные формы.

Главные факторы, контролирующие подвижность Zn в почвах, сходны с указанными выше для Cu, однако Zn, по-видимому, присутствует в почвах в более подвижных формах. Большое число исследований по адсорбции и удержанию Zn в почвах свидетельствует, что глины и органические вещества почв способны довольно сильно удерживать Zn, поэтому подвижность его в условиях почв ниже по сравнению с $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$ и $Zn_3(PO_4)_2$ в чистых экспериментальных системах. Процессы, участвующие в адсорбции Zn, еще не вполне понятны, однако, существуют два различных механизма адсорбции: один – в кислой среде – связан с катионным обменом, а другой – в щелочной среде – рассматривается как хемосорбция и сильно зависит от присутствия органических лигандов.

Органическое вещество почв способно связывать Zn в устойчивые фор-мы, вследствие чего наблюдается накопление Zn в органических горизонтах почв и в торфе. Однако константы устойчивости Zn-органических соединений почв относительно низкие.

Цинк необходим для роста и развития растений. Он принимает участие в метаболизме стимуляторов и ингибиторов роста, а также нуклеиновых кислот и белков. При недостатке цинка удлинение стебля продолжается лишь до тех пор пока не исчерпается количество имеющегося цинка. Все разнообразие функций цинка в растениях, его роль

в углеводном, фосфорном и белковом обмене определяется его наличием во многих ферментативных системах. Цинк входит в состав активных центров многих ферментов, является для ферментов металлом-активатором (Чернавина И. А.,1970). Как заметный компонент клеток, высокотоксичный цинк участвует в биохимических процессах и может стать токсичным при избыточном содержании. Непосредственная связь цинка с окислительно-восстановительными процессами и участие в трансформации азотистых соединений и синтезе белка определяют его влияние на фотосинтез, образование хлорофилла и рост растений.

В большинстве почв цинк не входит в состав гумуса, но участвует в процессах формирования минеральных соединений, входя в состав филлосиликатов.

2.8. Кадмий

Кадмий – редкий и рассеянный химический элемент. Кларк кадмия в земной коре равен $5 \cdot 10^{-5}$ %, почвы – $5 \cdot 10^{-6}$ %, растений – $1 \cdot 10^{-6}$ % (Виноградов А.П., 1957; Перельман А.И., 1989).

Распространенность Cd в магматических и осадочных породах не превышает 0,3 мг/кг. Этот элемент, по-видимому, концентрируется в глинистых осадках. Геохимия кадмия тесно связана с геохимией Zn, но Cd имеет большее сродство к сере, чем Zn, и обнаруживает большую, чем Zn, подвижность в кислых средах. Кадмий образует соединения, изотипичные соответствующим соединениям таких катионов, как Zn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Fe2+, Mg^{2+} и в некоторых случаях – Ca^{2+}.

К наиболее важным минералам кадмия относятся эритроцинкит, грино-кит, отавит, селенид, а также разновидность сфалерита – пршибрамит (Погодин С.А., 1963). При выветривании кадмий легко переходит в раствор, где присутствует в виде Cd^{2+}. Он может образовывать комплексные ионы и органические хелаты. Главное валентное состояние кадмия в природных средах – +2, и наиболее важные факторы, контролирующие подвижность ионов кадмия – это pH и окислительно-восстановительный потенциал.

При выветривании Cd легко переходит в раствор, где присутствует в виде Cd^{2+}. Он может образовывать также комплексные ионы ($CdCl^{+}$, $CdOH^{+}$, $CdHCO^{3+}$, $CdCl^{3-}$, $CdCl^{2-}$, $Cd(OH)^{3-}$ и $Cd(OH)^{2-}$) и органические хелаты. В сильноокислительных условиях Cd способен образовывать

собственные минералы (CdO, $CdCO^3$), а также накапливаться в фосфатах и биогенных осадках (биолитах).

Главный фактор, определяющий содержание Cd в почвах, – это химический состав материнских пород. Средние содержания Cd в почвах лежат между 0,07 и 1,1 мг/кг. При этом фоновые уровни Cd в почвах, по-видимому, не превосходят 0,5 мг/кг, и все более высокие значения свидетельствуют об антропогенном вкладе в содержание Cd в верхнем слое почв.

Ввиду важности проблемы накопления Cd в почвах для охраны окружающей среды, было проведено изучение ряда методов, предназначенных для управления режимом обогащенных Cd сельскохозяйственных угодий. Как и в случае цинкового заражения почв, эти методы основаны на повышении pH и катионнообменной емкости почв. Хотя известкование в целом рассчитано на ослабление поглощения Cd при увеличении pH почвы, оно эффективно не для всех почв и растений. Сообщалось, что наилучшие и наиболее надежные результаты по снижению биодоступности Cd были получены при добавлении поверх загрязненной почвы слоя незараженной почвы толщиной до 30 см. Предельно допустимая скорость поступления Cd в почву, вероятно, сильно зависит от pH почвы.

Валовое содержание кадмия в естественных незагрязнённых почвах обусловлено содержанием элемента в материнской породе и определяется генезисом, фациальными различиями материнской породы и процессами почвообразования. Помимо этих факторов содержание кадмия в почвах также связано с реакцией среды и содержанием в почве органического вещества, биологическим круговоротом элемента, механическим составом почвы, с процессами миграции элемента в почвенно-грунтовом слое с участием природных вод и с неоднородностью видового состава растительного покрова. Пестрота содержания кадмия в почвах также обусловлена его дифференциацией по минералам-носителям.

Биологический круговорот в системе почва-растение обеспечивает по-ступление микроэлементов в верхние горизонты. Различные миграционные процессы, эрозия почв могут нивелировать процессы биологической аккумуляции, поэтому верхние гумусовые горизонты иногда содержат меньше кадмия, чем иллювиальные горизонты или порода (Алексеев Ю.В., 1987).

В Российской Федерации почвы группируют по валовому содержанию и содержанию подвижных форм химических элементов-загрязнителей, используя принцип арифметической прогрессии. Нулевая группа – фон, представляет собой величину кларка по А.П. Виноградову (1957). Первая группа по загрязнённости – два кларка, вторая – три кларка. Согласно данной классификации, содержание кадмия для первой группы по загрязнённости составляет 2 мг/кг, второй – 8 мг/кг, третьей – 32 мг/кг (Ягодин, Виноградова, Говорина, 1989).

Распределение кадмия по профилю почв, как правило, достаточно равномерное, и различные колебания связаны с содержанием в почвенных горизонтах органического вещества, глинистой фракции, карбонатов, а также с палеопроцессами почвообразования, если они оказывают существенное влияние на современный состав почв и педогенез.

Чрезвычайно важное значение в образовании различных форм кадмия в почвах имеют антропогенные факторы. Они вызывают не только изменение свойств почв, нарушение естественных механизмов миграции и трансформации элементов и их соединений в почвах, но и интенсивное локальное загрязнение отдельных регионов соединениями кадмия до уровней, во много раз превышающих естественные концентрации элементов в почвах (Глазовская М.А., 1981).

Соединения кадмия, поступающие в почву из антропогенных источников, как правило, термодинамически неустойчивы в почвенных условиях и сравнительно быстро переходят в более устойчивые формы. Скорость трансформации зависит от состава техногенных соединений, условий среды, включая микробиологическую составляющую.

Среди форм соединений элементов различают, по крайней мере, 3 группы:

1) мобильные;

2) фиксированные;

3) изоморфные примеси в минералах (Зырин Н.Г. и др, 1972).

По методам извлечения элементов из почв различают водорастворимые, легкорастворимые, обменные, кислоторастворимые, фиксированные и прочно фиксированные, связанные с теми или иными компонентами почвенной массы (органическим веществом, оксидами Fe, Al и Mn), образующие определённый тип соединений при взаимо-

действии с компонентами почв, а также переходящие в определённые вытяжки (Пинский Д.Л., 1992).

В распространении кадмия в системе почва-раствор большое значение имеют явления сорбции и десорбции. Величина сорбции этого элемента зависит от химических и структурных отдельностей отдельных компонентов почвы. Сорбция может проходить при участии органического вещества почвы, различных фракций гумуса, глинистых минералов, полуторных окислов, органо-глинистых соединений почвы. В зависимости от типа почвы доля участия того или иного компонента в сорбции ионов кадмия будет различной. В почвах, богатых органическим веществом, сорбция кадмия определяется в основном органическими соединениями гумуса, в почвах малогумусных и в минеральных горизонтах – глинистыми минералами и полуторными оксидами (Горбатов В.С., Зырин Н.Г., Обухов А.И., 1988).

Считается, что Cd не входит в число необходимых для растения элементов, однако он эффективно поглощается как корневой системой, так и листьями. Растения по способности накапливать кадмий разделяются на три группы:

1) аккумуляторы, накапливающие кадмий, главным образом, в надземной сфере, при низкой и высокой концентрации металлов в почве;

2) индикаторы, в которых концентрация кадмия отражает его концентрацию в окружающей среде;

3) исключатели, в которых поддерживается низкая концентрация кадмия в побегах, несмотря на его высокую концентрацию в окружающей среде (Antosiewicz D.M., 1992).

Характер воздействия кадмия на растительный организм зависит от его концентрации в питательной среде. Низкие концентрации этого элемента оказывают стимулирующее действие, а высокие, наоборот, ингибируют физико-биохимические процессы, рост и развитие растений, снижают их продуктивность (Мельничук Ю.П., 1990).

Видимые симптомы, вызванные повышенным содержанием Cd в растениях, – это задержка роста, повреждение корневой системы, хлороз листьев, красно-бурая окраска их краев или прожилков. Помимо создания препятствий нормальному метаболизму ряда микрокомпонентов питания, фитотоксичность Cd проявляется в тормозящем действии на фотосинтез, нарушении транспирации и фиксации CO_2, изменении проницаемости клеточных мембран. Известно также, что Cd ингибирует процессы в микроорганизмах, происходящие с участием

ДНК, препятствует симбиозу микробов и растений и повышает предрасположенность растений к грибковым инвазиям. Установлено, что Cd – эффективный и специфичный ингибитор биологического восстановления NO2~ до NO (McKenney D.J., Vriesacker J.R., 1985).

2.9. Свинец

Кларк свинца земной коры равен $1{,}6 \cdot 10^{-3}$ %, почвы – $1 \cdot 10^{-3}$ %, растений – $1 \cdot 10^{-5}$ %. (Виноградов А.П., 1957). Свинец отличается высокой токсичностью и входит в первый класс опасности. Результаты мелиорации почв, загрязненных свинцом, показали, что закрепление в виде фосфатов – наиболее надежный способ стабилизации элемента в загрязненных почвах.

Концентрация свинца в земной коре сильно варьирует. Помимо основного рассеянного состояния, свинец входит в состав более чем 200 минералов, многие из которых являются породообразующими. Количество элемента в одном и том же минерале может колебаться в значительных пределах. В соединениях Pb находится в двух- или четырехвалентной формах. Основной минерал свинца – галенит. Из породообразующих минералов свинцом наиболее обогащены плагиоклазы.

Свинец является постоянным компонентом атмосферы, гидросферы и литосферы Земли. Его миграция имеет четко выраженный циклический характер. Природными источниками металла в атмосфере являются выветривание горных пород, эрозия почв, вулканические газы и аэрозоли, дымы лесных пожаров, морские аэрозоли. Антропогенные источники элемента – металлургические заводы и предприятия, производящие красители, химикаты, пестициды, батареи, аккумуляторы; сжигание угля, торфа, масел, городских отходов; распашка земель (Минеев В.Г., и др., 1982).

Свинец образует довольно стабильные хелаты с органическими лигандами, содержащими донорские атомы серы, азота и кислорода. Вследствие относительной слабости связей Pb-C, органические соединения свинца менее стабильны, нежели аналогичные соединения углерода и кремния. Природа и количество органических групп определяют стабильность соединения. В сильногумусированных почвах отмечается заметное закрепление свинца.

Естественные концентрации свинца в верхних горизонтах различных почв мира колеблются в пределах 3–190 мг/кг, средние значения

по типам почв составляют 10-67 мг/кг. Для чернозёмов нормальным содержанием свинца считается 13-28 мг/кг.

Содержание свинца в почвах определяется, прежде всего, региональными факторами: составом почвообразующих пород, рельефом местности, климатом, растительным покровом. В последнее время к перечисленным факторам прибавился и антропогенный источник поступления элемента. Для оценки его влияния необходимо знание фоновых уровней содержания свинца.

В почвах образуются различные соединения свинца. Их состав и количество заметно различается в лесных и пахотных почвах. Почвообразовательный процесс вносит существенные коррективы в распределение свинца по профилю почвы. Перераспределение этого элемента в профиле почв происходит под воздействием различных химических процессов: осаждения-растворения, адсорбции глинистыми минералами и полуторными окислами, взаимодействия с органическим веществом. Несмотря на то, что формы нахождения свинца в разных типах почв могут существенно различаться, всё же можно заключить, что он ассоциируется, главным образом, с глинистыми минералами, оксидами железа и алюминия, органическим веществом. В некоторых почвах свинец может концентрироваться в частицах карбоната кальция или в фосфатных конкрециях (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989).

Свинец может соосаждаться с некоторыми труднорастворимыми соеди-нениями: карбонатами, гидроксидами металлов. Кроме того, он может быть представлен индивидуальными труднорастворимыми соединениями, например, гидроксилпироморфитом, а в присутствии хлорид-иона – хлор-пироморфитом (Nriagu J.O., 1979).

E.A. Forbes и A.M. Posner (1976), изучавшие сорбцию свинца с железо- и марганецсодержащими минералами, пришли к выводу, что лучшими аккумуляторами этого элемента являются гематит, гетит и оксиды марганца. Основным механизмом сорбции свинца гематитом является адсорбция на поверхности минерала. Фиксация и уровень сорбции свинца глинистыми и вторичными минералами также зависят от pH.

