

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НИКЕЛЯ, МЕДИ И КАДМИЯ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ И ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА ЛУЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

А. А. Акатова, М. А. Ефремова, Т. В. Родичева

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО СПбГАУ)
196601, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2, лит. А
E-mail: akatova1993@bk.ru*

Поступила в редакцию 15 апреля 2021 г., принята к печати 24 мая 2021 г.

В результате почвенно-экологического мониторинга, проведенного на северо-востоке Лужской возвышенности, установлено доминирование в почвенном покрове территории дерново-подзолистых и подзолистых почв, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах. Валовое содержание Ni, Cu и Cd в гумусовом горизонте почв естественных экосистем составило соответственно $1,22 \pm 0,69$, $2,53 \pm 0,54$ и $0,12 \pm 0,06$ мг кг⁻¹ почвы. В гумусовом горизонте постагрогенных почв не отмечено достоверного увеличения содержания тяжелых металлов по сравнению с почвами природных ландшафтов. При этом можно констатировать загрязнение постагрогенных почв медью в связи с увеличением в них валового содержания и коэффициента концентрации данного металла в среднем в 3 раза по сравнению с почвами естественных экосистем. Выявлена высокая пространственная неоднородность валового содержания тяжелых металлов в гумусовом горизонте почв. Коэффициенты вариации валового содержания Ni, Cu и Cd в гумусовом горизонте почв естественных экосистем составили 57, 29 и 47 % соответственно. В постагрогенных почвах коэффициенты вариации содержания Cu и Cd были в 2,2 и 1,6 раза выше, а Ni – в 1,8 раза ниже, чем в естественных подзолистых и дерново-подзолистых почвах. В большинстве обследованных почв легкого гранулометрического состава среднее содержание Ni и Cu возрастало вниз по профилю, распределение Cd по почвенному профилю было более равномерным. В почвах естественных экосистем коэффициенты вариации валового содержания тяжелых металлов в гумусовом горизонте были меньше, чем в нижележащих горизонтах. В постагрогенных почвах содержание металлов в гумусовом горизонте характеризовалось большей пространственной неоднородностью по сравнению с нижележащими почвенными горизонтами.

Ключевые слова: почва, никель, медь, кадмий, коэффициент вариации, коэффициент концентрации.

DISTRIBUTION OF NICKEL, COPPER AND CADMIUM IN SOD-PODZOLIC AND PODZOLIC SOILS OF THE NORTH-EAST OF THE LUGA UPLAND

A. A. Akatova, M. A. Efremova, T. V. Rodicheva

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Agrarian University» (FSBEI HE SPb SAU)
2A, Peterburgskoye highway, Pushkin, Saint-Petersburg, 196601
E-mail: akatova1993@bk.ru*

As a result of soil-ecological monitoring carried out in the north-east of the Luga Upland, the dominance of sod-podzolic and podzolic soils, formed on fluvioglacial sands and binomial rocks, in the soil cover of the territory was established. The total content of Ni, Cu and Cd in the humus horizon of soils of the natural ecosystems was 1.22 ± 0.69 , 2.53 ± 0.54 and 0.12 ± 0.06 mg kg⁻¹ of soil, respectively. There was no significant increase in the content of the heavy metals in the humus horizon of postagrogenic soils in comparison with the soils of natural landscapes. At the same time, it is possible to state contamination of postagrogenic soils with copper based on an increase in the total content and coefficient of its concentration by an average of 3 times compared with the soils of the natural ecosystems. A high spatial heterogeneity of the total content of heavy metals in the humus horizon of soils was revealed. The coefficients of variation of the total content of Ni, Cu, and Cd in the humus horizon of soils of natural ecosystems were 57, 29, and 47%, respectively. In the postagrogenic soils, the coefficients of variation in the content of Cu and Cd were, respectively, 2.2 and 1.6 times higher, Ni – 1.8 times lower than in natural podzolic and sod-podzolic soils. In most of the studied soils of light texture, the average content of Ni and Cu increased down the soil profile, and the distribution of Cd over the soil profile was more uniform. In the soils of natural ecosystems, the coefficients of variation of the total content of heavy metals in the humus horizon were lower than in the underlying horizons. In postagrogenic soils, the content of the metals in the humus horizon was characterized by greater spatial heterogeneity than in the underlying soil horizons.

Key words: soil, nickel, copper, cadmium, coefficient of variation, coefficient of concentration.

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть территории Ленинградской области подвержена антропогенному воздействию, результатом которого является загрязнение экосистем токсичными веществами. Наиболее распространенными источниками поступления тяжелых металлов в почву являются транспорт, сельское хозяйство, теплоэнергетика и другие виды промышленности (Алексеев, 2008; Васильев, Лобанова, 2015).

