

ФОРМЫ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ В ПОЧВАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ ПРИ ПОЛИЭЛЕМЕНТНОМ И МЕДНОМ ВИДАХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

М.С.Панин, Н.В.Калентьева

Изучены формы соединений меди при полиэлементном и медном видах загрязнения светло- и темно-каштановой почве. Выявлено, что при полиэлементном загрязнении почве подвижность элемента значительно больше, чем при моноэлементном. Показана различная способность исследованных почв в фиксации меди. Выявлено, что основными механизмами фиксации меди в загрязненных почвах является ионообменное поглощение и специфическая сорбция.

Как известно, из множества всех известных на сегодняшний день экотоксикантов тяжелые металлы (ТМ) обладают одними из самых высоких показателей техногенности и токсичности. Оценка устойчивости почв к загрязнению и возможности миграции ТМ в другие компоненты биосферы возможны только на основе адекватной информации о подвижных соединениях ТМ. Распределение металлов между пулами прочносвязанных и подвижных соединений контролируется комплексом процессов трансформации: гидролиз, ионный обмен, образование и растворение осадков малорастворимых солей, комплексобразование с органическими и неорганическими лигандами, сорбция-десорбция, окисление-восстановление и др. [1]. Вполне очевидно, что чем сильнее прочность связи тяжелого металла с компонентами твердой фазы почвы, тем в меньшей мере будет проявляться его негативное воздействие на растения, почвенную биоту и составляющие сопредельных сред. Таким образом, идентификация механизмов иммобилизации ТМ имеет важное значение для прогноза их поведения в почвах. При этом, как правило, не принимается во внимание эффект совместного действия различных металлов, хотя последствия загрязнения почв определяются не только концентрацией металлов, но и их сочетанием и соотношением [2, 3].

Целью настоящего исследования явилось выявление закономерностей распределения форм соединений меди в светло- и темно-каштановой почвах при разных уровнях полиэлементного и медного загрязнения.

Материал и методы исследования

В качестве объектов исследования были использованы образцы пахотных горизонтов светло- и темно-каштановой нормальных почв. Выбор данных типов почв обусловлен их значимостью в сельском хозяйстве Семи-

палатинского Прииртышья. Почвы отбирали на участках, не подверженных техногенному воздействию. Были определены следующие физико-химические показатели данной почвы: содержание гумуса – по методу Тюрина со спектрофотометрическим окончанием, рН водной суспензии – потенциометрически со стеклянным электродом, содержание обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} , гранулометрический состав почвы – по Качинскому [4], а также оценена буферная устойчивость почв к загрязнению ТМ по Ильину [5]. Определение валового содержания осуществлялось по методике Ринькиса путем разложения почв минеральными кислотами [6].

Исследовались незагрязненные пробы почвы, а также пробы почвы, загрязненные в лабораторных условиях. Для моделирования полиэлементного и медного загрязнений нитраты Cu, Zn, Cd, Pb в виде водных растворов вносили в почву в следующих количествах (табл. 1).

Таблица 1

Количество внесенных в почву ТМ

Вариант	Моль/кг
Фон	0
1	0,001
2	0,005
3	0,010

Загрязненные почвы выдерживали в течение трех месяцев при полной полевой влажности с периодическим высушиванием. По окончании взаимодействия с ТМ почву сушили до воздушно-сухого состояния, измельчали до размера частиц менее 1 мм и осуществляли выделение форм Cu (табл. 2). В основу методики извлечения форм соединений металла была положена схема McLaren and Crawford [7] с некоторыми изменениями и дополнениями.

Таблица 2

Формы соединений Си и условия их извлечения из почв

Название формы соединений	Условное обозначение	Экстрагент
Водорастворимая	Cu _{водн}	H ₂ O
Обменная	Cu _{обм}	0,1M Ca(NO ₃) ₂
Слабо специфически сорбированная	Cu _{сп сорб}	3% CH ₃ COOH
Подвижная	Cu _{подв}	1н CH ₃ COONH ₄ (pH 4,8)
Связанная с органическим веществом	Cu _{орг}	0,1M K ₄ P ₂ O ₇ + 0,1M NaOH
Связанная с оксидами/гидроксидами железа	Cu _{окс/гидрокс Fe}	0,14M (NH ₄) ₂ (C ₂ O) ₄ + 0,2M C ₂ H ₂ O ₄
Кислоторастворимая	Cu _{кисл}	1 н HCl
Остаточная	Cu _{ост}	5 н HNO ₃