Органическое вещество является важным компонентом, ответственным за перераспределение свинца в почве. Механизмы их соединения могут быть различными: труднорастворимые соединения типа солей с гумусовыми кислотами, адсорбция на поверхности молекул гумусовых кислот за счет электростатических сил или с образовани-

ем химических связей (хемосорбция), образование комплексных соединений с органическим веществом. Свинец образует стабильные комплексы с гуминовыми кислотами (ГК) и фульвокислотами (ФК). Комплексы РЬ-ГК более устойчивы, чем комплексы ГК с цинком и кадмием. Адсорбция свинца гумусом, способность к комплексообразованию и устойчивость образующихся соединений увеличиваются с повышением pH. Как и у других тяжелых металлов, миграция свинца тесно связана с щелочно-кислотными условиями.

В почвах легкого гранулометрического состава содержание свинца около 10 мг/кг, а в суглинистых и глинистых почвах – 20-25 мг/кг. В почвах Pb связан с глинистыми минералами, гидроксидами Fe, Mn, Al, органическим веществом, карбонатами. Среди тяжелых металлов свинец наименее подвижен.

Содержание свинца в растениях зависит от множества факторов: систе-матического положения растений, условий среды обитания, фенологической фазы, возраста. Свинец содержится в любом растительном организме, но различные органы и ткани растений существенно различаются уровнями содержания свинца. Концентрация этого элемента в растениях убывает в рядах:

корни>листья>стебли>плоды (семена) для травянистых растений;

корни>кора>листья>древесина>плоды (семена) для древесных растений.

Исследования по выявлению физиологической роли и влиянию свинца на продуктивность растений были проведены практически одновременно с обнаружением этого элемента в составе золы. J.L. Hall, L.E. Williams (2003) приводят результаты нескольких исследований начала XX века, в которых показано, что применение нитрата свинца в дозах 1,1-1,7 кг/га приводило к росту урожаев ячменя, кукурузы и гречихи на 90 %, а внесение 1,6 кг $Pb(NO_3)_2$ на 1 га – к росту урожаев сахарной свеклы.

По данным Ф.Я. Сапрыкина (1984), свинец ускоряет прорастание семян и синтез углеводов в растениях. В.Г. Минеев и др. (1982) ссылаются на результаты исследований П.А. Власюка и его коллег, в которых внесение в почву определенного количества свинца повышало урожай моркови, капусты, лука и огурцов.

Касаясь биохимической роли свинца, А. Кабата-Пендиас и Х. Пендиас (1989) пишут: «Хотя нет данных, свидетельствующих о

том, что свинец жизненно необходим для роста каких-либо видов растений, имеется много сообщений о стимулирующем действии на рост последних некоторых солей свинца при низких концентрациях. Более того, описаны эффекты торможения метаболизма растений, возникающие из-за низких уровней содержания свинца».

Всеобщее внимание свинец привлек к себе как токсический элемент, под воздействием которого отмечается ослабление роста растений и их фотосинтетической активности. Свинец также оказывает влияние на снижение всхожести и энергии прорастания семян, уменьшение длины корней и высоты проростков.

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являются черноземы обыкновенные, черноземы обыкновенные окультуренные и лугово-черноземные почвы заказника «Каменная Степь» Таловского района Воронежской области.

Исследование проводилось на 5 ключевых участках, выбранных в зависимости от положения почвы по рельефу, типа фитоценоза и характера использования.

Участок 1 расположен на водоразделе, прилегает к полосе № 131, находится выше нее по склону на относительно выровненном участке. Данная территория распахана. На участке находятся разрезы 17 и 68. Первый заложен в нижней части склона в микропонижении у лесополосы № 131 на поле проса, уровень грунтовых вод (УГВ) 85 см. Разрез 68 находится в том же микропонижении, что и 17 с координатами 51° 01’51,3” с. ш. и 40° 44’21,3” в. д., на парующей пашне к западу от лесополосы № 131.

Участок 2 находится в дубово-кленово-березовой лесополосе (№131, 1949 года закладки) на водораздельном склоне восточной экспозиции крутизной 0,3˚. Помимо клёна и дуба присутствует также ясень, в подросте – клён, ясень и вяз (разрезы 16 (51° 01’53,8” с ш и 40° 44’37,9”) и 69 (51° 01’53,3” с ш 40° 44’24,2” в д). Разрез 69 вскипает слабо от HCl с 20 см, бурно – с 60 см.

Участок 3 находится ниже полосы № 131, на склоне восточной экспозиции. Данная территория также используется под пашню (разрезы 118 (51° 01’32,7” с ш и 40° 44’31,2” в д) и 120 (51° 01’53,7” с ш и 40° 44’40” в д).

Участок 4 представляет собой пологий склон южной экспозиции, со злаково-разнотравной луговой растительностью на территория бывшего Сурчиного заповедника. В настоящее время он используется в качестве сенокоса и пастбища. На участке 4 хорошо выражен микрорельеф: микропонижения и микроповышения – разрез 71 (51° 02’41,9” с ш и 40° 43’42,5” в д) и 73 (51° 02’52,2” с ш и 40° 43’49,3” в д). Разрез 73 – единственный в нашем исследовании представляющий лугово-черноземную почву выщелоченную, слабо вскипающую глубже 1-1,5метра. Разрез 71 вскипает с 30 см.

Участок 5 представляет собой выровненную территорию ботанических микрозаповедников, покрытых злаково-разнотравной растительностью, представляющих косимую и некосимую степь, разрезы 103 (51° 01’52,0” с ш и 40° 43’25,3”в д) и 104 (51° 01’58,9” с ш и 40° 43’28,5” в д). Черноземы обыкновенные заповедной косимой и некосимой степи бурно вскипают с 70-80 см.

Таким образом, на ключевых участках с различными сочетаниями природных экологических и антропогенных факторов (элементов рельефа, типов растительных сообществ, уровня залегания грунтовых вод, характера сельскохозяйственного использования) были исследованы пары почвенных разрезов, заложенные на относительно однородных по почвообразующим породам участках.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор, подготовка и химический анализ образцов почв осуществлялись в соответствии с общепринятыми методиками (Воробьёва Л.А., 1998; Аринушкина Е.В., 1970). Был выполнен анализ следующих почвенных свойств: pH водной вытяжки; гумус методом титриметрии по Тюрину, CO_2 карбонатов алкалиметрическим методом (по Козловскому), емкость катионного обмена – по методу Бобко-Аскинази в модификации Алёшина. Данная аналитическая работа выполнена в рамках совместного проекта с отделением экологии факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова.

Общее содержание микроэлементов определялось на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ELAN DRC-e с использованием внешней калибровки в вытяжке 1н HNO_3+H_2O_2. Масс-спектрометрия на современном оборудовании обеспечивает многоэлементный анализ в диапазоне от 10^{-9} г/л с высокой точностью и отличной воспроизводимостью без предварительного концентрирования. Разложение образцов почвы вышеуказанным двухкомпонентным реагентом дает возможность практически полностью определить подвижные и условно подвижные формы микроэлементов, в том числе всех цветных металлов, токсичных и потенциально токсичных элементов. Использовавшийся нами реагент не дает исчерпывающей оценки валового содержания микроэлементов, но тем не менее за рубежом он широко используется, особенно в последнее время.

Подвижные формы изученных микроэлементов были определены в вытяжке 0.2н HCl. Считается, что этот реагент в некотором роде моделирует действие корней растений на почвенные агрегаты. 0,1н HCl рекомендован Ринькис Г.Я. (1963) в качестве экстрагента в методике оценки подвижных форм микроэлементов. Этот экстрагент достоверно оценивает микроэлементы органо-минеральных комплексов почв, однако будет «слабым» для карбонатных почв.

Поэтому мы использовали 0,2н HCl. Многочисленные вытяжки в какой-то мере создают представление о доступности живым организмам тех или иных элементов, но они действительны только для конкретных почвенных условий, даже для определенных видов живых организмов. В то же время большинство вытяжек не позволяет оценить подвижность химических элементов и их соединений.

ГЛАВА 4. НЕКОТОРЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ КАМЕННОЙ СТЕПИ

Для характеристики почв заказника нами были выбраны свойства заметно влияющие на микроэлементный состав черноземов. Полученные данные по некоторым свойствам черноземов представлены в таблице 4. Выбранные пять участков на территории Каменной Степи позволили в некоторой степени детализировать полученные с помощью катенарно-ландшафтного исследования данные.

В горизонте А черноземов обыкновенных легко, средне и тяжелосуглинистых под пашней содержится 6,45–6,70 % гумуса (табл. 4), количество которого относительно равномерно уменьшается вниз по профилю. В почвах залежи бывшего Сурчинного заповедника, где встречаются лугово-черноземные почвы, обнаружено около 6,9 % гумуса в горизонте А при среднесуглинистом грансоставе и независимо от положения почв по рельефу.

В лесополосе 131 в верхнем горизонте почв содержится, по нашим данным, в среднем около 7,3% гумуса, немного меньше, чем в почвах заповедника на участке 5 (косимая и некосимая степь) (табл. 4). В отличие от почв других участков, в черноземах под лесополосой 131 содержание гумуса на глубине 80–100 см относительно высокое и составляет 1,8–2,6%. Характер распределения гумуса в профиле исследованных почв равномерно-аккумулятивный. Наибольшая часть гумуса находится в верхней части профиля черноземов (до 70–100 см). Гумус постепенно и равномерно убывает до 1% на глубине около 200 см. В некосимой степи содержание гумуса в горизонте А более 8%. Во всех исследованных разрезах черноземов Каменной Степи распределение гумуса аналогично вышеописанному: гумус равномерно уменьшается с глубиной, снижаясь до 1% на глубине 130–160 см (табл. 4).

Содержание и характер органического вещества, образование органоминеральных комплексов являются теми особенностями гумуса черноземов, которые обусловливают накопление и распределение по почвенному профилю валовых количеств и подвижных форм микроэлементов.

Из четырех рассмотренных нами в данной работе факторов распределения микроэлементов в черноземах и их локализации в элемен-

тах ландшафтной оболочки, наиболее часто значимо коррелирующим с микроэлементным составом черноземных почв является содержание гумуса и его распределение в профиле почв.

Таблица 4 – Химические свойства исследованных почв

№ участ-ка	Угодье	Почва	№ разре-за	Гори-зонт	Глубина, см	Гу-мус, %	pH, водн.	CO_2 карб., %	ЕКО, ммоль э/100 г
1	Пашня	Чернозем обыкно-венный	17	А пах АВ В	0-38 38-61 61-85	6,58 2,95 1,43	6,3 7,2 7,6	0,14 7,01 7,08	46,5 32,4 21,1
1	Пашня микро-пони-жение	Чернозем обыкно-венный	68	А пах А1 АВ В 107-150 150-200 200-250	0-27 27-47 47-81 81-107 107-150 150-200 200-250	6,31 6,04 4,62 1,63 1,21 0,95 0,78	6,9 7,0 7,1 7,1 7,3 7,7 7,7	0,43 0,52 0,54 0,58 1,63 6,71 7,07	50,1 47,2 36,8 24,1 22,0 19,1 17,6
2	Лесопо-лоса	Чернозем обыкно-венный	16	А АВ В	(0)2-55 55-80(87) 80(87)-121	7,27 4,33 1,51	5,7 6,8 7,5	0,07 0,25 9,33	52,1 38,2 22,3
2	Лесопо-лоса	Чернозем обыкно-венный	69	А АВ В1 В2 100-150 150-200 200-250	(0)5-44 44-65 65-91 91-100 100-150 150-200 200-250	7,44 3,72 1,03 0,82 0,76 0,65 0,59	6,0 7,7 7,4 7,5 8,5 8,6 8,6	0,16 1,39 7,96 8,08 6,44 7,20 7,44	51,8 46,4 43,6 36,4 26,7 21,1 20,8
3	Пашня	Чернозем обыкно-венный	118	А пах АВ В	0-59 59-64 64-83	6,75 4,73 2,45	6,8 7,6 7,7	0,07 4,10 7,91	47,6 36,4 20,0
3	Пашня	Чернозем обыкно-венный	120	А пах АВ В	0-33 33-56 56-64	6,66 3,60 2,63	6,5 6,6 7,3	0,07 0,08 1,14	48,4 37,6 26,8
4	Залежь микро-повы-шение	Чернозем обыкно-венный	71	Ad +A АВ В1 В2 130-180 180-230 230-280	0-50 50-94 94-120 120-128 130-180 180-230 230-280	6,80 3,51 1,02 0,97 0,54 0,52 0,43	6,8 7,0 7,0 8,5 8,4 8,3 8,3	0,36 5,47 9,83 9,96 9,36 5,47 6,70	47,3 40,9 36,7 24,5 20,1 19,2 18,8

№ участка	Угодье	Почва	№ разреза	Горизонт	Глубина, см	Гумус, %	pH, водн.	CO_2 карб., %	ЕКО, ммоль э/100 г
4	Залежь микропонижение	Луговочерноземная почва	73	A AB B 90-140 140-190 190-240	(0)2-39 39-70 70-90 90-140 140-190 190-240	6,90 2,80 1,31 0,80 0,64 0,32	6,9 6,5 6,7 7,9 8,3 8,4	0,54 0,31 0,39 0,56 6,06 6,80	49,8 42,1 39,4 32,7 27,6 19,3
5	Косимая степь	Чернозем обыкновенный	103	103 Ad 103 A 103 AB 103B1 103 B2 103 B3	0-6 (0)6-50 50-80 80-115 115-160 160-194	7,77 7,64 2,72 1,64 1,04 0,76	6,9 6,9 7,0 7,4 7,6 7,8	0,44 0,50 0,62 6,50 9,55 8,16	50,4 48,8 34,4 29,6 26,0 23,6
5	Некосимая степь	Чернозем обыкновенный	104	104A 104AB 104B1 104B2	(0)3-55 55-82 82-112 112-165	8,12 3,11 1,31 1,24	6,3 6,8 7,3 7,1	0,28 1,14 9,25 7,50	48,2 37,2 29,6 22,0

Из четырех рассмотренных нами в данной работе факторов распределения микроэлементов в черноземах и их локализации в элементах ландшафтной оболочки, наиболее часто значимо коррелирующим с микроэлементным составом черноземных почв является содержание гумуса и его распределение в профиле почв.