Содержание тяжелых металлов в почвах антропогенных ландшафтов существенно варьируется (Васильев, Лобанова, 2015): в урбанизациях Перми вариabельность содержания Ni составляет 142%, а Cu – 173%. В почвах агроэкосистем коэффициент вариации содержания тяжелых металлов ниже. Так, в пахотных горизонтах древнеросшаемых сероземно-оазисных почв Самаркандского оазиса коэффициент вариации валового содержания Cu находится в пределах от 9 до 17% (Литвинович, 2012). В залежных серых лесных почвах Нижегородской области вариabельность валовых форм Cu, Ni и Cd в почвенном слое 0–10 см составляет 7, 13 и 40% соответственно (Семенова, 2020).

Дерново-подзолистые почвы характеризуются наибольшей пестротой агрохимических показателей по сравнению с серыми лесными почвами и черноземами (Литвинович, 2007). Микроэлементы в почвах подзолистого ряда также распределяются неравномерно. По данным Н. Г. Федорца, О. Н. Бахмет и М. В. Медведевой с соавт. (2015), в незагрязненных почвах ледникового холмисто-грядового ландшафта среднетаежной зоны Карелии с преобладанием еловых местообитаний вариация содержания Cu, Cd и Ni составляет 36, 50 и 22% соответственно. В загрязненных почвах Петрозаводска коэффициенты вариации валового содержания Cu выше в два раза, а Ni – в 2,5 раза.

Для научно обоснованной оценки степени загрязнения почв соединениями тяжелых металлов следует использовать корректные опорные значения фоновых концентраций химических элементов в почве. Поэтому, по мнению ряда авторов (Водяницкий, Ладонин, 2012; Панин, 2006), необходима оценка региональных особенностей содержания тяжелых металлов в почвах природных ландшафтов, не подверженных антропогенному воздействию.

В литературе имеется информация о содержании тяжелых металлов в почвах нарушенных ландшафтов Ленинградской области (Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге..., 1995). Однако сведения о распределении тяжелых металлов в почвах природных ландшафтов региона являются недостаточными. В связи с этим целью настоящей работы явилось определение пространственной неоднородности содержания Ni, Cu и Cd в почвах естественных экосистем и постагрогенных почвах северо-востока Лужской возвышенности, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследований являлись почвы северо-восточной части Лужской возвышенности. Данная территория весьма удалена от промышленных источников загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами. Распределение тяжелых металлов в почвах возвышенности изучалось с помощью метода почвенно-экологического мониторинга. Общая площадь Лужской возвышенности составляет 2900 км² (Тишков, 2010). Основная часть возвышенности расположена в Псковской области, а северо-восточная оконечность относится к Лужскому району Ленинградской области. В процессе почвенно-экологического мониторинга было обследовано 115 га территории, всего было заложено 23 почвенных разреза.

Северо-восточная часть Лужской возвышенности в основном сформирована ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями (в большей степени – песчаными, в меньшей – суглинистыми), которые образовались в четвертичный период после Валдайского оледенения (Пестряков, 1973). Рельеф территории представлен двумя основными формами: холмисто-грядовая часть и пойма реки Оредеж. В ландшафтной структуре исследуемой территории пойма занимает 17% территории. Преобладающим типом растительности здесь являются разнотравно-злаковые и осоковые луга, которые ранее использовались как сенокосы. В пойме реки Оредеж было заложено четыре почвенных разреза (в прирусловой части поймы, в её понижении, в притеррасной и центральной частях поймы).

Надпойменная часть рельефа представлена преимущественно песчаными камовыми холмами, где основными типами растительности являются бруснично-зеленомошные сосняки с пятнами лишайников и смешанные травяно-кисличные леса. Данная часть обследуемой территории помимо природных ландшафтов включает также ландшафты, измененные в процессе сельскохозяйственной деятельности, но не вовлеченные в течение последних 30 лет в сельскохозяйственный оборот, покрытые разнотравьем (постагрогенные почвы). Всего на холмисто-грядовой части рельефа было заложено 19 почвенных разрезов.

При выборе места для закладки почвенных разрезов учитывались смена растительности и сведения о сельскохозяйственном использовании территории, в прошлом принадлежавшей СПК «Мичуринский». По признаку состояния обследуемые почвы подзолистого типа почвообразования были разделены на две категории: почвы естественных экосистем и постагрогенные почвы.

Отбор почвенных проб производился из каждого горизонта почвенного профиля. Масса пробы почвы составляла не менее 1 кг (ГОСТ 7.4.3.01-2017). Определение валового содержания в почвах тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) проводилось на атомно-абсорбционном спектрометре «SHIMADZU AA-7000» с электротермической атомизацией образца. Тяжелые металлы из почвы были выделены 5 М HNO₃ при слабом кипячении в течение трех часов, соотношение

«почва – кислота» составляло 1:5 (Методика количественного анализа..., 2005).