Определение форм соединений Си осуществлялось из отдельных навесок почвы (массой 10 г). Соотношение почва: экстрагент составляло 1:10. Экстрагирование осуществлялось в течение 1 ч в условиях непрерывного перемешивания, после чего пробы отфильтровывались, и в надосадочной жидкости определялось содержание элемента дитизионовым методом со спектрофотометрическим окончанием [8]. Эксперимент осуществлялся в трехкратной повторности.

Результаты исследования и их обсуждение

Светло-каштановая почва

По физико-химическим свойствам светло-каштановая почва является нейтральной (pH 7,1), характеризуется низким содержанием гумуса (1,9%), физическая глина состав-

ляет 11,3%, илистая фракция – 10,3%, ЕКО – 11,4 мг-экв/100 г. Степень буферности почвы к загрязнению ТМ по указанным физико-химическим показателям является средней.

В исходной светло-каштановой почве общее содержание меди составило 18,2 мг/кг (табл. 3), что приблизительно соответствует кларку элемента в почве (20 мг/кг [9]), в 2,6 раза меньше кларка в литосфере (47 мг/кг [9]) и в 5,6 раза меньше ПДК (100 мг/кг).

В светло-каштановой почве валовое содержание элемента в вариантах полиэлементного и медного загрязнения относительно исходной почвы увеличивалось соответственно в 4,5, 18,5 и 35,9 раза (табл. 3). Показатели абсолютного содержания меди в загрязненных образцах светло-каштановой почвы соответствовали 0,8, 3,4 и 6,5 ПДК.

Таблица 3

Формы соединений Си в светло-каштановой почве

Вариант	Формы соединений								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Валовая
Фон	<u>0,08</u> 0,44	<u>0,22</u> 1,21	<u>0,69</u> 3,79	<u>0,50</u> 2,75	<u>2,50</u> 13,74	<u>3,00</u> 16,48	<u>3,38</u> 18,57	<u>5,65</u> 31,04	18,20
Полиэлементное загрязнение									
1	<u>0,81</u> 0,99	<u>1,12</u> 1,37	<u>17,50</u> 21,41	<u>20,22</u> 24,73	<u>29,31</u> 35,85	<u>40,22</u> 49,20	<u>56,88</u> 69,58	<u>68,75</u> 84,10	81,75
2	<u>2,00</u> 0,60	<u>11,50</u> 3,42	<u>95,12</u> 28,31	<u>107,26</u> 31,93	<u>179,52</u> 53,44	<u>195,88</u> 58,31	<u>280,00</u> 83,35	<u>291,21</u> 86,68	335,95
3	<u>36,63</u> 5,60	<u>101,25</u> 15,49	<u>290,11</u> 44,38	<u>329,14</u> 50,35	<u>345,00</u> 52,78	<u>361,12</u> 55,24	<u>520,33</u> 79,60	<u>546,11</u> 83,54	653,70
Медное загрязнение									
1	<u>0,40</u> 0,49	<u>0,91</u> 1,11	<u>10,00</u> 12,23	<u>12,65</u> 15,47	<u>26,34</u> 32,22	<u>52,18</u> 63,83	<u>60,56</u> 74,08	<u>69,23</u> 84,69	81,75
2	<u>1,13</u> 0,34	<u>3,14</u> 0,93	<u>95,63</u> 28,47	<u>102,18</u> 30,42	<u>161,11</u> 47,96	<u>218,56</u> 65,06	<u>290,18</u> 86,38	<u>310,50</u> 92,42	335,95
3	<u>3,31</u> 0,51	<u>30,50</u> 4,67	<u>230,76</u> 35,30	<u>256,12</u> 39,18	<u>322,46</u> 49,33	<u>395,36</u> 60,48	<u>560,24</u> 85,70	<u>579,22</u> 88,61	653,70

Примечание. В числителе – Си, мг/кг, в знаменателе – Си, % от валового содержания. То же в табл. 6

ФОРМЫ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ В ПОЧВАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ ПРИ ПОЛИЭЛЕМЕНТНОМ И МЕДНОМ ВИДАХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Полиэлементное загрязнение. В светло-каштановой почве при данном виде загрязнения отмечалось значительное возрастание содержания всех форм меди. При минимальном загрязнении почвы (0,001 моль/кг) относительное содержание элемента возрастало от 1,0 до 84,1%, среднем (0,005 моль/кг) – от 0,7 до 86,7%, максимальном (0,010 моль/кг) – от 5,6 до 83,5% (табл. 3).