Значения pH в профиле черноземов Каменной Степи оказывают заметное влияние на микроэлементный состав почв при переходе значений этого показателя в щелочной интервал и наличии в почвенном профиле карбонатного геохимического барьера, в результате чего проявляется элювиально-иллювиальный процесс почвообразования.

Основные значения pH водн. в горизонте А исследованных почв от 6.7 до 6,9 (табл. 4). В горизонте В этот показатель в пределах 7,1–8,5, то есть переходит в щелочной интервал и свидетельствует о наличии карбонатного барьера. Минимальные среди определенных нами значений pH, характерны для горизонта А почв под лесной полосой. Это связано, по нашему мнению, с характером опада и деятельностью грибковой микрофлоры по разложению лесной подстилки.

Таким образом, абсолютное большинство исследованных почв характеризуется нейтральными значениями pH в верхней части профи-

ля. Нижние части профиля почв имеют слабощелочную и щелочную реакции.

В почвах на пашне величины pH практически не изменяются с глубиной (7,2–7,7). Слабощелочная и близкая к щелочной реакция среды, особенно в нижней части почвенного профиля в разной степени сезонно переувлажненных почв, вероятно во многом связана с наличием большого количества OH-групп, образующихся при диссоциации угольной кислоты и растворении гидрокарбонатов кальция. Изменение характера использования экосистемы оказывает заметное влияние на кислотно-щелочное равновесие в профиле и, вероятно, обусловливает подщелачивание нижних горизонтов. Наличие по профилю чернозема карбонатных барьеров приводит к образованию полимодального типа профиля черноземов Каменной Степи.

По величине CO_2 карб. можно иногда оценить степень выщелоченности черноземов. В наших исследованиях среди почв пашни определенную выщелоченность обнаружили разрезы 68 и 73 (лугово-черноземная почва), в которых минимальное значение CO_2 карбонатов прослеживалось до глубины около 150 см (табл. 4). В остальных исследованных черноземах обыкновенных граница резкого возрастания содержания карбонатов проходит на глубине 40-80 см, где наблюдалось бурное вскипание. Последнее обстоятельство отмечено и в Классификации и диагностике почв СССР (1977).

В гумусовом горизонте почв Каменной Степи количество карбонатов минимальное и составляет десятые доли %. С глубиной содержание карбонатов, как правило, незначительно увеличивается, а на верхней границе карбонатного геохимического барьера составляет часто около 7-8%. На залежи бывшего Сурчинного заповедника в микропонижениях встречаются лугово-черноземные почвы, которые выщелочены до 150 см (около 0,3-0,4% карбонатов). В почвах Каменной Степи связь между содержанием карбонатов и величиной pH апроксимируется экспоненциальной моделью с хорошим коэффициентом детерминации.

Присутствие карбонатов обусловливает многие важнейшие свойства черноземов: порозность, связность и плотность, фракционный состав гумуса, состав почвенных растворов (Орлов Д.С. и др., 2005). Заметная роль принадлежит карбонатам в формировании щелочности почв.

Умеренное содержание $CaCO_3$ положительно влияет на структуру, буферность, поддерживает близкую к нейтральной реакцию. Высокий

уровень содержания карбонатов часто ухудшает физические свойства почв, цементирует почвенную массу. Исследованные нами черноземы Каменной Степи, для характеристики которых заложены разрезы в различных экологических условиях, имеют в профиле, как видно из вышеизложенного и данных таблицы 4, три заметные части: толща выщелачивания, горизонт интенсивного иллюавирования карбонатов и толща консервативно высокого содержания карбонатов. Сходные особенности профильного распределения CO_2 карбонатов отмечал Щеглов Д.И. (1999).

Судя по величине и профильному распределению ЕКО, все исследован-ные почвы Каменной Степи обладают высокой степенью устойчивости к антропогенным воздействиям. ЕКО равномерно уменьшается вниз по профилю от 46–52 ммоль-экв/100 г до 17–27 ммоль-экв/100 г, то есть в 2–2,5 раза (табл. 4).

Высокой способностью к обмену катионов обладают органические ком-поненты почв и глинистые минералы. Величины емкости катионного обмена изменяются по почвенному профилю в соответствии с распределением гумуса и илистой фракции. Максимальные значения ёмкости катионного обмена присущи гумусовым горизонтам (А и АВ) почв Каменной Степи – 40-55 ммоль экв/100 г почвы. Следует подчеркнуть, что емкость катионного обмена исследованных почв снижается с глубиной параллельно уменьшению содержания гумуса вниз по профилю до 20 ммоль экв/100 г почвы.

ГЛАВА 5. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ КАМЕННОЙ СТЕПИ

Микроэлементный состав черноземов Каменной Степи образуется и функционирует в основном в условиях преимущественно непромывного водного режима, при частом ослаблении процессов выщелачивания и усилении биогенной аккумуляции микроэлементов из-за интенсивного гумусонакопления под травянистой растительностью. При этом в гумусовом горизонте черноземов относительно почвообразующих пород накапливаются из изученных элементов валовые Mn, Cu, B, подвижные формы Mn, Zn, Cu, Co, B. Заметную роль в процессах миграции микроэлементов играет наличие в некоторых подтипах черноземов, в том числе и в Каменной Степи, карбонатного геохимического барьера.

В условиях более сухого климата и в отсутствие сквозного промачивания, часто в щелочной среде в обыкновенных черноземах отмечается более заметное накопление в гумусовом горизонте никеля, цинка, кобальта, подвижных форм B, Co. Причем большая часть тяжелых металлов при этом связана с фульвокислотами, меньшая – с гуминовыми кислотами.

Полученные данные по валовому содержанию девяти микроэлементов и их подвижным формам, извлекаемым в вытяжке 0,2н HCl, были оценены по кларкам концентрации и рассеивания. Кларки литосферы для этого плохо подходили, так как полученные значения валового содержания хрома, марганца, кобальта, никеля, меди и цинка практически во всех разрезах и всех горизонтах в 1,5–2 раза ниже кларков литосферы. Для проведения относительной оценки концентрации и рассеивания исследованных микроэлементов, в почвах Каменной Степи были использованы значения валового их содержания в горизонтах BC и C (табл. 5). Данные о содержании подвижных форм микроэлементов в исследованных почвах сравнивались с литературными данными.

В методической публикации «Система агроэкологического мониторинга…» (2006) приводятся средние величины концентрации подвижных форм микроэлементов в гумусовом горизонте интересующих нас почв (табл. 6).

Таблица 5 – Валовое содержание микроэлементов в горизонтах ВС и С

Элементы	B	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
Клит	12	83	1000	18	58	47	83	0,13	16
ПДК	6-30	100	1500	25	20	33	55	0,50	32
ОДК					80	130	220	2,0	130
ВС/ С	10-22	34-44	365	9-12	27-39	14-20	44-65	0,15	10-16

Таблица 6 – Подвижные формы микроэлементов

Почвы	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr
Чернозем обыкновенный	0,19	0,63	0,07	1,01	0,73	0,84
Лугово-черноземная почва	0,30	0,76	0,11	1,02	1,01	0,71
ПДК (ОДК)	3,0	23,0		6,0	4,0	6,0

Данные таблицы 6 говорят о том, что в горизонте А лугово-черноземных почв подвижных форм Cu, Cd и Ni на 30% больше, чем в черноземах обыкновенных. Полученные нами результаты этой закономерности для почв Каменной Степи не подтверждают (табл. П. 2).

Установлено (Коляда О.А., 2012), что характер водного режима почв определяет не только общее содержание, но и тип распределения микроэлемента в профиле черноземов Каменной Степи. С возрастанием степени гидроморфности почв степи происходит однонаправленное увеличение валового содержания и кислотнорастворимых форм Mn, Zn, Pb, Cu, Cr, Ni, Cd. В профиле черноземов обыкновенных эти элементы распределяются по аккумулятивному типу.

Полученные нами и приводимые в таблице приложения 2 показатели содержания подвижных форм всех исследованных элементов ниже в разы и на порядок в сравнении с приводимыми в литературе (Микроэлементы в почвах СССР, 1981).

Рассмотрим некоторые особенности распределения изученных микроэлементов в почвах Каменной Степи, начиная с бора. Ампли-

туда колебаний содержания бора в горизонте А составляет 9-22 мг/кг (табл. П. 1) при среднем значении 13,5 мг/кг и коэффициенте варьирования 25%. В нижних горизонтах коэффициент варьирования по валовому бору достигает 30 и более %. Относительная аккумуляция валового бора в горизонте А незначительна только в разрезе 68 (табл. П. 1). Иногда наблюдается незначительный вынос бора из верхнего горизонта и его накопление в иллювиальном горизонте (разрезы 104 и 69). В целом для бора характерно относительно равномерное распределение по профилю.

В отличие от большинства исследованных микроэлементов бор не коррелирует значимо с содержанием гумуса ввиду того, что только 25% бора связано с органическим веществом черноземов. Характер распределения валового бора в почвах Каменной Степи определяется не столько органическим веществом почв, сколько значительной стабильностью и инертностью минералов бора и заметной миграцией его соединений в почвенных условиях.

Валовое содержание бора в исследуемых почвах близко к кларку для почв, что, вероятно, связано с условиями почвообразования и методикой определения. Характерной особенностью распределения подвижного бора по профилю черноземов Каменной Степи является незначительное увеличение с глубиной и накопление в иллювиальном горизонте. В большинстве случаев наибольшая концентрация подвижного бора наблюдалась на глубине около 1 м.

Содержание валового **хрома** в горизонте А исследованных почв в среднем составляет 42 мг/кг при максимальной концентрации в карбонатном горизонте почвы пашни, в микропонижении – 65 мг/кг (разрез 68, участок 1) (табл. П. 1). В исследованных почвах отмечается небольшой вынос Cr из гумусового горизонта, однако, общий характер распределения элемента по профилю аккумулятивный. Распределение хрома при этом слабо коррелирует с гумусом.

По данным Любимовой И.Н. (1979) до 60% валового содержания хрома связано с илистой фракцией черноземов. Варьирование валового содержания хрома не превышает 10% в гумусовом горизонте и достигает 24% в карбонатном горизонте.

Во всех исследованных почвах Каменной Степи содержание подвижного хрома в гумусовом горизонте 0,7-1 мг/кг, вниз по профилю уменьшается до 0,05 мг/кг (табл. П. 2).

Среднее содержание валового **марганца** в гумусовом горизонте черноземов – 680 мг/кг (Ковальский В.В., Андрианова Г.А. (1970). Среднее содержание валового Mn в исследованных почвах – 478мг/кг (табл. П. 1). Варьирование валового содержания марганца в горизонте А – 8%, а в карбонатной толще варьирование валового содержания марганца увеличивается в полтора раза. Среднее содержание подвижных форм марганца в горизонте А составляет 226 мг/кг (табл. П. 2), а в нижележащих горизонтах этот показатель на порядок ниже.

Среднее содержание валового **кобальта** в горизонте А почв Каменной Степи 12 мг/кг (табл. П. 1) при коэффициенте варьирования 8-11%, в нижележащей карбонатной толще – до 22%, а глубже полутора метров – 11%.

В почвах Каменной Степи кобальт являет собой микроэлемент низкой пространственной вариабельности. Подвижная форма кобальта распределяется по профилю черноземов сходно с цинком и никелем: накапливаясь в гумусовом горизонте, подвижный кобальт резко уменьшается в нижней части профиля (табл. П. 2).

Среднее содержание валового **никеля** в гумусовом горизонте почв Каменной Степи составляет 36 мг/кг (табл. П. 1). Относительно низкие концентрации Ni характерны для почв микроповышений, а повышенные – на микропонижениях. Коэффициент варьирования валового никеля в гумусовом горизонте около 8%, в карбонатном горизонте – 20% и глубже 1,5 м – 10%. Среднее содержание подвижного Ni в горизонте А черноземов Каменной Степи 6,7 мг/кг (табл. П. 2). Далее его содержание резко падает с глубиной. В горизонте АВ содержание подвижного никеля может быть в 4 раза меньше, чем в А. Для черноземов обыкновенных ПДК по никелю в гумусовом горизонте 4 мг/кг. В исследованных нами почвах содержание подвижного никеля в 1,5-2 раза больше, чем ПДК (табл. П. 2).

Среднее содержание **меди** в гумусовом горизонте черноземов Каменной Степи составляет 22,6 мг/кг (табл. П. 1). Коэффициент варьирования валовой меди составляет 8–10% в гумусовом горизонте, 21% – в карбонатном горизонте и, наконец, 10% – в профиле ниже 1,5 м. Распределение валовой меди по профилю черноземов Каменной Степи аналогично таковому для других элементов. Медь также аккумулируется на карбонатном геохимическом барьере, что привело к образованию второго максимума валового содержания меди в профиле.

Среднее содержание подвижной Cu в гумусовом горизонте – 0,4 мг/кг (табл. П. 2). На карбонатном геохимическом барьере активная подвижная медь накапливается в 4 раза больше, чем ее среднее значение.

Среднее содержание валового **цинка** в гумусовом горизонте черноземов Каменной Степи составило около 60 мг/кг (табл. П. 1). Наибольшее содержание валового Zn отмечено в микропонижениях изученной территории и в заповедной части. В верхних горизонтах почв содержится 71-77 мг/кг цинка. При этом степень варьирование цинка в среднем по почвенному профилю составляет 8% в гумусовом горизонте, 22% – в иллювиальном и 15% – ближе к почвообразующей породе.

Что касается подвижных форм цинка, то их среднее содержание в гуму-совом горизонте – 1,2 мг/кг (табл. П. 2). При этом максимальное их содержание 2,6 мг/кг. В некоторых почвах (в микропонижениях) содержание подвижного цинка резко убывает уже в горизонте АВ.