В работе представлены средние значения валового содержания тяжелых металлов (Ni, Cu, Cd) в генетических горизонтах почвы, полученные в результате объединения объектов исследования в две выборки: почвы естественных экосистем и постагрогенные почвы. Коэффициент вариации (V, %) был определен как отношение среднего квадратичного отклонения показателя валового содержания элемента (σ) к его среднему значению. Математическая обработка результатов исследования выполнена при помощи метода вариационного анализа в программном обеспечении Microsoft Office Excel 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате почвенно-экологического мониторинга установлено, что основную часть территории северо-востока Лужской возвышенности занимают почвы подзолистого типа почвообразования (рис.), сформированные на флювиогляциальных песках (39%) и на двучленной почвообразующей породе (31%). На долю дерново-подзолистых почв, сформированных на красно-буром моренном суглинке, приходится 13%, аллювиальных почв – 17%. В настоящей работе рассматривается распределение Ni, Cu и Cd только в дерново-подзолистых и подзолистых почвах, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленах. В связи с этим в ходе почвенного мониторинга были идентифицированы следующие почвенные разности:

1) *почвы естественных экосистем*: дерново-среднеподзолистая песчаная контактно-глеявая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (I разрез); дерново-слабоподзолистая песчаная контактно-глеявая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (II и V разрезы); дерново-слабоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (III, VIII, IX разрезы); неглубокоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (IV и X разрезы); дерново-сильноподзолистая песчаная контактно-глеявая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (VI разрез); дерново-среднеподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (VII разрез);

2) *постагрогенные почвы*: дерново-слабоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (XI и XII разрезы); дерново-слабоподзолистая песчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (XIII разрез); дерново-слабоподзолистая супесчаная иллювиально-железистая на флювиогляциальных песках (XIV разрез); дерново-среднеподзолистая супесчаная контактно-глеявая на флювиогляциальных песках, подстилаемая красно-бурым моренным суглинком (XV разрез).

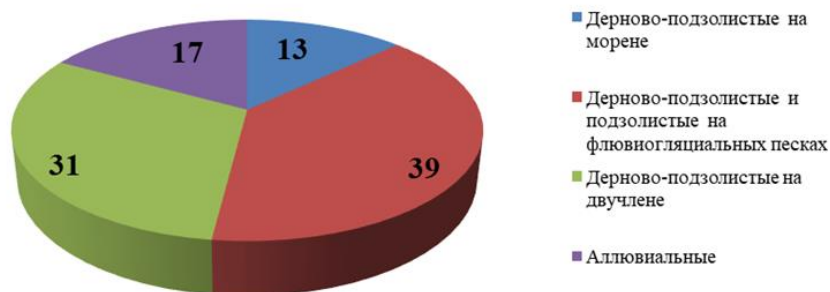


Рис. Почвенный покров обследуемой территории (%)

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют об устойчивой связи между агрохимическими свойствами почвы и содержанием микроэлементов в её почвенном профиле (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Алексеев, 2008; Ефремова, Акатова, 2018; Сорокин, Савич, Янькова, 2020). Изученные почвы подзолистого типа почвообразования могут быть охарактеризованы как почвы с низкой буферностью по отношению к тяжелым металлам, что связано с их легким гранулометрическим составом, низким содержанием органического вещества и повышенной кислотностью среды (Пестряков, 1973). Указанные свойства почв обеспечивают подвижность металлов в почвенной среде и облегчают их миграцию по почвенному профилю.

В почвах естественных экосистем, сформированных на флювиогляциальных песках, наибольшее содержание никеля отмечено в иллювиальном горизонте (табл. 1), которое было в среднем в восемь раз выше, чем в гумусовом горизонте. Содержание никеля в почвах на двучленах также в основном увеличивалось с глубиной почвенного профиля, достигая максимума в постилающей породе – моренном суглинке. В нижних генетических горизонтах почв также содержалось больше меди. Согласно литературным данным (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), кадмий – один из наиболее подвижных тяжелых металлов в почвенной среде. В большинстве исследуемых почв естественных экосистем кадмий был более равномерно распределен по профилю, чем медь и никель, что, по-видимому, объясняется миграцией кадмия с потоками влаги.