Для характеристики особенностей аккумуляции меди в исследуемых почвах при разных видах и степенях загрязнения были использованы формулы: $\frac{C_{Cu(вар.1),\%}}{C_{Cu(фон),\%}}$, $\frac{C_{Cu(вар.2),\%}}{C_{Cu(вар.1),\%}}$, $\frac{C_{Cu(вар.3),\%}}{C_{Cu(вар.2),\%}}$, $\frac{C_{Cu(вар.3),\%}}{C_{Cu(фон),\%}}$. С их помощью удалось выявить преобладающий характер накопления элемента в тех или

иных формах соединений, а, следовательно, и судить о возможных механизмах его иммобилизации.

При минимальной степени загрязнения накопление Cu осуществлялось в большей степени за счет $Cu_{подв}$ и $Cu_{сп сорб}$ (табл. 4). В средне загрязненной почве относительно минимального уровня загрязнения наибольшее увеличение относительного содержания меди отмечено в $Cu_{обм}$. В наиболее загрязненной почве относительно почвы средне загрязненной элемент в максимальной степени накапливался в $Cu_{водн}$ и $Cu_{обм}$, то есть стал значительно подвижнее в связи с тем, что светло-каштановая почва не в состоянии достаточно прочно его фиксировать. Так, в данном варианте загрязнения в $Cu_{подв}$ заключалось более половины всего элемента (табл. 3).

Таблица 4

Изменение содержания форм соединений Cu в светло-каштановой почве (в раз) в вариантах полиэлементного загрязнения

Накопление Cu в формах	Формы соединений							
	$Cu_{водн}$	$Cu_{обм}$	$Cu_{сп сорб}$	$Cu_{подв}$	$Cu_{орг}$	$Cu_{окс/гидрокс Fe}$	$Cu_{кисл}$	$Cu_{ост}$
$C_{Cu(вар.1),\%}$	2,3	1,1	5,6	9,0	2,6	3,0	3,7	2,7
$C_{Cu(фон),\%}$	$Cu_{подв} > Cu_{сп сорб} > Cu_{кисл} > Cu_{окс/гидрокс Fe} > Cu_{ост} > Cu_{орг} > Cu_{водн} > Cu_{обм}$							
$C_{Cu(вар.2),\%}$	0,6	2,5	1,3	1,3	1,5	1,2	1,2	1,0
$C_{Cu(вар.1),\%}$	$Cu_{обм} > Cu_{орг} > Cu_{сп сорб} = Cu_{подв} > Cu_{окс/гидрокс Fe} = Cu_{кисл} > Cu_{ост} > Cu_{водн}$							
$C_{Cu(вар.3),\%}$	6,5	4,5	1,6	1,6	1,0	0,9	1,0	1,0
$C_{Cu(вар.2),\%}$	$Cu_{водн} > Cu_{обм} > Cu_{сп сорб} > Cu_{подв} > Cu_{орг} = Cu_{кисл} = Cu_{ост} > Cu_{окс/гидрокс Fe}$							
$C_{Cu(вар.3),\%}$	8,8	12,8	11,7	18,3	3,8	3,4	4,3	2,7
$C_{Cu(фон),\%}$	$Cu_{подв} > Cu_{обм} > Cu_{сп сорб} > Cu_{водн} > Cu_{кисл} > Cu_{орг} > Cu_{окс/гидрокс Fe} > Cu_{ост}$							

При сравнении максимально загрязненной почвы с исходной видим, что медь значительно больше всего накапливалась в достаточно лабильных формах: $Cu_{подв}$, $Cu_{обм}$ и $Cu_{сп сорб}$.

Итак, при полиэлементном загрязнении светло-каштановой почвы Cu фиксируется в ней в основном благодаря процессам неспецифической и специфической сорбции.