В гумусовом горизонте изученных почв содержится в среднем 0,2 мг/кг валового **кадмия** (табл. П. 1). Вниз по профилю среднее содержание валового кадмия составляет 0,16 мг/кг, а степень варьирования содержания валового Cd 11 – 15% в гумусовом горизонте, 27% – в горизонте В, на глубине более полутора метров – всего 8%. Среднее содержание подвижного кадмия в гумусовом горизонте почв составляет 0,11мг/кг (табл. П. 2) и с глубиной постепенно уменьшается до 0,01 мг/кг.

Среднее содержание валового **свинца** в горизонте А изученных почв составляет 13,5 мг/кг (табл. П. 1), а степень варьирования этого показателя составляет 14%, 20–24% – в карбонатной толще. Наибольшим содержанием валовых и подвижных форм Pb отличаются почвы пашни.

Распределение подвижного свинца в исследованных почвах Каменной Степи носит тот же характер, что и распределение этого показателя для большинства изученных микроэлементов. В верхних горизонтах содержание подвижного свинца составляет в среднем 1,7 мг/кг (максимум 2,3 мг/кг) при степени варьирования 20% (табл. П. 2).

Приведенные выше результаты анализа распределения нескольких микроэлементов обосновали наличие бимодального характера профильного поведения их валовых и подвижных форм.

В пределах небольшой обследованной территории заметно прослеживается влияние различных факторов, определяющих пространственную неоднородность почвенного покрова Каменной Степи. С этой точки зрения представляется актуальным сравнивать не только различные по экологии и использованию участки, но и оценить внутреннюю структуру почвенного покрова отдельных участков.

ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Е.А. Дмитриев (1999) писал, что наше представление о свойствах и характеристиках почв является функцией процедуры опробования и анализа. Поскольку исследователь активно участвует в процедуре получения данных с разных сторон, то, как правило, полученные знания о почве неизбежно содержат нечто субъективное привнесенное личностью исследователя.

Наши знания о почве практически всегда в той или иной степени зависят от способов и методов их получения, что необходимо учитывать при их интерпретации и сравнении результатов. Для изучения и объяснения распределения микроэлементов в почвах крайне важен, кроме вышеизложенного, учет вклада исследователя в результат.

Полученные нами данные по валовому содержанию исследованных микроэлементов (табл. П. 1) показали, что практически во всех разрезах отмечается заметная концентрация большинства микроэлементов в горизонте А. Слабое проявление дифференциации концентраций элементов по горизонтам говорит о том, что под влиянием процессов почвообразования в черноземах не происходит обширного разрушения минеральной части (Ахтырцев Б.П., Ахтырцев А.Б., 1993).

С почвенно-экологической точки зрения важнейшей, хотя и не един-ственной, представляется, несомненно, трудоемкая задача количественной оценки микроэлементного состава почв при создании необходимой базы данных. Два вида экосистем Каменной Степи – заповедные участки (разрез 28) и лесополосы (разрез 38 в лесополосе 45) – несомненно, заслуживают при этом пристального внимания. И прежде всего, в связи с проблемой оценки степени загрязнения, недостаточного использования микроудобрений и мониторинга.

6.1. Микроэлементы в почвах залежи и под лесополосой

В образцах из выбранных разрезов 28 и 38, заложенных нами ранее, были определены: валовое содержание Mn, Ni, Cu, Zn, Pb рентгенфлуоресцентным методом, pH, гумус, CO_2 карбонатов и ЕКО по горизонтам. Определенные в горизонте С почв косимой степи (разрез 28)

концентрации микроэлементов позволили вычислить коэффициенты концентрации и рассеяния, как безразмерные и сравнимые показатели миграции и накопления элементов.

Валовое содержание изученных нами элементов в горизонте А практически равно таковому для пахотного горизонта черноземов обыкновенных европейской части СССР, за исключением цинка, содержание которого в верхней части горизонта А чернозема под лесополосой и на косимой заповедной степи 100 и 134 мг/кг соответственно (табл. 7).

В 2–4 раза меньше валового бора в пахотном горизонте черноземов Каменной Степи в сравнении со средним значением концентрации бора в черноземах европейской части СССР, что, вероятно, в значительной степени связано с относительной бедностью элементом почвообразующих пород (Зборищук Ю.Н., Зырин Н.Г., 1974).

Из таблицы ясно видно, что в исследованных экосистемах почвы накап-ливают микроэлементы, и кларки концентрации (Кк) для большинства микроэлементов и по горизонтам больше 1. В профиле почв заповедной степи наибольшей степенью концентрации отличаются цинк (Кк 1,3–2,4) и марганец с показателем Кк – 1,4–1,8. Вероятной причиной высоких кларков концентрации у Mn и Zn может быть образование в верхней части гумусового горизонта органо-минеральных комплексов, а для цинка – загрязнение почв выхлопами моторов сельхозтехники.

Наибольшее рассеяние Ni, Cu, Zn, Pb в исследованных заповедных почвах отмечено в горизонтах B_{2Ca} и BC_{Ca}, что, вероятно, может быть обусловлено высокой карбонатностью, щелочной реакцией в этих горизонтах (табл. 7).

Ранжирование величин кларков изученных микроэлементов в черноземе косимой степи отчетливо показало, что в пределах почвенного профиля самые большие величины кларка характерны для марганца, а наименьшие – для свинца. Для чернозема под лесополосой такой четкой закономерности обнаружено не было (табл. 8).

Таблица 7 – Валовое содержание микроэлементов в черноземах залежи и лесополосы (Каменная Степь)

Разрез	Горизонт Глубина, см	Pb Kk	Zn Kk	Cu Kk	Ni Kk	Fe,% Kk	Mn Kk
38, Лесополоса №45	А 0-2	67 1,15	100 1,8	45 1,50	42 1,23	3,5 1,21	1054 2
	А 2-5	82 1,41	83 1,51	43 1,43	39 1,15	3,8 1,31	927 1,8
	А 5-10	79 1,36	74 1,34	40 1,33	49 1,44	3,9 1,34	567 1,1
	А 10-20	67 1,15	76 1,38	40 1,33	37 1,09	3,9 1,34	592 1,1
	А 20-52	66 1,14	78 1,42	41 1,37	50 1,47	3,9 1,34	760 1,4
	АВ 52-66	63 1,09	63 1,14	32 1,07	32 0,94	3,5 1,21	629 1,2
	B_{1Ca} до 92	68 1,17	56 1,02	36 1,20	39 1,15	3,2 1,1	682 1,3
	B_{2Ca} до 122	47 0,81	53 0,96	28 0,93	32 0,94	3,1 1,1	567 1,1
28, Косимая степь	А 0-2	53 0,91	134 2,4	41 1,37	45 1,32	3,8 1,31	959 1,8
	А 2-5	50 0,86	85 1,54	45 1,6	46 1,35	3,7 1,28	835 1,6
	А 5-10	68 1,17	135 2,4	43 1,43	42 1,23	3,8 1,31	914 1,8
	А 10-20	70 1,21	76 1,38	38 1,27	41 1,2	3,7 1,28	854 1,6
	А 20-55	66 1,14	74 1,34	36 1,2	39 1,15	4 1,38	765 1,4
	АВ 55-76	64 1,1	72 1,31	34 1,13	47 1,38	4,2 1,45	827 1,6
	BC_{Ca} до102	65 1,12	27 0,49	29 0,97	29 0,85	3,2 1,1	750 1,4
	С до 145	58	55	30	34	2,9	523

Таблица 8 – Ранжирование элементов по величине кларков концентрации (Кк)

Разрез		38 Разрез 28	
А 0-2 см	Mn>Zn>Cu>Ni>Fe>Pb	А 0-2 см	Zn>Mn>Cu >Ni>Fe>Pb
А 2-5	Mn>Zn>Cu>Pb>Fe>Ni	А 2-5	Mn>Zn>Cu>Ni>Fe>Pb
А 5-10	Ni>Pb>Fe,Zn>Cu>Mn	А 5-10	Zn>Mn>Cu>Fe>Ni>Pb
А 10-20	Zn>Fe>Cu>Pb>Mn>Ni	А10-20	Mn>Zn>Fe>Cu>Pb>Ni
А 20-52	Ni>Mn>Zn>Cu>Fe>Pb	А 20-55	Mn>Fe>Zn>Cu>Ni>Pb
АВ52-66	Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Ni	АВ 55-76	Mn>Fe>Ni>Zn>Cu>Pb
$B1_{Ca}$ 66-92	Mn>Cu>Pb>Ni>Fe>Zn	BC_{Ca} 76-102	Mn>Pb>Fe>Cu>Ni>Pb
$B2_{Ca}$ >92	Mn>Fe>Zn>Ni>CU>Pb		

Если сравнить полученные результаты с известными пределами фитотоксичного валового содержания микроэлементов, то наши данные ни по одному элементу не превышают пределы фитотоксичности. В верхней части гумусового горизонта чернозема косимой степи рассеивается свинец, а в горизонте ВС – никель, медь и цинк. В черноземе под лесополосой в горизонте $B2_{Ca}$ рассеиваются никель, медь, цинк и свинец. Марганец в вышеуказанных горизонтах накапливается.

Представленные выше результаты оценки поведения микроэлементов в двух видах экологических условий послужили «основой» для интерпретации итогов профильно-катенарного изучения распределения девяти химических элементов – физиологически важных и загрязнителей окружающей среды.

6.2. Микроэлементы в почвах катены

При этом в исследованных почвах пяти вышеуказанных участков Каменной Степи определены следующие свойства: содержание гумуса, $pH_{водн}$, CO_2 карб, ЕКО (ммоль-экв/100 г).

Черноземы под пашней в горизонте А содержат 6,3-6,7% гумуса, а в горизонте В в этих почвах обнаружено 1,4–2,6% гумуса (табл. 4). Абсолютное большинство исследованных почв характеризуется нейтральными значениями pH по профилю. Нижние части профиля почв под лесополосой, на залежи, имеют слабощелочные величины pH.

По величине CO_2 карб. можно иногда оценить степень выщелоченности черноземов. Среди почв пашни определенную выщелоченность

имеет разрез 68, в котором минимальное значение показателя до глубины около 150 см (табл. 4). Выщелоченной также вероятно является лугово-черноземная почва залежи (разрез 73).

Судя по величине и профильному распределению ЕКО, все исследованные почвы Каменной Степи обладают высокой степенью устойчивости к антропогенным воздействиям. ЕКО равномерно уменьшается вниз по профилю от 46-52 ммоль-экв/100 г до 17-27 ммоль-экв/100 г (табл. 4).

Черноземы заповедной степи в горизонте А содержат в 1,5-4,0 раза больше подвижных соединений меди, цинка, свинца, в 8 раз больше подвижного никеля, а хрома в 1,2 раза меньше. В горизонте А лугово-черноземных почв микропонижений залежи (участок 4) содержание подвижных форм свинца, кадмия, цинка, меди и никеля в 1,8–13,0 раз больше, чем приводимые в таблице 6, а содержание подвижного хрома практически одинаково. На микроповышении в пределах залежи превышение наших данных над табличными – в 2-8 раз (табл. П. 2).

В микропонижении на пашне у лесополосы 131 в пахотном горизонте содержание подвижных микроэлементов, по нашим данным, в 1,3–13 раз больше, чем приведенные значения в таблице 6, а на остальной пашне эти различия в 1,3–7 раз выше. В лесополосе 131 в двух исследованных разрезах значения величин подвижных форм микроэлементов, полученных нами (табл. П. 2), также оказались больше, чем в таблице 6. Ни по одному из шести рассмотренных элементов концентрация их подвижных форм в горизонте А не превышает ПДК.

Практически во всех исследованных почвенных разрезах на пяти выбранных участках кларки концентрации (Кк) валового марганца и хрома достигают по профилю 1,50. В горизонте А практически во всех разрезах преобладают Кк до 1,60 (за исключением разреза 17 на микроповышении). В горизонте А этого разреза наблюдалось слабое рассеивание всех изученных микроэлементов.

Сложнее распределение Кк и кларков рассеивания (Кр) в горизонтах A^1 и АВ. В почвах под лесополосой, в микропонижении на участке 1, в разрезах на залежи и в косимой заповедной степи в указанных выше горизонтах Кк достигает 1,65. В горизонте АВ разреза в некосимой степи большинство исследованных микроэлементов имело Кр до 1,70. Слабо концентрируется здесь только свинец (Кк = 1,14).

Слабо концентрируется в горизонтах В, ВС и С большинство исследованных микроэлементов в лесополосе, на пашне участка 3 (разрез 118), на залежном микропонижении (разрез 73), чьи Кк около 1,10. Для нижних горизонтов почв заповедной степи характерно заметное рассеивание микроэлементов (Кр до 1,60). Кр до 1,50 характерны для горизонтов В и ВС разрезов 17 (пашня) и 120 (пашня ниже лесополосы).

6.3. Подвижные формы микроэлементов

При анализе данных по содержанию подвижных микроэлементов в почвах Каменной Степи оказалось, что количество подвижного бора возрастает вниз по профилю почв пашни, что, по нашему мнению, связано с относительной легкостью миграции элемента по профилю и возможным его накоплением на карбонатном и испарительном геохимических барьерах. На заповедных и залежных участках, вероятно, при сезонно проявляющемся испарительном водном режиме возрастает вверх по профилю количество подвижного бора (табл. П. 2).

Распределение по профилю подвижных форм других микроэлементов не подчиняется выше отмеченной закономерности. Два исследованных нами подтипа почв по литературным данным практически не различаются по содержанию подвижных форм микроэлементов в пахотном слое («Система…», 2006).

Для всех остальных исследованных микроэлементов на всех участках, согласно данным таблицы П. 2, наблюдается заметное увеличение концентрации подвижных форм элементов вверх по профилю почв, особенно в горизонте А, где подвижные формы микроэлементов по всей видимости образуют органо-минеральные комплексы, в которых и аккумулируется большая часть подвижных форм элементов (Протасова Н.А., Щербаков А.П., 2003; Зырин Н. Г, Зборищук Ю.Н., 1981).