Таблица 1. Распределение Ni, Cu, Cd по профилю почв естественных экосистем

Почва	Горизонт	Мощность, см	Ni	Cu	Cd
			мг кг ⁻¹		
I	A ₁	2–25	1,34±0,23	1,52±0,03	0,06±0,01
	A _{2g}	25–58	2,85±0,19	1,48±0,44	0,05±0,00
	BC	58–84	7,22±2,17	5,86±1,63	0,10±0,03
	Dg	>84	9,78±0,89	–	–
II	A ₁	2–18	–	1,78±0,44	0,08±0,01
	BC	18–60	6,31±0,14	2,22±0,35	0,08±0,00
	Dg	60–65	20,21±4,27	9,06±1,32	0,06±0,00
III	A ₁	4–21	2,21±0,74	2,66±0,80	0,07±0,00
	A ₂	21–27	1,55±0,47	1,93±0,58	0,01±0,01
	B	27–67	17,93±0,14	–	0,01±0,00
	C	>67	4,91±0,62	2,18±0,55	0,02±0,00
IV	A ₂	10–39	1,46±0,02	1,36±0,41	–
	B	39–48	4,49±0,25	1,48±0,10	–
	Bh	48–60	3,05±0,11	1,06±0,32	0,02±0,01
	Bfe	60–90	5,35±1,66	1,11±0,14	–
	C	>90	3,61±1,13	4,40±1,32	0,02±0,01
V	A ₁	5–26	–	–	0,21±0,03
	B	26–44	13,91±1,73	5,55±0,37	0,16±0,00
	C	44–59	12,38±0,44	7,31±0,42	–
	D	59–102	11,71±0,76	22,47±1,56	0,11±0,00
VI	A ₁	2–25	0,54±0,11	2,96±0,11	0,11±0,01
	A ₂	25–58	2,54±0,34	3,56±0,28	0,17±0,01
	BC _g	58–84	2,03±0,20	3,66±0,99	0,06±0,02
VII	A ₁	2–28	0,37±0,11	3,46±0,14	0,09±0,00
	A ₂	28–48	0,32±0,08	3,26±0,42	0,11±0,04
	B	>48	11,64±0,90	8,26±1,27	0,13±0,00
VIII	A ₁	2–13	1,70±0,05	–	0,16±0,02
	B _{fe}	13–94	1,61±0,22	2,69±0,01	0,07±0,02
	B ₂	94–101	1,94±0,58	2,39±0,31	0,05±0,01
	BC	>101	1,28±0,36	2,03±0,61	0,04±0,01
IX	A ₁	2,5–13	1,19±0,36	2,80±0,44	0,18±0,02
	B _{fe}	13–53	3,95±0,78	3,70±0,78	0,09±0,03
	B ₂	53–78	18,62±5,59	3,61±1,08	0,11±0,03
	C	78–111	1,84±0,55	1,73±0,04	0,05±0,00
X	A ₂	7–28	0,05±0,01	1,26±0,29	0,03±0,01
	B _{fe}	28–54	1,47±0,33	2,95±0,89	0,07±0,01
	B ₂	54–78	0,56±0,17	1,93±0,58	0,08±0,00
	C	>78	0,73±0,22	7,65±2,30	0,02±0,01

Примечание. 1) данные приведены с учетом результатов двух параллельных измерений содержания элементов в почве; 2) предел обнаружения Cd составляет 0,01 мг кг⁻¹.

В постагрогенных почвах подзолистого типа почвообразования никель, медь и кадмий распределялись так же, как и в профиле почв естественных экосистем, что связано с их длительным пребыванием в состоянии залежи (табл. 2).

Таблица 2. Распределение Ni, Cu, Cd по почвенному профилю постагрогенных почв

Почва	Горизонт	Мощность, см	Ni	Cu	Cd
			мг кг ⁻¹		
XI	A ₁	2–29	1,90±0,57	14,31±4,29	0,17±0,01
	B	29–49	4,05±1,37	3,52±0,18	0,09±0,03
	BC	49–91	2,17±0,02	8,22±2,47	0,13±0,02
	C	>91	8,49±0,66	11,12±0,52	0,10±0,03
XII	A ₁	1–36	1,78±0,30	6,38±0,34	0,03±0,00
	B _{fe}	36–70	4,46±0,34	8,12±0,99	0,07±0,01
	BC	70–103	2,40±0,35	7,14±0,79	0,03±0,00
	C	103–129	7,22±2,17	14,34±0,20	0,03±0,00
XIII	A ₁	2–19	2,30±0,69	10,64±0,31	0,04±0,01
	B	19–62	6,26±1,88	11,60±0,37	0,04±0,01
	BC	62–68	3,59±0,57	7,97±0,81	0,05±0,01
	D	68–77	9,79±0,62	22,37±1,48	0,06±0,01
XIV	A ₁	4–39	1,65±0,50	1,88±0,56	0,05±0,01
	B _{fe}	39–80	5,37±0,48	3,17±0,02	0,11±0,01
	BC	80–130	5,98±1,21	7,64±2,29	0,05±0,00
XV	A ₁	8–54	3,37±1,01	5,02±1,51	0,14±0,02
	A ₂	54–76	3,71±1,11	2,22±0,09	0,01±0,00
	BC _{fe}	76–108	22,10±6,63	1,61±0,48	0,03±0,00
	Dg	108–140	4,20±0,97	5,22±1,07	0,04±0,00

Средние значения валового содержания тяжелых металлов в гумусовом горизонте почв естественных экосистем, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленах, составили: 1,23±0,69 мг Ni кг⁻¹ почвы, 2,53±0,74 мг Cu кг⁻¹ почвы, 0,12±0,06 мг Cd кг⁻¹ почвы (табл. 3). Приведенные значения несколько ниже представленных в литературе средних фоновых показателей для дерново-подзолистых и подзолистых почв легкого гранулометрического состава: 11 мг Ni кг⁻¹ почвы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989); 15 мг Cu кг⁻¹ почвы, 0,55 мг Cd кг⁻¹ почвы (Химия тяжелых металлов..., 1985).