Медное загрязнение. Процентное содержание меди увеличивалось от $Cu_{водн}$ к $Cu_{ост}$: в минимально загрязненной почве – от 0,5 до 84,7%, средне загрязненной – от 0,3 до 92,4%, наиболее загрязненной – от 0,5 до 88,6% (табл. 3).

В первом варианте эксперимента наибольшее накопление элемента относительно фона отмечено в $Cu_{подв}$, в средне загрязненной почве относительно минимального уровня загрязнения – в $Cu_{сп сорб}$ и $Cu_{подв}$, в третьем варианте относительно второго – в $Cu_{обм}$, в

максимально загрязненной почве относительно контроля – $Cu_{подв}$ и $Cu_{сп сорб}$ (табл. 5).

Таким образом, при медном загрязнении светло-каштановой почвы медь связывается ею в большей степени, как и в случае полиэлементного загрязнения, по типу неспецифической и специфической сорбции.

При сравнении моноэлементного и полиэлементного вида загрязнений видим, что в случае внесения в почву меди накопление элемента в $Cu_{водн}$, $Cu_{обм}$, $Cu_{сп сорб}$, $Cu_{подв}$, $Cu_{орг}$ осуществлялось в гораздо меньшей степени, чем при полиэлементном загрязнении, а в наиболее прочно связанных формах – $Cu_{окс/гидрокс Fe}$, $Cu_{кисл}$, $Cu_{ост}$ – наоборот, в большей степени (табл. 4, 5). Так, в частности, в максимально загрязненной почве при внесении меди относительная концентрация элемента в формах $Cu_{водн}$, $Cu_{обм}$, $Cu_{сп сорб}$, $Cu_{подв}$, $Cu_{орг}$ оказалась ниже, чем при полиэлементном загрязнении от 3,8 до 18,3 раза, а в фор-

max $Cu_{окс/ гидрокс Fe}$, $Cu_{кисл}$, $Cu_{ост}$, наоборот, в 1,1 раза выше, чем в аналогичных образцах загрязнённой медью почвы (табл. 3) В связи с вышесказанным, вполне очевидно, что при

моноэлементном загрязнении медь связывается почвой гораздо прочнее, чем при комплексном.

Таблица 5

Изменение содержания форм соединений Cu в светло-каштановой почве (в раз) в вариантах медного загрязнения

Накопление Cu в формах	Формы соединений							
	$Cu_{водн}$	$Cu_{обм}$	$Cu_{сп сорб}$	$Cu_{подв}$	$Cu_{орг}$	$Cu_{окс/ гидрокс Fe}$	$Cu_{кисл}$	$Cu_{ост}$
$C_{Cu} (вар.1), \%$	1,1	0,9	3,2	5,6	2,4	3,9	4,0	2,7
$C_{Cu} (фон), \%$	$Cu_{подв} > Cu_{кисл} > Cu_{окс/ гидрокс Fe} > Cu_{сп сорб} > Cu_{ост} > Cu_{орг} > Cu_{водн} > Cu_{обм}$							
$C_{Cu} (вар.2), \%$	0,7	0,8	2,3	2,0	1,4	1,0	1,2	1,1
$C_{Cu} (вар.1), \%$	$Cu_{сп сорб} > Cu_{подв} > Cu_{орг} > Cu_{кисл} > Cu_{ост} > Cu_{окс/ гидрокс Fe} > Cu_{обм} > Cu_{водн}$							
$C_{Cu} (вар.3), \%$	1,5	5,0	1,2	1,3	1,0	0,9	1,0	1,0
$C_{Cu} (вар.2), \%$	$Cu_{обм} > Cu_{водн} > Cu_{подв} > Cu_{сп сорб} > Cu_{орг} = Cu_{кисл} = Cu_{ост} > Cu_{окс/ гидрокс Fe}$							
$C_{Cu} (вар.3), \%$	1,2	3,9	9,3	14,3	3,6	3,7	4,6	2,9
$C_{Cu} (фон), \%$	$Cu_{подв} > Cu_{сп сорб} > Cu_{кисл} > Cu_{обм} > Cu_{окс/ гидрокс Fe} > Cu_{орг} > Cu_{ост} > Cu_{водн}$							

Темно-каштановая почва

По физико-химическим свойствам темно-каштановая почва является нейтральной (pH 7,0), характеризуется низким содержанием гумуса (2,5%), физическая глина составляет 26,1%, илистая фракция – 15,3%, ЕКО – 17,8 мг-экв/100 г. Степень буферности почвы к

загрязнению ТМ по данным физико-химическим показателям является средней.