По нашим данным в верхнем горизонте лугово-черноземных почв содержание подвижных форм хрома, никеля, меди, цинка и кадмия выше, чем в черноземе. При этом с нижней границы гумусового горизонта заметно понижается содержание подвижных форм микроэлементов (табл. П. 2). Содержание подвижных форм всех изученных микроэлементов ниже ориентировочно допустимых концентраций (ОДК)

по всем элементам, кроме никеля. Причем, превышение ОДК по никелю имеет место до глубины более одного метра по профилю почвы.

Разнообразие реактивов для извлечения подвижных форм микроэлементов практически исключает возможность обоснованного сравнения полученных данных с приводимыми в литературе. Для широко распространенных в Каменной Степи черноземов обыкновенных можно с уверенностью утверждать, что профильное и пространственное распределение подвижных форм изученных микроэлементов зависит от содержания гумуса, наличия карбонатного геохимического барьера и характера или особенностей водного режима.

Анализ пространственного распределения концентраций подвижных форм изученных микроэлементов в горизонте А на различных угодьях Каменной Степи показал, что наименьшие величины содержания подвижных форм свойственны, как правило, участкам заповедной степи, а наибольшее содержание большинства подвижных форм микроэлементов характерно для лесополосы 131 и залежи (бывший Сурчиный заповедник). Ниже в порядке убывания отражено содержание подвижных форм микроэлементов на исследуемых участках.

B 5 4 2 1 3	Cr 2 1 4 3 5	Mn 2 4 1 5 3	Co 2 1 3 4 5
Ni 2 4 1 3 5	Cu 2 4 1 3 5	Zn 2 4 3 1 5	Cd 2 4 5 1 3
Pb 2 4 1 3 5			

6.4. Доля подвижных микроэлементов от валовых

В таблице 9 отображена доля подвижных микроэлементов от валовых.

Для всех изученных нами элементов, кроме бора, характерно резкое уменьшение содержания подвижных микроэлементов при переходе от горизонта А к нижележащим. Изученные нами химические элементы в почвах Каменной Степи по величине доли подвижных форм микроэлементов четко разделяются на две группы. Низкой долей подвижных форм (около 1%) отличаются бор, хром, медь, цинк и свинец. Однопроцентная доля подвижных форм этих элементов характерна для почв косимой и некосимой степи, черноземов залежи и пашни на склонах, черноземов в микропонижении у лесополосы 131.

Вторую группу с долей подвижных форм элементов до 50 и более процентов составляют марганец, кобальт, никель и кадмий (табл. 9).

Таблица 9. Доля подвижных микроэлементов от валовых в почвах, %

Участок	Горизонт	B	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
1 пашня р. 17	$A_{пах}$	2.4	1,8	35,1	22,6	14,0	1,6	3,0	41,4	11,5
	AB	3,1	0,1	2,2	0,7	0,3	1,1	0,6	0,3	0,3
	B	11,0	0,3	3,1	1,4	0,6	1,6	0,5	3,6	0,4
1 пашня р. 68	A	1,6	1,8	51,1	32,8	19,9	2,8	3,6	47,0	13,7
	AI	5,9	0,6	17,7	7,2	9,4	1,3	0,9	3,4	2,7
	AB	3,5	0,0	2,0	0,8	0,5	0,7	0,2	8,3	0,7
	B1	4,7	0,1	2,7	1,0	0,6	1,3	0,4	11,1	0,4
	B2	5,0	0,2	4,3	1,0	0,6	1,8	0,3	15,0	0,5
	BC	11,3	0,2	4,5	1,0	0,7	1,0	0,5	6,7	0,3
	C	22,8	0,2	7,1	1,3	0,6	1,4	0,4	5,0	0,4
2 лесоп. р. 16	A	3,2	2,6	7,6	37,0	23,2	2,5	3,8	63,1	13,1
	AB	2,6	2,4	31,7	3,5	14,1	2,4	2,9	44,4	11,5
	B	3,0	0,2	2,6	1,0	0,6	1,3	1,3	6,2	0,4
2 лесоп. р. 69	A	1,9	1,8	62,4	38,4	20,9	3,0	5,1	76,5	17,0
	AB	1,2	1,8	54,5	28,1	16,0	2,2	3,9	62,6	12,1
	B1	0,7	2,4	50,5	32,2	21,0	3,0	4,5	38,9	14,9
	B2	1,0	5,4	49,8	32,2	18,2	8,0	6,9	18,2	18,3
	B3	3,5	3,3	32,0	10,0	16,5	3,7	1,9	31,2	4,4
	BC	0,5	0,1	3,7	0,7	0,4	0,4	0,4	5,9	0,2
	C	0,5	0,1	4,9	1.9	0,8	1,4	0,6	0,7	1,5
3 пашня р. 118	$A_{пах}$	2,9	1,9	43,4	35,2	14,2	1,5	8,3	5,2	11,9
	AB	3,3	0,2	2,4	1,0	0,9	1,2	6,7	11,1	1,2
	B	4,3	0,2	1,9	0,9	0,5	1,4	0,6	5,0	0,5
3 пашня р. 120	$A_{пах}$	1,9	1,6	39,4	25,5	16,4	2,1	3,5	52,9	12,0
	AB	0,1	1,8	24,9	16,3	13,7	2,0	3,1	46,1	10,6
	B	3,9	1,7	27,3	15,5	15,4	3.2	2,7	42,8	10,2

Участок	Горизонт	B	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
4 залежь р. 71	A	3,7	1,8	57,6	31,9	16,2	1,4	3,4	55,0	14,6
	AB	4,4	0,2	2,7	1,1	0,7	5,0	1,3	6,7	0,8
	B1	1,7	0,1	1,0	1,0	0,3	1,0	0,4	7,1	0,2
	B2	9,4	0,2	2,1	1,2	0,4	1,1	0,4	8,3	0,5
	B3	3,3	0,3	4,6	1,4	0,6	1,0	0,4	7,7	0,5
	BC	1,3	0,2	5,1	0,8	0,8	1,1	0,4	59	0,2
	C	4,9	0,2	7,6	2,0	1,0	1,5	0,7	7,1	0,4
4 залежь р. 73	A	1,1	1,0	42,1	27,4	21,4	3,2	1,7	11,9	7,7
	AB	0,6	2,4	28,3	20,6	21,2	3,4	2,5	3,7	7,4
	B1	0,6	3,1	25,6	21,4	12,3	8,9	5,4	4,6	12,2
	B2	1,8	3,9	32,8	21,7	17,9	9.5	6,2	4,5	13,7
	B3	1,0	0,2	3,7	0,9	0,4	0,9	0,3	5,9	0,2
	BC	1,5	0,2	3,8	1,0	0,5	1,4	0,4	6,2	15,4
5 запов. р. 103	Ad	2,7	1,2	43,6	26,0	12,8	1,5	3,5	54,5	13,1
	A	2,6	1,9	40,1	23,7	14,5	1,5	2,5	50,0	11,4
	AB	2,4	2,6	31,3	18,1	15,7	2,0	2,2	41,1	11,3
	B1	4,2	0,2	3,4	1,0	1,3	1,4	0,6	11,5	0,8
	B2	3,8	0,2	2,0	1,1	0,4	1,0	0,3	6,2	0,5
	BC	2,0	0,2	1,9	0,8	0,4	0,8	0,4	5,9	1,5
5 запов. р. 104	A	1,8	0,2	37,6	22,3	14,0	1,1	1,2	57,6	9,4
	AB	4,1	0,4	18,8	5,3	8,7	1,4	1,1	43,4	5,4
	B1	0,8	0,2	2,7	1,1	0,6	2,1	0,7	5,3	0,7
	B2	3,1	0,1	2,8	1,1	0,5	1,4	0,6	6,7	1,5

В некоторых черноземах лесополосы (участок 2) доля подвижных форм марганца, кобальта, никеля, свинца и кадмия составила десятки процентов. Вышеприведенные данные свидетельствуют о том, что для данной группы химических элементов необходимо, по крайней мере, два экстрагента. Самой большой долей подвижных форм марганца, ко-

бальта, никеля, кадмия и свинца отличается чернозем обыкновенный в лесополосе 131 (разрез 69) и лугово-черноземная почва микропонижения залежи.

Доля подвижных марганца и кадмия в почвах лесополосы более 50%, что можно объяснить слабокислой величиной pH верхнего горизонта и заметной миграцией элементов в виде органо-минеральных комплексов и адсорбцией на илистых частицах, которые мигрируя по профилю, способствовали накоплению микроэлементов на различных барьерах. При сезонном проявлении выпотного водного режима не исключена восходящая миграция и аккумуляция подвижных микроэлементов вверх по профилю.

При сравнении среднего содержания подвижных форм микроэлементов и доли подвижных форм в пахотном горизонте (в слое 0–20 см) оказалось, что доля подвижных форм в верхнем горизонте почв Каменной Степи в три-пять раз больше, чем рассчитанные нами ранее для черноземов ЦЧП (Зборищук Ю.Н., Зырин Н.Г., 1974, 1977, 1978). Возможным объяснением этого факта может быть использование различных реактивов для экстракции подвижных форм.

Самые высокие значения доли подвижных микроэлементов ожидаемо характерны для горизонтов А и АВ, где они достигает 70%. Резкое уменьшение доли подвижных форм отмечается на всех участках на глубине около 150 см в пределах горизонтов В и ВС (табл. П. 2).

6.5. Корреляционный анализ

В почвоведении, как и во всех науках об окружающей среде, большое значение имеет количественная оценка взаимосвязей между компонентами, характеристиками и свойствами почв и почвенного покрова. Связи, когда одному значению переменной соответствует несколько значений другой переменной, принято называть корреляционными. Применяя компьютерную программу, мы провели оценку корреляционных связей профильного содержания валовых и подвижных форм микроэлементов и некоторых свойств основных почв Каменной Степи.

Так как имевшиеся в нашем распоряжении данные составляли различные по объему корреляционные ряды, нами в качестве опорных использовались (с вероятностью 0,95) следующие величины коэффициентов корреляции: 0,28; 0,56-0,57; 0,63-0,66; 0,82-0,86. Сам по себе

коэффициент корреляции не вскрывает ни природы связи, ни что от чего зависит. Он представляет меру связи между величинами, а не зависимость x от y. Природу связи, причинно-следственные отношения, лежащие в основе связей, позволяет вскрыть лишь предметное исследование объектов той или иной науки.

При оценке результатов корреляционного анализа, кроме абсолютных величин, важно составить представление о тесноте связи. Одной из процедур решения этой проблемы является возведение в квадрат значения коэффициента корреляции. Этот показатель носит название коэффициент детерминации. Он является оценкой в долях единицы той части варьирования одного признака, которая связана с варьированием другого признака (Дмитриев Е.А., 1995).

За весьма тесную можно условно считать такую связь, при которой коэффициент корреляции больше 0,85. При этом варьирование признаков взаимосвязано на 75 % и более. Коэффициент корреляции 0,70-0,85 свидетельствует о тесной связи, коэффициент корреляции менее 0,7 – признак слабой тесноты связи. При вычислении количественных статистических показателей надо постоянно помнить, что практически ни один из критериев и характеристик не может что-то доказать. Например, числовое значение коэффициента корреляции, даже если оно велико и достоверно определяется, еще не дает оснований для четких суждений о практической важности обнаруженной связи (Дмитриев Е.А., 1995).

Расчет значимых коэффициентов корреляции валового содержания микроэлементов и профильного распределения гумуса в исследованных почвах Каменной Степи обнаружил между ними по большей части относительно редкую слабую связь. В то же время весьма тесная связь отмечена только для марганца, меди, цинка и содержания гумуса в почвах некосимой и косимой степи и для меди в лесополосе 131. Только около 40% использованных для обработки корреляционных рядов по валовому содержанию микроэлементов и гумуса характеризуются слабыми, но значимыми величинами коэффициентов корреляции. То есть, по нашим данным, валовое содержание микроэлементов слабо или совсем не коррелирует с профильным содержанием гумуса в черноземах.

По нашим данным около 60 % пар корреляционных рядов имеют значимые коэффициенты корреляции подвижных форм микроэлементов и содержания гумуса, из которых 75 % характеризуются тесной

или весьма тесной связью. Подвижные формы хрома, марганца, кобальта, никеля, цинка, кадмия и свинца, в отличие от валовых количеств, достоверно коррелируют с содержанием гумуса в черноземах периодически переувлажненной пашни у лесополосы 131 (участок 1) и в заповедной степи (участок 5). В лесополосе 131 (участок 2) по величине коэффициента корреляции подвижных форм микроэлементов и гумуса тесная и весьма тесная связь отмечена для свинца, кадмия, никеля, кобальта и марганца.

Корреляционный анализ с привлечением рассуждений о коэффициенте детерминации для попытки качественного определения тесноты связи в корреляционных парах отчетливо показал, что валовое содержание изученных нами микроэлементов слабо коррелирует с общим содержанием гумуса при незначительной тесноте связи. В то же время общее содержание гумуса отчетливо коррелирует с содержанием подвижных форм микроэлементов при средней и чаще высокой тесноте связи. Последнее обстоятельство может быть, по нашему мнению, в какой-то мере объяснено динамичностью подвижных форм микроэлементов при образовании и миграции органоминеральных комплексов.

Значимые отрицательные коэффициенты корреляции обнаружены нами только в 30 % пар совокупностей при оценке корреляции валового содержания исследованных микроэлементов и профильного распределения значений pH (водн). При этом в абсолютном большинстве обнаружена слабая связь валовых концентраций микроэлементов с pH.

Около 70 % использованных для оценки корреляции рядов обнаружили значимые величины показателя корреляции подвижных форм микроэлементов и pH. Значимые корреляции отмечены практически для всех совокупностей по марганцу, кобальту, никелю, цинку, кадмию и свинцу. Нейтральные и слабощелочные значения pH и их варьирование по профилю черноземов Каменной Степи, как показал корреляционный анализ, представляются наиболее вероятной причиной миграции и распределения подвижных форм микроэлементов в исследованных почвах.

Косвенным подтверждением влияния pH на распределение и миграцию микроэлементов представляется тесная или весьма тесная связь распределения подвижных форм микроэлементов и pH. Тесно и очень тесно коррелируют на пашне в Каменной Степи с pH подвижные бор, хром, марганец, кобальт, цинк, кадмий и свинец. Причем,

чаще всего это происходит на пашне склоновых пространств и реже – на переувлажненных участках.