Коэффициенты концентрации химических элементов, рассчитанные из отношения фактического среднего содержания определяемого вещества в почве к его среднему фоновому содержанию (Гигиеническая оценка почв..., 1999), в почвах естественных экосистем составили 0,11 (Ni); 0,17 (Cu); 0,22 (Cd); в постагрогенных почвах – 0,20 (Ni); 0,51 (Cu); 0,16 (Cd). Значения коэффициентов концентрации в пределах 0,2–0,4 можно считать низкими (Федорец, Бахмет, Медведева, 2015). В дерново-подзолистых и подзолистых почвах бывших сельскохозяйственных угодий коэффициент концентрации и валовое содержание меди были в три раза выше, чем в почвах естественных экосистем. Такое различие в содержании микроэлемента в почвах, по-видимому, объясняется применением удобрений и пестицидов, в состав

которых входила медь (Алексеев, 2008; Иванов, Суханов, Дымова, 2010; Троц, Ахматов, 2015; Волкова, Воронкова, Дороненко, 2019). Однако при статистической обработке результатов мониторинга не выявлено существенных различий между содержанием металлов в гумусовом горизонте почв естественных биоценозов и постагрогенных почв (табл. 3, 4), что обусловлено высокой пространственной неоднородностью валового содержания Ni, Cu и Cd в почвах в целом и в постагрогенных почвах в особенности.

В гумусовом горизонте постагрогенных почв коэффициенты вариации (V) содержания меди (64%) и кадмия (75%) были в 2,2 и 1,6 раза выше по сравнению с почвами естественных экосистем. Увеличение неоднородности содержания тяжелых металлов в почве может наблюдаться в результате неравномерного рассеивания удобрений и мелиорантов машинами и механизмами (Литвинович, Павлова, Дричко, 2012).

Коэффициент вариации содержания никеля в гумусовом горизонте постагрогенных почв был в 1,8 раза ниже (31%) по сравнению с почвами естественных экосистем (56%), а валовое содержание никеля в данных почвах и коэффициент его концентрации – в 1,8 раза выше, чем в почвах естественных экосистем. Такая комбинация показателей не позволяет достоверно судить о загрязнении постагрогенных почв Лужской возвышенности никелем.

Таблица 3. Пространственная неоднородность содержания Ni, Cu, Cd в почвах естественных экосистем

Горизонт	min	max	n	Среднее значение	σ	V
	мг кг ⁻¹			мг кг ⁻¹		
Ni						
A ₁	0,37	2,21	6	1,23	0,69	56,68
A ₂	0,05	2,85	6	1,46	1,13	77,37
B*	1,02	17,93	7	8,84	6,51	73,63
BC	1,28	7,22	4	4,21	2,99	71,00
C	0,73	12,38	5	4,69	4,59	97,72
D	9,78	20,21	3	13,90	5,55	39,92
Cu						
A ₁	1,52	3,46	6	2,53	0,74	29,16
A ₂	1,26	3,56	6	2,14	1,01	47,31
B	1,22	8,26	6	3,94	2,57	65,10
BC	2,03	5,86	4	3,44	1,77	51,37
C	1,73	7,65	5	4,65	2,77	59,59
D	9,06	22,47	3	17,56	7,39	42,08
Cd						
A ₁	0,06	0,21	8	0,12	0,06	46,72
A ₂	0,01	0,17	5	0,07	0,07	88,40
B	0,01	0,16	7	0,08	0,06	74,39
BC	0,04	0,1	4	0,07	0,03	36,89
C	0,02	0,05	4	0,03	0,02	54,55
D	0,06	0,28	3	0,15	0,12	76,88

Примечание. * – содержание металлов в горизонте В приведено с учетом всех его модификаций (B, B_h B_{fe}).

Таблица 4. Пространственная неоднородность содержания Ni, Cu, Cd в постагрогенных почвах

Горизонт	min	max	n	Среднее значение	σ	V
	мг кг ⁻¹			мг кг ⁻¹		
Ni						
A ₁	1,65	3,37	5	2,20	0,70	31,70
A ₂	3,71	3,71	1	3,71	-	-
B	4,05	6,26	4	5,04	0,98	19,60
BC	2,17	5,98	4	3,54	1,74	49,40
C	7,22	8,49	2	7,86	0,90	11,43
D	4,20	9,79	2	7,00	3,95	56,51
Cu						
A ₁	1,88	14,31	5	7,65	4,88	63,80
A ₂	2,22	2,22	1	2,22	-	-
B	3,17	11,60	4	6,60	4,02	60,90
BC	7,14	8,22	4	7,74	0,47	6,00
C	11,12	14,34	2	12,73	2,28	17,89
D	5,22	22,37	2	13,80	12,13	87,91
Cd						
A ₁	0,03	0,17	5	0,09	0,06	74,70
A ₂	0,01	0,01	1	0,01	-	-
B	0,04	0,11	4	0,08	0,03	38,50
BC	0,03	0,05	4	0,04	0,01	28,90
C	0,03	0,10	2	0,07	0,05	76,15
D	0,04	0,06	2	0,05	0,01	28,28