В исходной темно-каштановой почве валовое содержание меди составляет 26,80 мг/кг (табл. 6), что в 1,3 раза больше кларка элемента в почве, в 1,8 раза меньше кларка в литосфере и в 3,7 раза меньше ПДК.

Таблица 6

Формы соединений Cu в темно-каштановой почве

Вариант	Формы соединений								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Валовая
Фон	0,10	0,25	0,85	0,47	3,38	4,49	5,45	6,73	26,80
	0,37	0,93	3,17	1,75	12,61	16,75	20,34	25,11	
Полиэлементное загрязнение									
1	0,16	0,38	2,63	6,25	35,47	45,33	58,75	64,18	90,35
	0,18	0,42	2,91	6,92	39,26	50,17	65,02	71,03	
2	0,80	2,63	46,65	90,88	214,13	236,38	263,75	282,20	344,55
	0,23	0,76	13,54	26,38	62,15	68,61	76,55	81,90	
3	7,88	24,38	216,25	256,25	375,11	392,31	516,25	536,00	662,30
	1,19	3,68	32,65	38,69	56,64	59,23	77,95	80,93	
Медное загрязнение									
1	0,12	0,27	2,06	5,56	30,22	52,18	60,05	70,18	90,35
	0,13	0,30	2,28	6,15	33,45	57,75	66,46	77,68	
2	0,27	1,22	30,75	75,66	192,36	249,11	315,21	320,25	344,55
	0,08	0,35	8,92	21,96	55,83	72,30	91,48	92,95	
3	0,90	4,25	111,88	216,25	361,33	449,56	550,16	560,11	662,30
	0,14	0,64	16,89	32,65	54,56	67,88	83,07	84,57	

В темно-каштановой почве валовое содержание элемента в вариантах полиэлементного и медного загрязнения относительно фоновой почвы увеличивалось соответ-

ственно в 3,4, 12,9 и 24,7 раза (табл. 6). Показатели абсолютного содержания меди в загрязненных образцах данной почвы соответствовали 0,9, 3,4 и 6,6 ПДК.

ФОРМЫ СОЕДИНЕНИЙ МЕДИ В ПОЧВАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ ПРИ ПОЛИЭЛЕМЕНТНОМ И МЕДНОМ ВИДАХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Полиэлементное загрязнение. Относительное содержание элемента в вариантах опыта увеличивалось от $Cu_{водн}$ к $Cu_{ост}$ следующим образом: минимальный уровень загрязнения – от 0,2 до 71,0%, средний – от 0,2 до 81,9%, максимальный – от 1,2 до 80,9% (табл. 6).

Как видно из таблицы 7, в минимально загрязненной почве относительно исходного варианта накопление элемента в наибольшей

степени произошло в $Cu_{подв}$ и в несколько меньшей степени – в $Cu_{кисл}$, $Cu_{орг}$, $Cu_{окс/гидрокс Fe}$, $Cu_{ост}$; в средне загрязненной почве относительно минимального уровня загрязнения – в $Cu_{сп сорб}$ и $Cu_{подв}$; в максимально загрязненной почве относительно почвы средней степени загрязнения – в самых подвижных формах: $Cu_{водн}$ и $Cu_{обм}$; в наиболее загрязненной почве сравнительно с фоновой – в $Cu_{подв}$ и $Cu_{сп сорб}$.

Таблица 7

Изменение содержания форм соединений Cu в темно-каштановой почве (в раз) в вариантах полиэлементного загрязнения