В лесополосе 131 и на заповедных участках тесно связаны с изменением pH подвижные марганец, кобальт, никель, цинк, кадмий и свинец. Вышеперечисленные элементы слабо связаны с изменением pH в почвах залежного участка (участок 4).

Результаты корреляционного анализа показали, что около 60% рассчи-танных коэффициентов корреляции валовых концентраций и подвижных форм изученных микроэлементов с CO_2 карбонатов значимы с вероятностью 0,95 и практически все коэффициенты отрицательны из-за карбонатности профиля почв и наличия карбонатного геохимического барьера. Единственная положительная корреляция при тесной связи обнаружена между валовым содержанием бора и CO_2 карбонатов на пашне участка 3, где возможна водная латеральная миграция микроэлементов.

Весьма тесная и тесная связь валового содержания микроэлементов и CO_2 карбонатов отмечена практически для всех исследованных участков по марганцу, кобальту и меди. Весьма тесная и тесная отрицательная корреляционная связь обнаружена нами для валовых форм хрома, марганца, кобальта, никеля, меди, цинка и свинца в пределах залежного участка 4, который до конца XX века был заповедным, когда ушли его обитатели – сурки, и участок стал залежью. Отрицательный характер корреляционной связи после продолжительного периода работы сурков по перемешиванию минеральной массы черноземов, вероятно, обусловлен зоогенным фактором образования микрорельефа участка.

На заповедном участке 5, судя по значениям отрицательного коэффициента корреляции, тесно связаны с пространственной и профильной вариацией величины CO_2 карбонатов цинк, медь и марганец. Как свидетельствуют полученные нами данные (табл. 4; табл. П. 1), с увеличением вниз по профилю черноземов обыкновенных Каменной Степи содержания $CaCO_3$ заметно уменьшается валовое содержание микроэлементов. При этом, только за счет карбоната кальция и недоступности CO_2 величина pH может достигать 10, а при доступе CO_2 из атмосферы составлять около 8,3, что и имеет место в нашем случае.

Как и для валового содержания микроэлементов, только подвижная форма бора положительно коррелирует с содержанием карбонатов в почвах пашни на склоне (участок 3). Отрицательные значимые коэффициенты корреляции подвижных форм микроэлементов и CO_2 кар-

бонатов исследованных почв количественно демонстрируют весьма тесную и тесную связь на всех участках по марганцу, никелю, кадмию и свинцу.

Весьма тесная отрицательная корреляционная связь содержания подвижных форм микроэлементов и CO_2 карбонатов обнаружена для пашни участка 3 по хрому, марганцу, кобальту, никелю, цинку, кадмию и свинцу. Тесно связаны вышеуказанные показатели черноземов обыкновенных Каменной Степи в лесополосе 131 (участок 2) по марганцу, кобальту, никелю и кадмию. На заповедном участке 5 нами обнаружена тесная отрицательная связь по хрому, кобальту, цинку, кадмию и свинцу.

Тесная отрицательная корреляционная связь с CO_2 карбонатов установлена также для подвижных форм хрома, марганца, кобальта, никеля, меди, цинка и свинца. Как следует из вышеизложенных особенностей результатов корреляционного анализа, практически все подвижные формы изученных микроэлементов тесно или очень тесно связаны с варьированием CO_2 карбонатов. Представляется справедливым выводом утверждение, что профильное и пространственное распределение карбонатов является основным фактором распределения подвижных форм микроэлементов в черноземах Каменной Степи.

Исследованные нами микроэлементы в почвах Каменной Степи находятся в обменной форме. Их количество и распределение в профиле почв во многом определяют доступность химических элементов растениями. Важным свойством почвы и её поглощающего комплекса представляется емкость катионного обмена (ЕКО), которая представляет общее количество катионов удерживаемых почвой в обменном состоянии при стандартных условиях и способных к обмену на катионы взаимодействующего с почвой раствора (Орлов Д.С. и др., 2005). Наибольшие величины ЕКО характерны для черноземов, особенно обыкновенных.

Определение коэффициентов корреляции валового содержания микро-элементов и ЕКО показало, что только 30% коэффициентов значимы с вероятностью 0,95, и только около половины значимых коэффициентов полученных данных свидетельствуют о тесной и весьма тесной связи. Валовые хром, кобальт, цинк и медь тесно и весьма тесно связаны с ЕКО в почвах заповедных участков. Ввиду повышенного валового содержания изученных микроэлементов в черноземах Каменной Степи вполне обосновано предположение о том, что места,

свободные для катионного обмена, скорее всего прочно и безобменно заняты в минеральной матрице валовых форм элементов. В этом, по нашему мнению, причина отмеченной выше низкой значимой корреляционной связи ЕКО с валовым содержанием микроэлементов.

Более 60% пар корреляционных рядов характеризуется значимыми и высокими показателями корреляции (до 0,98). Совокупности всех полученных данных по подвижным формам Mn, Co, Ni, Cd и Pb положительно коррелируют с ЕКО и обнаруживают весьма тесную связь по величине коэффициента детерминации между ЕКО и подвижными формами элементов. Ни на одном из исследованных участков не обнаружено значимой корреляции содержания подвижной меди и ЕКО. Одной из возможных причин этого явления представляется вид экстрагента и желательность выбора более информативного реагента для количественной оценки содержания подвижных форм микроэлемента.

Только 14% оцененных совокупностей иллюстрируют слабую связь между ЕКО и подвижными формами микроэлементов. Наиболее тесно в различных экологических условиях с ЕКО связаны марганец, кобальт, никель, цинк, кадмий и свинец (участки 2, 4 и 5). Причем эта связь весьма тесная и тесная. Значимая корреляционная связь содержания подвижных форм микроэлементов физиологически важных и загрязнителей в черноземах Каменной Степи, по нашему мнению, в значительной степени обусловлена физическими, физико-химическими и химическими свойствами почв исследованного региона, на что указывали Н.А. Протасова, А.П. Щербаков (2003).

Результаты корреляционного анализа показали, что подвижные формы меди практически не коррелируют с количеством гумуса, величиной pH, содержанием CO_2 карбонатов и ЕКО в почвах Каменной Степи. Подобное поведение подвижных форм меди в профиле, вероятно, связано с полимодальностью распределения карбонатов и прочностью закрепления элемента в органоминеральных комплексах и кристаллической решетке первичных и вторичных минералов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среднее содержание валовых и подвижных форм изученных микроэле-ментов в некоторых почвах Каменной Степи практически во всех экологических условиях равно таковому в черноземах обыкновенных европейской части России.

Оценка профильного и латерального распределения величин кларка концентрации и рассеивания изученных микроэлементов в почвах различных угодий обнаружила, что около половины микроэлементов рассеиваются в профиле и латерально в процессах функционирования и трансформации черноземов при различных антропогенных нагрузках. Козловский Ф.И. (1987) установил особенности современной естественной и агрогенной динамики, которые отчетливо представляют сходство двух групп экосистем и их морфологических элементов в пределах степной зоны, а также заметное природоподобие агрогенной эволюции почв.

Рассеивание микроэлементов семейства железа, вероятно, связано с про-явлением в той или иной степени в антропогенно преобразованных черноземах процесса лессиважа, при котором органо-минеральные соединения передвигаются по профилю. Концентрация микроэлементов в профиле почв Каменной Степи, вероятно, обусловлена наличием карбонатного или щелочного геохимического барьеров. По нашим данным самые большие значения КК (до 7) характерны для бора в этих почвах (Зборищук Ю.Н. 1977).

Профильное распределение валового содержания микроэлементов в изученных почвах характеризуется по большей части мономодальностью и снижением вниз по профилю практически для всех микроэлементов для любых экологических условий и антропогенных нагрузок в Каменно-степном ландшафте.

Практически для всех горизонтов исследованных черноземов отмечена концентрация бора (КК>1), что не удивительно при возможном проявлении в продолжительный весенне-летний период выпотного водного режима. Аналогичная закономерность, несколько в меньшей степени, характерна для кадмия и свинца.

Отсутствие проявления подобной закономерности в распределении остальных исследованных элементов связано, по нашему мнению, с использованным экстрагентом, не полностью извлекающим опреде-

лявшиеся нами микроэлементы. Вместо кларков литосферы, для оценки концентрации или рассеивания элементов мы использовали значения концентрации элементов в почвообразующей породе.

При использовании вышеизложенного подхода ,хром, марганец, кобальт и цинк по преимуществу концентрируются в большинстве исследованных почв. Медь и никель, по нашим данным, концентрируются в верхних горизонтах черноземов Каменной Степи, а в нижней части почвенного профиля они, как правило, рассеиваются.

При анализе данных по содержанию подвижных микроэлементов в почвах Каменной Степи оказалось, что количество подвижного бора возрастает вниз по профилю. Содержания валовых и подвижных форм исследованных микроэлементов в горизонте А и вниз по профилю почв Каменной Степи в 1,5–2,0 раза меньше кларков литосферы, что во многом связано с выбором экстрагента. Содержание валовых и подвижных форм микроэлементов в почвах в различных экологических условиях при различном использовании намного ниже значений ПДК и ОДК.

Полученные нами данные по свойствам черноземов обыкновенных и лугово-черноземных почв показали, что содержание и профильное распределение органического вещества и карбонатов оказывает заметное влияние на профильную и латеральную миграцию микроэлементов в почвах Каменной Степи.

Характер использования территории Каменно-степного ландшафта практически не влияет на валовое содержание микроэлементов в горизонте А. Карбонатный геохимический барьер способствовал относительной аккумуляции большинства определенных валовых микроэлементов в горизонте $B1_{Ca}$, исследованных почв.

В пределах одного участка содержание подвижных форм микроэлементов может значительно (в два-три раза) отличаться при абсолютном равенстве содержания валовых количеств.

Повышенное по сравнению с ПДК (в 2 раза и более) валовое содержание никеля по всему профилю и подвижный никель выше ПДК в горизонтах А и АВ связаны с повышенным локальным фоном по Ni и способностью элемента образовывать комплексы с низкомолекулярными органическими веществами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Ю.В. ТМ в почвах и растениях. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 143 с.

2. Алехин В.В. Центрально-Черноземные степи / В.В. Алехин. – М.: Изд-во «Коммуна». – 1934. – 124 с.

3. Алифанов В.М. Палеокриогенные особенности морфогенеза черноземов Каменной степи / В.М.Алифанов, Л.А. Гугалинская и др. // Почвоведение. – 2001. – № 8. – С. 909-917.

4. Антипов-Каратаев И.Н. О природе поглощения ионов глинами и почвами. II. Поглощение одновалентных и двухвалентных катионов каолинитовой глиной / И.Н. Антипов-Каратаев, Г.М. Кадер // Коллоидный журнал.- 1947.- Т. 9. – № 3. – С. 161-168.

5. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв / Е.В. Аринушкина. М.: Изд-во Москов. ун-та, 1970. – 478 с.

6. Ахтырцев Б.П. Почвенный покров Среднерусского Черноземья / Б.П. Ахтырцев, А.Б. Ахтырцев. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1993. – 216 с.

7. Барбер С.А. Биологическая доступность питательных веществ в почве. Механистический подход. (ред. Хавкин Э.Е.). – М.: Изд-во: Агропромиздат, 1988. – 376 стр.

8. Бобко Е.В. Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 29-62.

9. Бумбу Я.В. Простые опыты с микроэлементами / Я.В. Бумбу. – Кишинев: Штиинца, 1986. – 31 с.

10. Виноградов А.П. Основные закономерности в распределении микроэлементов между растениями и средой / А.П. Виноградов // Микроэлементы в жизни растений и животных. – М., 1952. – С. 7.

11. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / А.П. Виноградов. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 238 с.

12. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры / А.П. Виноградов // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555-571.

13. Винокурова И.К. Климатические условия Каменной Степи / И.К. Винокурова // Лесные полосы Каменной степи: Сб. статей. – Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд-во, 1967. – С. 5-23.

14. Водяницкий Ю.Н. Образование оксидов марганца в почвах / Ю.Н. Водяницкий, А.А. Васильев, С.Н. Лесовая и др. // Почвоведение. – 2004. – № 6.- С. 663-675.

15. Водяницкий Ю.Н. Свойства тяжёлых металлов и металлоидов в почвах / Ю.Н. Водяницкий // Агрохимия. – 2009. – № 8. – С. 85–94.

16. Вопросы травопольной системы земледелия. Итоги работ по изуче-нию изменения почв под воздействием комплекса Докучаева-Костычева-Вильямса. – Т. 2. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 660 с.

17. Воробьева Л.А. Химический анализ почв / Л.А. Воробьева. –М.: МГУ, 1998. – 272 с.

18. Глазовская М.А. Общее почвоведение и география почв. – М.: Выс-шая школа, 1981. – 400 с.

19. Горбатов В.С. Адсорбция почвой цинка, свинца, кадмия / В.С. Горбатов, Н.Г. Зырин, А.И. Обухов // Вестник МГУ. – Сер. 17. – Почвоведение. – 1988. – № 1. – С. 10-16.

20. Горбунова Н.С. Формы соединений марганца, меди, цинка, никеля, свинца и кадмия в чернозёмах Центрального Чернозёмного региона: Автореферат дис. ... канд. биол. наук / Н.С. Горбунова. Воронеж, 2005. – 24 с.

21. Даутов Р.К. Микроэлементы в сельском хозяйстве / Р.К. Даутов, В.Г. Минибаев, И.А. Гайсин. – Казань: Таткнигоиздат, 1985. – 64 с.

22. Девис Д., Перрет М. Свободные радикалы в органическом синтезе. – М.: Мир, 1980. – 208 с.

23. Скачать (прямая ссылка): svobodniyeradicali1980.djvu

24. Дмитриев Е. А. Математическая статистика в почвоведении / Е.А. Дмитриев. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 297 с.

25. Дмитриев Е.А. Представление о почвах как функция методов их изучения / Е.А. Дмитриев // Почвоведение. – 1999. – № 1. – С.145-151.