Таким образом, сравнение почв естественных экосистем и постагрогенных почв по совокупности показателей содержания тяжелых металлов (среднее содержание элемента, стандартное отклонение, коэффициент вариации, коэффициент концентрации химического элемента) позволило выявить, что фоновое содержание никеля, меди и кадмия в подзолистых и дерново-подзолистых почвах легкого гранулометрического состава на территории северо-востока Лужской возвышенности является невысоким.

При этом следует отметить, что в почвах естественных экосистем содержание тяжелых металлов в гумусовом горизонте варьировалось менее значительно, чем в нижележащих горизонтах, а в постагрогенных почвах, наоборот, валовое содержание металлов в гумусовом горизонте характеризовалось большей пространственной неоднородностью по сравнению с нижележащими почвенными горизонтами.

ВЫВОДЫ

1. В почвенном покрове северо-востока Лужской возвышенности доминируют дерново-подзолистые и подзолистые почвы легкого гранулометрического состава, сформированные на флювиогляциальных песках, а также на флювиогляциальных песках, подстилаемых красно-бурым моренным суглинком.

2. На территории естественных экосистем северо-востока Лужской возвышенности валовое содержание Ni, Cu и Cd в гумусовом горизонте дерново-подзолистых и подзолистых почв, сформированных на флювиогляциальных песках и двучленных породах, составляет соответственно $1,23 \pm 0,69$ мг кг⁻¹, $2,53 \pm 0,74$ мг кг⁻¹ и $0,12 \pm 0,06$ мг кг⁻¹ почвы. Результаты сравнительного анализа опасности загрязнения данных почв и постагрогенных почв Лужской возвышенности тяжелыми металлами позволяют считать представленные значения их содержания в почвах естественных экосистем фоновыми.

3. Валовое содержание тяжелых металлов в гумусовом горизонте постагрогенных почв существенно не отличается от их содержания в почвах естественных экосистем. Однако увеличение коэффициента концентрации и валового содержания меди в постагрогенных почвах в три раза по сравнению с почвами естественных экосистем свидетельствует о загрязнении ею бывших сельскохозяйственных угодий.

4. Коэффициенты вариации валового содержания Ni, Cu и Cd в гумусовом горизонте дерново-подзолистых и подзолистых почв естественных экосистем составили 57, 29 и 47% соответственно. Коэффициенты вариации содержания меди и кадмия в постагрогенных почвах были выше в 2,2 и 1,6 раза соответственно.

5. В большинстве обследованных почв легкого гранулометрического состава среднее содержание Ni и Cu возрастало вниз по профилю, распределение среднего содержания Cd по почвенному профилю было более равномерным.

6. В почвах естественных экосистем коэффициенты вариации валового содержания Ni, Cu и Cd в гумусовом горизонте были меньше, чем в нижележащих горизонтах. В постагрогенных почвах содержание металлов в гумусовом горизонте характеризовалось большей пространственной неоднородностью по сравнению с нижележащими почвенными горизонтами.

Список литературы

- Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
- Васильев А.А., Лобанова Е.С. Эколого-геохимическая оценка почвенного покрова г. Перми: тяжелые металлы и мышьяк // Пермский аграрный вестник. 2015. № 1 (9). С. 34–49
- Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжелыми металлами. М.: Изд-во МГУ, 2012. 304 с.
- Волкова В.А., Воронкова Н.А., Дороненко В.Д., Балбанова Н.Ф. Влияние длительного применения минеральных удобрений и соломы на содержание тяжелых металлов в почве и зерне ячменя // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019. № 2 (22). С. 152–160.
- ГОСТ 17.4.3.01-2017 Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
- Гигиеническая оценка почв населенных мест. МУ 2.1.7.730-99.
- Ефремова М.А., Акатова А.А. Распределение тяжёлых металлов в профиле дерново-подзолистых почв на флювиогляциальных песках // Почвы в биосфере: сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, 10–14 сентября 2018 г., г. Новосибирск. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2018. Ч. I. С. 162–164.
- Иванов А.И., Суханов П.А., Дымова Е.А., Воробьев В.А. Влияние различных систем удобрения на микроэлементное состояние дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2010. № 12. С. 3-9.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
- Литвинович А.В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
- Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф. Пространственное варьирование и внутрпрофильное распределение Cu, Zn, Mn в древнорошаемых сероземно-оазисных почвах Самаркандского оазиса // Агрохимия. 2012. № 2. С. 67–74.