Накопление Cu в формах	Формы соединений							
	$Cu_{водн}$	$Cu_{обм}$	$Cu_{сп сорб}$	$Cu_{подв}$	$Cu_{орг}$	$Cu_{окс/гидрокс Fe}$	$Cu_{кисл}$	$Cu_{ост}$
$C_{Cu} (вар.1), \%$	0,5	0,5	0,9	3,9	3,1	3,0	3,2	2,8
$C_{Cu} (фон), \%$	$Cu_{подв} > Cu_{кисл} > Cu_{орг} > Cu_{окс/гидрокс Fe} > Cu_{ост} > Cu_{сп сорб} > Cu_{водн} = Cu_{обм}$							
$C_{Cu} (вар.2), \%$	1,3	1,8	4,7	3,8	1,6	1,4	1,2	1,2
$C_{Cu} (вар.1), \%$	$Cu_{сп сорб} > Cu_{подв} > Cu_{обм} > Cu_{орг} > Cu_{окс/гидрокс Fe} > Cu_{водн} > Cu_{кисл} = Cu_{ост}$							
$C_{Cu} (вар.3), \%$	5,1	4,8	2,4	1,5	0,9	0,9	1,0	1,0
$C_{Cu} (вар.2), \%$	$Cu_{водн} > Cu_{обм} > Cu_{сп сорб} > Cu_{подв} > Cu_{кисл} = Cu_{ост} > Cu_{орг} = Cu_{окс/гидрокс Fe}$							
$C_{Cu} (вар.3), \%$	3,2	3,9	10,3	22,1	4,5	3,5	3,8	3,2
$C_{Cu} (фон), \%$	$Cu_{подв} > Cu_{сп сорб} > Cu_{орг} > Cu_{обм} > Cu_{кисл} > Cu_{окс/гидрокс Fe} > Cu_{водн} = Cu_{ост}$							

Таким образом, в слабо загрязненной почве наблюдалось довольно равномерное накопление меди в наиболее прочно связанных с почвой формах соединений, а по мере увеличения степени загрязнения, наоборот, отмечалось возрастание содержания элемента в самых подвижных формах.

При сравнении с аналогичным видом загрязнения светло-каштановой почвы (табл. 4, 7) видно, что темно-каштановая почва сорбирует медь гораздо прочнее. Это обусловлено большей буферной емкостью темно-каштановой почвы по отношению к ТМ, что, в свою очередь, обеспечено более значимыми показателями содержания гумуса, ила, физической глины и ЕКО, чем в светло-каштановой почве.

По содержанию гумуса, ила, физической глины и ЕКО темно-каштановая почва превосходит светло-каштановую, что и обеспечивает ей большую буферную емкость по отношению к ТМ.

Медное загрязнение. Относительное содержание меди увеличивалось от $Cu_{водн}$ к $Cu_{ост}$ следующим образом: в минимально загрязненной почве – от 0,1 до 77,7%, средне загрязненной – от 0,1 до 93,0%, наиболее загрязненной – от 0,1 до 84,6% (табл. 6).

В ходе загрязнения элемент в наибольшей степени накапливался в следующих

формах (табл. 8): в первом варианте опыта относительно контроля – в $Cu_{подв}$, $Cu_{окс/гидрокс Fe}$, $Cu_{кисл}$, $Cu_{ост}$, $Cu_{орг}$; в почве средней степени загрязнения относительно минимально загрязненного варианта – в $Cu_{сп сорб}$ и $Cu_{подв}$; в наиболее загрязненной почве относительно средне загрязненной – в $Cu_{сп сорб}$, $Cu_{обм}$, $Cu_{водн}$, $Cu_{подв}$; в максимально загрязненной почве относительно исходной – в $Cu_{подв}$.

Итак, при медном загрязнении темно-каштановой почвы медь при малой интенсивности загрязнения фиксируется в почве достаточно прочно. Немаловажную роль в закреплении почвой меди в данном случае здесь следует отвести аморфным оксидам и гидроксидам Fe, почвенным минералам и органическому веществу. При увеличении нагрузки на почву, как и, следовало, ожидать, происходит некоторое снижение прочности связи поглощенной меди с почвой, увеличивается роль ионного обмена и специфической сорбции.

Как и в светло-каштановой почве, при комплексном загрязнении темно-каштановой почвы по сравнению с медным концентрация меди в формах $Cu_{водн}$, $Cu_{обм}$, $Cu_{сп сорб}$, $Cu_{подв}$, $Cu_{орг}$ возрастала с меньшей интенсивностью, а в формах $Cu_{окс/гидрокс Fe}$, $Cu_{кисл}$, $Cu_{ост}$ – с большей (табл. 6-8).