26. Докучаев В.В. Наши степи прежде и теперь. 1892 / В.В. Докучаев // По изданию: Докучаев В.В. Сочинения. Т. IV. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1951. – С. 11-102.

27. Ермоленко Н Ф. Микроэлементы и коллоиды почв / Н.Ф. Ермоленко // Минск, 1966. – 237 с.

28. Ерусалимский В.И. Долговечность и устойчивость различных древесных пород в лесных полосах Каменной Степи / В.И. Ерусалимский, В.В. Тищенко, А.Г. Ахтямов // Каменная Степь: проблемы из-

учения почвенного покрова / Науч. тр. – М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2007. – С. 134-145.

29. Жизневская Г.Я. О роли меди в азотфиксации / Г.Я. Жизневская // Микроэлементы в сельском хозяйстве Сибири. – Красноярск, 1964. – С. 174-195.

30. Зборищук Ю.Н, Зырин Н.Г. Среднее содержание B, Mn, Co, Cu, Zn, Mo и J в почвах европейской части СССР //Агрохимия. -1974. – № 3. – С. 88-94.

31. Зборищук Ю.Н., Зырин Н.Г. Марганец и кобальт в почвах европейской части СССР // Вестник МГУ, серия почвоведение, 1977. – № 1. – 32-40.

32. Зборищук Ю.Н., Зырин Н.Г. Медь и цинк в пахотном слое (0-20 см) почв европейской части СССР // Почвоведение. – 1978. – № 1. – С. 31-37.

33. Зборищук Ю.Н., Рымарь В.Т., Чевердин Ю.И. Состояние чернозёмов обыкновенных Каменной Степи. М., 2007. – 160 с.

34. Зырин Н.Г., Пацукевич З.В. Бор в породах и почвах Крыма // Агрохимия. – 1964. – № 6.

35. Зырин Н.Г. Микроэлементы в почвах и использование микроудобрений в виноградарстве / Н.Г. Зырин, В.А. Большаков, З.В. Пацукевич и др. – М.: Изд-во МГУ, 1972. – 270 с.

36. Зырин Н.Г., Зборищук Ю.Н. Бор в пахотном слое почв европейской части СССР. – Почвоведение. – 1975. – № 9. – С. 49.

37. Зырин Н.Г., Титова А.А. Формы соединений кобальта в почвах // Содержание и формы соединений микроэлементов в почвах. –М.: Изд-во МГУ, 1979. – С. 160-224.

38. Зырин Н.Г., Мотузова Г.В., Симонов В.Д., Обухов А.И. Микроэлементы (бор, марганец, медь, цинк) в почвах Западной Грузии // Содержание и формы соединений микроэлементов в почвах. –М.: Изд-во МГУ, 1979. – С. 3-159.

39. Зырин Н.Г., Зборищук Ю.Н. Общие закономерности распределения подвижных форм микроэлементов в почвах европейской части СССР. В сб. Микроэлементы в почвах СССР. –М.: Изд-во МГУ, 1981.

40. Ильин В.Б. Биогеохимия и агрохимия микроэлементов (Mn, Cu, Mo, B) в южной части Западной Сибири / В.Б. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1973. – 389 с.

41. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. М.: Мир, 1989. – 439 с.

42. Камышев Н.С. Растительный покров Воронежской области и его охрана. – Изд-во ВГУ, Воронеж, 1976. – 184 с.

43. Каталымов М.В. Применение микроэлементов в растениеводстве / Доклад проф. М. В. Каталымова // Доклады М-ва сельского хозяйства СССР. Совещание по вопросам наиболее эффективных способов использования минер., органич. и бактер. удобрений. Май 1957 г. – М., 1957. – 20 с.

44. Каталымов М.В. Микроэлементы и микроудобрения / М.В. Каталымов. – М.-Л.: Химия, 1965. – 330 с.

45. Келлер Б.А. Растительность Воронежской губернии / Б.А. Келлер. – Воронеж, 1921. – 114 с.

46. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. – 223 с.

47. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука, 1970. – 180 с.

48. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974. – 299 с.

49. Ковда В.А., Якушевская И.В,, Тюрюканов А.Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза М., Наука, 1959, 67 с.

50. Ковда В.А. О возможности определения возраста гидроморфных почв по содержанию СаСО3 / В.А. Ковда, Е.М. Самойлова // Доклады АН СССР, 1963. – Т.182. – № 5. – С.1201-1203.

51. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. – 264 с.

52. Козловский Ф.И. Современные естественные и антропогенные процессы эволюции почв (на примере степной зоны): Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора географических наук. М., 1987.

53. Коляда О.А. Микроэлементы в почвах различных ландшафтов Каменной Степи // Автореферат дисс. … канд. биол. наук / О.А. Коляда. – Воронеж, 2012. – 26 с.

54. Корякина В.Ф. Микроэлементы на сенокосах пастбищах. Л.: Колос, 1974. – 187 с.

55. Кригер Н.И. Лёсс, его свойства и связь с географической средой. –М.: Наука, 1965.

56. Кулагин А.А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей: монография / А.А. Кулагин, Ю.А. Шагиева; [отв. ред. Г.С. Розенберг]. – М.: Наука, 2005. – 190 с.

57. Любимова И.Н. Содержание и формы соединений молибдена, ванадия и хрома в почвах // Содержание и формы микроэлементов в почвах. – М.: Изд-во МГУ, 1979. – С. 224-293.

58. Мальгин М.А. Биогеохимия микроэлементов в Горном Алтае. Новосибирск: Наука, 1978. – 324 с.

59. Мальцев А.И. Фитосоциологические исследования в Каменной Степи. (К вопросу о происхождении и сменах растительности степей) / А.И. Мальцев // Тр. по прикладной ботаники и селекции. – Л., 1923. – Т. 13. – Вып. 2. – С. 135-255.

60. Мельничук Ю.П. Влияние ионов кадмия на клеточное деление и рост растений. – Киев: Наукова думка, 1990. – 148 с.

61. Мильков Ф.Н. Каменная Степь: Лесоаграрные ландшафты / Ф.Н. Мильков, А.И. Нестеров, П.Г. Петров. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1992. – 224 с.

62. Минеев В.Г. и др. Тяжелые металлы и окружающая среда в условиях современной химизации. Сообщение 2. Свинец // Агрохимия. – 1982. – № 9. – С. 126-140.

63. Мотузова Г.В., Безуглова О.С. Экологический мониторинг почв. – М.: Изд-во «Гаудеамус», 2007. – 237 с.

64. Мутускин А.А. Медьсодержащие белки растений // Известия АН СССР. Сер. Биол. – 1970. – № 5. – С. 698-706.

65. Нелюбова Г.Л., Церлинг В.В. Растительная диагностика корневого питания сельскохозяйственных культур. М.: ТСХА, 1979. – 174 с.

66. Никанорова Н.Н. Естественно-исторические условия Каменной Степи и характеристика основных почвенных разностей / Н.Н. Никанорова // Вопросы травопольной системы земледелия. Итоги работ по изучению изменения почв под воздействием комплекса Докучаева-Костычева-Вильямса. – Т. 2. – М.: АН СССР, 1953. – С. 55–204.

67. Островская Л.К. Физиологическая роль меди и основы применения медных удобрений. Киев, 1961. – 234 с.

68. Орлов Д.С. и др. Химия почв / Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Н.И. Суханова. – М.: Высшая школа, 2005. – 427 с.

69. Палавеев Т. Бор в черноземах и серых лесных почвах северной Болгарии. // Почвоведение. – 1958. – № 9. – С. 38–45.

70. Пейве Я.В. Микроэлементы и их значение в сельском хозяйстве // Я.В. Пейве. – М.: Изд-во с.-х. л-ры, журналов и плакатов, 1961. – 63 с.

71. Пейве Я. В. Агрохимия и биохимия микроэлементов. –М.: Наука, 1980. – 430 с.

72. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. –М.: Недра, 1972. – 288 с.

73. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. – 354 с.

74. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 423 с.

75. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. –М.: Астрея-2000, 1999. – 763 с.

76. Пинский Д.Л. Формы соединений цинка и кадмия в естественных и загрязненных почвах. // Цинк и кадмий в окружающей среде. – М.: Наука, 1992. – С. 74–83.

77. Погодин С. А. Кадмий / Краткая химическая энциклопедия. – Т. 2. – М.: Изд-во Большая советская энциклопедия, 1963. – 543 с.

78. Протасова Н.А., Кураков В.И., Копаева М.Т. Микроэлементы в системе почва-растение в условиях стационарного опыта // Агрохимия. – 1986. – № 1. – С. 24-30.

79. Протасова Н.А, Щербаков А.П. Микроэлементы в чернозёмах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. – Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2003, 367 с.

80. Протасова Н.А., Беляев А.Б. Химико-минералогическая характеристика черноземов Центрально-Черноземного региона // Черноземы центральной России: генезис, география, эволюция / Матер. Междунар. конф., посв. 100-летию со дня рождения П.Г. Адерихина. – Воронеж: ВГУ. – 2004. – С. 42–58.

81. Ринькис Г.Я. Методы ускоренного колометрического определения микроэлементов в биологических объектах. Рига: Изд-во АН ЛССР, 1963. – 160 с.

82. Рымарь В.Т. Прошлое, настоящее и будущее чернозема / В.Т. Рымарь, Г.П. Покудин. – Каменная Степь. – 1997. – 131 с.

83. Самойлова Е.М. Почвообразующие породы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983 – 395 с.

84. Сапрыкин Ф.Я. Геохимия почв и охрана природы / Ф.Я. Сапрыкин // Л.: Недра, 1984. – 231 с.

85. Система агроэкологического мониторинга земель сельскохозяйственного назначения / В.Г. Сычев и др. – М.: Россельхозакадемия, 2006. – 79 с.

86. Сорокина Н.П. Факторы дифференциации и агрогенной трансформации почвенного покрова распаханных склонов в Каменной Степи // Каменная Степь: проблемы изучения почвенного покрова / Науч. тр. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2007. – С. 97–120.

87. Тарасов В.М., Коваленко В.Ф. Усыхание побегов яблони. – М.: Россельхозиздат., 1973 – 70 с.

88. Троицкий Е.П. Основные проблемы учения о микроэлементах в системе почва-растение. – Вестник МГУ. – 1969. – № 5. – С. 48–56.

89. Фриден Я. Роль соединений меди в природе / Я. Фриден // Горизонты биохимии. – М.: МИР, 1964. – С. 27–54.

90. Чернавина И.А. Физиология и биохимия микроэлементов. – М.: Высшая школа, 1970. – 267 с.

91. Чубуков Л.А., Шварева Ю.Н. Климат, флуктуации и тренды климатических изменений на Русской равнине в XX веке // Вопросы преобразования природы Русской равнины. – Москва,1973.

92. Шеуджен А.Х. Алешин И.Е. Долев Д.Е. Роль бора в жизни растений и применение борных удобрений в рисосеянии. – Майкоп, 1995. – 273 с.

93. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. – Майкоп: ГУРИПП «Адыгея», 2003. – 1028 с.

94. Щеглов Д.И. Черноземы Центра Русской равнины и их эволюция под влиянием естественных и антропогенных факторов. – М.: Наука, 1999. – 214 с.

95. Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И. Распространение сезонно переувлажненных и затопленных почв в Каменной Степи // Каменная Степь: проблемы изучения почвенного покрова / Науч. тр. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2007. – С. 121-133.

96. Ягодин Б.А., Виноградова С.Б., Говорина В.В. Кадмий в системе почва – удобрения – растения – животные организмы и человек // Агрохимия. – 1989. – № 5. – С. 118–130.

97. Якушевская И. В. Микроэлементы в природных ландшафтах. Изд-во МГГУ, 1973.

98. Antosiewicz D.M. Adaptation of Plants to an Environment Polluted with Heavy Metals // Acta Soc.Bot.Pol. – 1992. – V. 61 – P. 281–299

99. Bhumbla D. R., Chhabra R., Chemistry of sodic soils, in Review of Soil Research in India, in: Trans.]. 1962. 183 p.

100. Cornillon P. Observation sur les possibilites de solubilisations du bure dans le sol // Sci. sol. 1967. – № 1. P. 62–71.

101. Eaton F.M., Wilcox L.V. The behavior of Boron in soils. U. St. Dept. Agr. Techn. Bull. 1939. Vol. 696. 57 p.

102. FAO soil bulletin. № 48. Rome, 1982. 444 p.

103. Forbes E.A., Posner A.M., Quirk J.P. Specific Adsorption of divalent Cd, Co, Cu, Rb and Zn on Goethite. // J. Soil. Sci. 1976. – V. 27. – P. 154–166.

104. Goldschmidt V.M, Peters G Zur geochemic des bors Nachr. Gesell. Wiss/ zu Gettingen. 1932. 273 p.

105. Hall J.L., Williams L.E. Transition metal transporters in plants // J. Exp. Bot. 2003. – V. 54, N 393. – P. 2601–2613.

106. Manceau A., Lanson B., Schlegel M.L., Harge J.C., Musso M., Ey-bertBerard L., Hazemann J.L., Chateigner D., Lamble G.M. Quantitative Zn speciation in smelter-contaminated soils by EXAFS spectroscopy // Am. J. Sci. 2000. V. 300. P. 289–343.

107. Manceau A., Marcus M.A., Tamura N. Quantative 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. 2002. V. 49. P. 341–428.

108. McKenney D. J., Vriesacker J. R. Effect of cadmium contamination on denitrification processes in Brookston clay and Fox sandy loam, Environ Pollut, Series A, 1985. 124 p.

109. Mengel K., Kirkby E.A. Principles of Plant Nutrition, International Potash Institute, Worblaufen-Bern, 1978. 593 p.

110. Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study by Mikko Sillanpaa / Food and agriculture organization of the United Nations. FAO soil bulletin. № 48. Rome, 1982. 444 p.