- Определение тяжелых металлов в почвах и донных отложениях атомно-абсорбционным методом. Методика количественного анализа М 02-902-125-2005. СПб., 2005. 32 с.
- Панин М.С. Техногенное воздействие на содержание тяжелых металлов в растительной сельскохозяйственной продукции // Геохимия биосферы. 2006. С. 479–481.
- Пестряков В.К. Почвы Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1973. 344 с.
- Семенова Е.И., Титова В.И., Митянин И.О. Содержание тяжелых металлов в почве после распашки залежи первой стадии сукцессии // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 1-1(91). С. 108–113.
- Сорокин А.Е., Савич В.И., Янькова А.А. Агроэкологическая оценка дерново-подзолистой почвы по содержанию никеля в зависимости от рН среды и комплексообразования // Владимирский земледелец. 2020. № 1(91). С. 22–26.
- Тишков А.А., Лукашов А.А. и др. Ленинградская область // Большая Российская энциклопедия. М., 2010. Т. 17. 751 с.
- Троц В.Б., Ахматов Д.А., Троц Н.М. Влияние минеральных удобрений на аккумуляцию тяжелых металлов в почве и фитомассе зерновых культур // Зерновое хозяйство России. 2015. № 1. С. 45–49.
- Федорец Н.Г., Бахмет О.Н., Медведева М.В. и др. Тяжелые металлы в почвах Карелии. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. 222 с.
- Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Под ред. Н. Г. Зырина, Л. К. Садовниковой. М.: МГУ, 1985. 208 с.
- Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге в 1993–1994 годах: Аналит. обзор / Комитет экологии и природных ресурсов Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Под ред. И. Д. Гусаковой. СПб., 1995. 236 с.
- McGrath S.P. Risk assessment of metals // Proc. Int. Conf. Soil Remediation. Hangzhou, China. 2000. pp. 1–7.

References

- Alekseyev Yu.V. *Tyazhelyye metally v agrolandshafte* [Heavy metals in agricultural landscape]. Saint-Petersburg: Publishing house of PIYAF RAN, 2008, 216 p.
- Vasil'yev A.A., Lobanova E.S. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka pochvennogo pokrova g. Permi: tyazhelyye metally i mysh'yak* [Ecological and geochemical assessment of the soil cover in Perm: heavy metals and arsenic] // *Permskiy agrarnyy vestnik*, 2015, no. 1(9), pp. 34–49.
- Vodyanitskiy Yu.N., Ladonin D.V., Savichev A.T. *Zagryazneniye pochv tyazhelymi metallami* [Soil contamination with heavy metals]. Moscow: Publishing house of Moscow State University, 2012, 304 p.
- Volkova V.A., Voronkova N.A., Doronenko V.D., Balbanova N.F. *Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya mineral'nykh udobreniy i solomy na sodержaniye tyazhelykh metallov v pochve i zerne yachmenya* [Influence of long-term application of mineral fertilizers and straw on the content of heavy metals in the soil and grain of barley] // *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy*, 2019, no. 2(22), pp. 152–160.
- GOST 17.4.3.01-2017 Okhrana prirody. Pochvy. Obshchiye trebovaniya k otboru prob* [Protection of Nature. Soils. General requirements for sampling].
- Gigiyenicheskaya otsenka pochv naseleennykh mest* [Hygienic assessment of soils in populated areas]. *MU 2.1.7.730-99*.
- Efremova M.A., Akatova A.A. *Raspredeleniye tyazhelykh metallov v profile dernovo-podzolistykh pochv na flyuvioglyatsial'nykh peskakh* [Distribution of heavy metals in the profile of sod-podzolic soils on fluvioglacial sands] // *Pochvy v biosfere: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta pochvovedeniya i agrokhimii SO RAN, 10-14 sentyabrya 2018 g., g. Novosibirsk*. Tomsk: Tomsk State University Publishing House, 2018, part I, pp. 162–164.
- Ivanov A.I., Sukhanov P.A., Dymova E.A., Vorob'yev V.A. *Vliyaniye razlichnykh sistem udobreniya na mikroelementnoye sostoyaniye dernovo-podzolistoy pochvy* [Influence of various fertilization systems on the microelement state of sod-podzolic soil] // *Agrokhimiya*, 2010, no. 12, pp. 3–9.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. *Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh* [Trace elements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989, 439 p.
- Litvinovich A.V. *Prostranstvennaya neodnorodnost' agrokhimicheskikh pokazateley pakhotnykh dernovo-podzolistykh pochv* [Spatial heterogeneity of agrochemical indicators of arable sod-podzolic soils] // *Agrokhimiya*, 2007, no. 5, pp. 89–94.
- Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Drichko V.F. *Prostranstvennoye var'irovaniye i vnutriprofil'noye raspredeleniye Cu, Zn, Mn v drevneoroshayemykh serozemno-oazisnykh pochvakh Samarkandskogo oazisa* [Spatial variation and intraprofile distribution of Cu, Zn, Mn in ancient-irrigated serozem-oasis soils of the Samarkand oasis] // *Agrokhimiya*, 2012, no. 2, pp. 67–74.
- Opredeleniye tyazhelykh metallov v pochvakh i donnykh otlozheniyakh atomno-absorbtsionnym metodom. Metodika kolichestvennogo analiza* [Determination of heavy metals in soils and bottom sediments by the atomic absorption method. Quantitative analysis technique]. М 02-902-125-2005. Saint-Petersburg, 2005, 32 p.