Таблица 8

Изменение содержания форм соединений Cu в темно-каштановой почве (в раз) в вариантах медного загрязнения

Накопление Cu в формах	Формы соединений							
	Cu _{водн}	Cu _{обм}	Cu _{сп сорб}	Cu _{подв}	Cu _{орг}	Cu _{окс/ гид- рокс Fe}	Cu _{кисл}	Cu _{ост}
C _{Cu} (вар.1),%	0,4	0,3	0,7	3,5	2,7	3,4	3,3	3,1
C _{Cu} (фон),%	Cu _{подв} > Cu _{окс/гидрокс Fe} > Cu _{кисл} > Cu _{ост} > Cu _{орг} > Cu _{сп сорб} > Cu _{водн} > Cu _{обм}							
C _{Cu} (вар.2),%	0,6	1,2	3,9	3,6	1,7	1,3	1,4	1,2
C _{Cu} (вар.1),%	Cu _{сп сорб} > Cu _{подв} > Cu _{орг} > Cu _{кисл} > Cu _{окс/гидрокс Fe} > Cu _{обм} = Cu _{ост} > Cu _{водн}							
C _{Cu} (вар.3),%	1,7	1,8	1,9	1,5	1,0	0,9	0,9	0,9
C _{Cu} (вар.2),%	Cu _{сп сорб} > Cu _{обм} > Cu _{водн} > Cu _{подв} > Cu _{орг} = Cu _{окс/гидрокс F} = Cu _{кисл} = Cu _{ост}							
C _{Cu} (вар.3),%	0,4	0,7	5,3	18,6	4,3	4,1	4,1	3,4
C _{Cu} (фон),%	Cu _{подв} > Cu _{сп сорб} > Cu _{орг} > Cu _{окс/гидрокс Fe} = Cu _{кисл} > Cu _{ост} > Cu _{обм} > Cu _{водн}							

При сравнении с медным видом загрязнения светло-каштановой почвы видно, что темно-каштановой почвой медь поглощается гораздо прочнее. В частности, в темно-каштановой почве не отмечается такого интенсивного накопления элемента в самых лабильных формах – Cu_{обм} и Cu_{водн}. И из этого следует, что темно-каштановая почва более устойчива к медному загрязнению, нежели светло-каштановая.

Выводы

1. В незагрязненных почвах Cu находится преимущественно в прочносвязанном состоянии.

2. При искусственном загрязнении почв исходное соотношение форм соединений Cu меняется. Увеличение общего содержания металлов в почвах сопровождается уменьшением прочности связи Cu с почвенными компонентами.

3. При полиэлементном загрязнении в светло- и темно-каштановой почвах Cu фиксировался почвой хуже, чем при медном. Данное обстоятельство свидетельствует о наличии конкурентного влияния со стороны более реакционноспособных элементов.

4. На трансформацию соединений Cu в загрязненных почвах значительное влияние оказывают процессы ионного обмена и специфической сорбции.

5. Темно-каштановая почва ввиду большей буферной емкости более прочно иммобилизует медь при всех видах загрязнения, чем светло-каштановая.

ЛИТЕРАТУРА

1.Формы миграции тяжелых металлов в объектах окружающей среды и методология их изучения / Г.М. Варшал, Т.К. Велюханова, И.Я. Кошеева и др. // Геохимическая экология и биогеохимическое районирование биосферы: Материалы второй Российской школы. – М.: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 1999. – С. 39-41.

2.Ладонин Д.В. Конкурентные взаимоотношения ионов при загрязнении почвы тяжелыми металлами // Почвоведение. 2000. № 10. – С. 1285-1293.

3.Минкина Т.И. Соединения тяжелых металлов в почвах Нижнего Дона, их трансформация под влиянием природных и антропогенных факторов: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Рн/Д, 2008. – 49 с.

4.Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. – 656 с.

5.Ильин В.Б. Оценка буферности почв по отношению к тяжелым металлам // Агрохимия. 1995. №10. – С. 109-113.

6.Ринькис Г.Я. Методы ускоренного колориметрического определения микроэлементов биологических объектов. Рига: Зинатне, 1987. – 175 с.

7.McLaren R.G., Crawford D.W. Studies on soil copper. I. The fractionation of copper in soils // Soil Sci. 1973. V. 4. – P.172.

8.Ринькис Г.Я. Оптимизация минерального питания растений. Рига: Зинатне, 1972. 355 с.

9.Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. –237 с.