111. Mitchell R.L. Trace elements in soils // Chemistry of the soil. New York, 1964. P. 109–124.

112. Nriagu J. Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere // Nature. – 1979a. – V. 279. – P. 409–411.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П. 1 – Содержание общих форм микроэлементов в исследованных почвах

№ участка и разреза	Угодие	Почва	Горизонт	Глубина, см	B, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Mo, мг/кг	Cd, мг/кг	Pb, мг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1 Разрез 17	Пашня выше ЛП	ч. Обыкновенный	А пах	0-38	11,07	38,82	472,04	11,80	34,86	19,60	59,11	0,18	0,18	11,36
			АВ	38-61	17,77	39,55	342,92	10,60	35,78	16,18	55,33	0,20	0,19	10,89
			В	61-85	11,85	30,26	306,15	8,71	25,84	12,89	41,40	0,15	0,15	9,78
1 Разрез 68	Пашня микропонижение выше ЛП	ч. Обыкновенный	А пах	0,27	22,35	53,79	493,01	13,41	42,77	23,67	74,46	0,30	0,23	17,02
			A^1	27-47	15,54	50,20	530,41	14,34	43,79	25,17	75,19	0,31	0,23	15,81
			АВ	47-81	12,62	42,82	425,67	11,79	36,36	19,26	59,12	0,18	0,12	11,92
			В	81-107	17,91	64,84	449,38	13,35	42,81	18,86	68,63	0,17	0,09	14,98
			107-150	107-150	13,17	52,62	457,25	14,55	43,44	22,13	65,98	0,20	0,13	14,54
			150-200	150-200	13,75	44,07	375,28	12,07	37,25	17,99	69,08	0,17	0,15	14,15
			200-250	200-250	12,78	43,58	364,14	12,03	36,76	19,36	64,33	0,21	0,17	15,11
2 Разрез 16	Лесополоса	ч. Обыкновенный	А	(2)-55	14,25	44,14	449,81	12,32	37,94	22,25	66,88	0,20	0,19	12,65
			АВ	55-80(87)	10,96	41,96	498,22	13,21	39,71	19,53	62,02	0,16	0,18	11,82
			В	80(87)-121	13,40	39,92	369,91	11,28	35,75	16,72	58,10	0,20	0,16	10,24
2 Разрез 69	Лесо-полоса	ч. Обыкновенный	А	(0)5-44	17,64	51,14	418,35	12,09	39,42	20,77	65,32	0,27	0,17	13,48
			АВ	44-65	19,41	44,27	398,54	12,30	38,42	19,74	62,90	0,22	0,19	11,97
			B_1	65-91	19,60	42,17	339,80	10,45	35,06	16,04	52,68	0,23	0,18	12,44
			B_2	91-100	11,73	28,17	273,20	7,57	24,88	11,99	39,02	0,16	0,11	7,08
			100-150	100-150	12,47	30,14	290,45	8,78	25,67	15,02	41,04	0,18	0,16	9,05
			150-200	150-200	18,70	41,83	353,01	11,51	35,47	17,47	56,38	0,23	0,17	12,89
			200-250	200-250	22,14	39,97	385,91	11,09	34,97	16,66	55,06	0,31	0,15	12,78
3 Разрез 118	Пашня ниже ЛП	ч. Обыкновенный	А пах	0-59	11,82	42,94	469,25	13,58	39,77	23,07	67,20	0,20	0,19	14,45
			АВ	59-64	15,14	40,06	336,38	10,74	36,65	16,81	56,11	0,18	0,18	12,22
			В	64-83	14,80	44,32	375,54	12,36	39,75	19,51	62,79	0,20	0,20	11,81
3 Разрез 120	Пашня ниже ЛП	ч. Обыкновенный	А пах	0-33	9,24	44,92	492,13	13,57	39,03	21,51	65,09	0,20	0,17	15,66
			АВ	33-56	9,16	44,88	441,08	13,28	38,82	18,41	62,20	0,15	0,13	14,35
			В	56-64	8,47	41,23	392,59	11,57	35,84	15,96	53,05	0,14	0,14	12,80

Продолжение таблицы П. 1

№ участка и разреза	Угодие	Почва	Горизонт	Глубина, см	B, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Mo, мг/кг	Cd, мг/кг	Pb, мг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4 Разрез 71	Залежь микропо-вышение	ч. Обыкно-венный	Ad +A AB B_1 B_2 130-180 180-230 230-280	0-50 50-94 94-120 120-128 130-180 180-230 230-280	18,10 17,65 15,12 16,46 13,08 8,39 11,37	38,47 35,40 26,27 28,58 28,59 36,81 33,98	398,82 290,97 273,61 283,20 283,26 289,54 274,70	10,47 8,90 7,18 6,89 6,85 8,73 9,12	33,39 29,72 22,95 23,07 22,64 29,32 27,87	19,94 14,82 10,95 10,54 10,90 14,03 14,65	59,89 47,87 34,44 34,01 33,12 43,31 44,36	0,23 0,19 0,13 0,13 0,13 0,17 0,16	0,20 0,15 0,14 0,12 0,13 0,13 0,14	13,33 11,05 7,53 7,30 8,79 10,51 10,93
4 Разрез 73	Залежь микропо-нижение	Лугово-черноземная	A AB B 90-140 140-190 190-240	(0)2-39 39-70 70-90 90-140 140-190 190-240	16,11 13,72 14,43 7,55 12,99 10,67	46,87 44,59 49,43 43,47 41,00 35,74	518,10 404,71 327,71 371,76 354,08 371,65	11,84 12,09 12,19 12,59 11,85 11,18	41,95 38,98 36,47 37,32 36,88 31,71	25,41 19,69 16,64 17,37 16,53 16,18	71,20 63,66 60,35 55,69 52,75 48,24	0,28 0,23 0,18 0,13 0,17 0,18	0,23 0,14 0,06 0,09 0,17 0,16	13,17 13,53 14,64 14,23 14,56 12,87
5 Разрез 103	Косимая степь	ч. Обыкно-венный	103 Ad 103 A 103 AB $103B_1$ 103 B_2 103 B_3	0-6 (0)6-50 50-80 80-115 115-160 160-194	20,63 15,68 11,73 13,42 12,60 20,14	48,56 46,47 43,72 42,38 36,04 42,06	501,45 486,42 450,21 414,31 336,04 369,31	12,53 12,84 12,52 12,80 10,41 11,71	39,86 41,35 39,71 38,80 31,81 38,94	24,12 22,29 20,97 19,52 15,76 17,59	76,96 70,98 61,78 61,43 49,96 56,99	0,29 0,19 0,15 0,17 0,17 0,24	0,22 0,18 0,15 0,19 0,16 0,17	12,78 11,54 11,72 13,09 11,50 10,98
5 Разрез 104	Некоси-мая степь	ч. Обыкно-венный	104A 104AB 104B1 104B2	(0)3-55 55-82 82-112 112-165	17,24 11,69 20,60 16,53	48,21 38,15 45,09 38,54	497,90 362,69 373,41 320,12	12,97 11,26 11,10 9,85	40,23 36,12 39,17 33,03	23,17 17,90 17,74 16,05	70,60 56,08 57,81 51,14	0,21 0,17 0,24 0,21	0,19 0,16 0,19 0,15	13,29 12,51 11,54 10,30

Таблица П. 2 – Содержание подвижных форм микроэлементов в исследованных почвах

№ участка и разреза	Угодие	Почва	Горизонт	Глубина, см	B, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Mo, мг/кг	Cd, мг/кг	Pb, мг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Пашня	ч. Обыкновенный	17	А пах АВ В	0-38 38-61 61-85	0,270 0,375 1,301	0,694 0,044 0,084	165,989 7,746 9,395	2,671 0,070 0,118	4,902 0,089 0,157	0,324 0,178 0,211	1,798 0,324 0,215	0,075 0,007 0,008	1,324 0,028 0,040
1	Пашня микропонижение	ч. Обыкновенный	68	А пах A^1 АВ В 107-150 150-200 200-250	0-27 27-47 47-81 81-107 107-150 150-200 200-250	0,363 0,920 0,465 0,849 0,658 1,644 2,908	1,010 0,354 0,057 0,088 0,084 0,092 0,078	255,167 92,983 8,749 11,982 20,015 16,793 26,368	4,396 1,037 0,090 0,144 0,159 0,129 0,161	8,522 4,155 0,160 0,237 0,261 0,249 0,236	0,624 0,320 0,131 0,259 0,292 0,180 0,289	2,671 0,652 0,142 0,288 0,230 0,326 0,263	0,108 0,085 0,014 0,012 0,017 0,012 0,014	2,335 0,432 0,077 0,056 0,072 0,043 0,045
2	Лесополоса	ч. Обыкновенный	16	А АВ В	(2)-55 55-80(87) 80(87)-121	0,46 0,29 0,40	1,139 1,008 0,070	294,685 157,851 9,513	4,563 2,438 0,110	8,825 5,595 0,208	0,549 0,471 0,215	2,528 1,808 0,210	0,120 0,077 0,009	1,663 1,358 0,041
2	Лесополоса	ч. Обыкновенный	69	А АВ B_1 B_2 100-150 150-200 200-250	(0)5-44 44-65 65-91 91-100 100-150 150-200 200-250	0,34 0,24 0,14 0,12 0,44 0,09 0,11	0,936 0,777 1,029 1,508 0,411 0,057 0,051	261,454 217,074 171,551 136,534 92,610 13,118 19,324	4,635 3,400 3,368 2,441 0,882 0,081 0,145	8,008 6,310 7,379 4,532 4,241 0,154 0,274	0,609 0,431 0,547 0,955 0,550 0,117 0,234	3,357 2,435 2,362 2,705 0,793 0,207 0,306	0,128 0,102 0,066 0,023 0,046 0,007 0,014	2,289 1,450 1,846 1,330 0,401 0,035 0,214
3	Пашня	ч. Обыкновенный	118	А пах АВ В	0-59 59-64 64-83	0,337 0,478 0,637	0,812 0,068 0,088	212,141 8,166 7,212	3,457 0,108 0,107	6,844 0,332 0,205	0,351 0,202 0,277	2,219 0,422 0,378	0,104 0,019 0,013	1,721 0,150 0,062
3	Пашня	ч. Обыкновенный	120	А пах АВ В	0-33 33-56 56-64	0,182 0,123 0,327	0,715 0,7980 0,705	193,750 109,701 109,584	3,464 2,162 1,789	6,387 5,323 5,524	0,457 0,514 0,517	2,312 1,923 1,450	0,086 0,055 0,065	1,882 1,523 1,320

Продолжение таблицы П. 2

№ участка и разреза	Угодие	Почва	Горизонт	Глубина, см	B, мг/кг	Cr, мг/кг	Mn, мг/кг	Co, мг/кг	Ni, мг/кг	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Mo, мг/кг	Cd, мг/кг	Pb, мг/кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Залежь микро повышение	ч. Обыкновенный	71	Ad +A AB B_1 B_2 130-180 180-230 230-280	0-50 50-94 94-120 120-128 130-180 180-230 230-280	0,666 0,773 1,310 1,552 0,431 0,107 0,561	0,698 0,070 0,024 0,050 0,076 0,082 0,091	229,953 7,911 3,127 5,841 13,268 15,268 21,246	3,342 0,103 0,069 0,081 0,105 0,070 0,176	5,410 0,248 0,084 0,092 0,145 0,240 0,291	0,293 0,739 0,106 0,125 0,108 0,147 0,237	2,059 0,608 0,148 0,127 0,139 0,161 0,307	0,107 0,009 0,006 0,010 0,013 0,014 0,014	1,952 0,045 0,017 0,045 0,053 0,016 0,050
4	Залежь микро понижение	Лугово-черноземная	73	A AB B 90-140 140-190 190-240	(0)2-39 39-70 70-140 90-140 140-190 190-240	0,179 0,085 0,078 0,143 0,133 0,155	0,863 1,046 1,524 1,689 0,067 0,069	217,747 93,876 84,608 122,243 13,057 14,048	3,212 2,488 2,613 2,727 0,107 0,119	9,002 8,276 4,658 6,702 0,165 0,173	0,807 0,680 1,479 1,654 0,149 0,218	3,356 2,309 3,284 3,444 0,162 0,224	0,138 0,051 0,015 0,039 0,012 0,012	1,821 0,995 1,784 1,994 0,027 0,025
5	Косимая степь	ч. Обыкновенный	103	103Ad 103A 103AB $103B_1$ $103\ B_2$ $103\ B_3$	0-6 (0)6-50 50-80 80-115 115-160 160-194	0,658 0,396 0,304 0,562 0,483 0,407	0,589 0,881 1,140 0,084 0,060 0,083	232,066 195,304 141,942 13,779 6,577 6,791	3,361 3,043 2,305 0,133 0,108 0,104	5,101 6,000 6,238 0,514 0,142 0,163	0,357 0,327 0,431 0,274 0,159 0,148	2,730 1,791 1,814 0,386 0,147 0,264	0,115 0,092 0,078 0,017 0,010 0,010	1,679 1,316 1,332 0,113 0,061 0,012
5	Некосимая степь	ч. Обыкновенный	104	104A 104AB $104B_1$ $104B_2$	(0)3-55 55-82 82-112 112-165	0,315 0,479 0,783 0,519	0,585 0,171 0,071 0,065	186,758 68,141 10,367 8,856	2,895 0,595 0,123 0,113	5,640 3,132 0,210 0,167	0,260 0,251 0,372 0,224	1,365 0,600 0,425 0,257	0,095 0,074 0,010 0,012	1,246 0,694 0,081 0,165

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы имени В. В. Докучаева» (ФГБНУ «НИИСХ ЦЧП»)

ЗБОРИЩУК Ю.Н., ТУРУСОВ В.И.

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПОЧВАХ КАМЕННОЙ СТЕПИ

Монография

Издательство «ИСТОКИ».
394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, 33.
Телефон/факс (473) 239-55-56.

Подписано в печать 01.08.2019 г. Формат 60x84 1/16.
Гарнитура «Times New Roman». Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,5.
Тираж 500 экз. Заказ № 6070.

Отпечатано в типографии «ИСТОКИ».
394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, 33.
Телефон/факс (473) 239-55-54
E-mail: istoki-vrn@mail.ru