- Panin M.S. Tekhnogennoye vozdeystviye na sodержaniye tyazhelykh metallov v rastitel'noy sel'skokhozyaystvennoy produktcii [Technogenic impact on the content of heavy metals in agricultural plant products] // *Geokhimiya biosfery*, 2006, pp. 479–481.
- Pestryakov V.K. *Pochvy Leningradskoy oblasti* [Soils of the Leningrad Region]. Leningrad: Lenizdat, 1973, 344 p.
- Semenova E.I., Titova V.I., Mityanin I.O. Soderzhaniye tyazhelykh metallov v pochve posle raspashki zalezhi pervoy stadii suksessii [The content of heavy metals in the soil after plowing the fallow of the first stage of succession] // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2020, no. 1-1(91), pp. 108–113.
- Sorokin A.E., Savich V.I., Yan'kova A.A. Agroekologicheskaya otsenka derno-podzolistoy pochvy po sodержaniyu nikelya v zavisimosti ot rN sredi i kompleksobrazovaniya [Agroecological assessment of sod-podzolic soil by nickel content depending on the pH of the environment and complexation] // *Vladimirskiy zemledelets*, 2020, no. 1(91), pp. 22–26.
- Tishkov A.A., Lukashov A.A. Leningradskaya oblast' [Leningrad region] // *Bol'shaya Rossiyskaya entsiklopediya*. Moscow, 2010, vol. 17, 751 p.
- Trots V.B., Akhmatov D.A., Trots N.M. Vliyaniye mineral'nykh udobreniy na akkumulyatsiyu tyazhelykh metallov v pochve i fitomasse zernovykh kul'tur [The influence of mineral fertilizers on the accumulation of heavy metals in the soil and phytomass of grain crops] // *Zernovoye khozyaystvo Rossii*, 2015, no. 1, pp. 45–49.
- Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Medvedeva M.V. Tyazhelyye metally v pochvakh Karelii [Heavy metals in soils of Karelia]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN, 2015, 222 p.
- Khimiya tyazhelykh metallov, mysh'yaka i molibdena v pochvakh* [Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils] / Pod red. N. G. Zyrina, L.K. Sadovnikovoy. Moscow: Publishing House of MSU, 1985, 208 p.
- Ekologicheskaya obstanovka v Sankt-Peterburge v 1993-1994 godakh: Analit. obzor / Komitet ekologii i prirodnykh resursov Sankt-Peterburga i Leningradskoy oblasti* [Ecological situation in St. Petersburg in 1993–1994: Analytical overview / Committee for Ecology and Natural Resources of St. Petersburg and the Leningrad Region]. Pod red. I. D. Gusakovoy. Saint-Petersburg, 1995, 236 p.
- McGrath S.P. Risk assessment of metals // Proc. Int. Conf. Soil Remediation. Hangzhou, China, 2000, pp. 1–7.

УДК 631.81

DOI:10.25695/AGRPH.2021.02.02

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ЦИНКА В РАСТЕНИЯХ ЯЧМЕНЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ ПЛОДРОДИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

С. Е. Витковская^{1,2}

¹ *Российский государственный гидрометеорологический университет
192007, Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79, Россия;*

² *Агрофизический научно-исследовательский институт
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, Россия
E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru*

Поступила в редакцию 15 февраля 2021 г., принята к печати 24 мая 2021 г.

Влияние уровня плодородия дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на динамику содержания цинка в растениях изучалось в условиях стационарного полевого эксперимента. Установлено, что содержание Zn в почве существенно возрастало при внесении органических удобрений и не зависело от дозы минеральных удобрений. Содержание Zn в вегетативных органах растений ячменя линейно убывало в течение вегетации. Скорость убывания содержания Zn (скорость биологического разбавления) в период от 27 до 81 сут. роста растений варьировалась в пределах от $-0,33 \pm 0,04$ (контрольный вариант, среднеокультуренная почва) до $-0,52 \pm 0,06$ мг кг⁻¹ сут⁻¹ (вариант 2, хорошо- и высокоокультуренная почва). Коэффициенты вариации (v, %), характеризующие неоднородность содержания элемента в вегетативных органах растений в течение вегетации, изменялись в диапазоне 34–48%. Среднее по вариантам опыта содержание Zn в зерне ячменя варьировалось в пределах 20 ± 2 мг кг⁻¹, превышая его среднее содержание в соломе в 3,5 раза. Содержание цинка в зерне растений ячменя линейно снижалось с увеличением биомассы растений.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, органические и минеральные удобрения, цинк, ячмень, динамика, временная и пространственная неоднородность.