

ОСОБЕННОСТИ ГУМУСА ПОЧВ ЗОЛОТВАЛОВ СРЕДНЕГО УРАЛА

О.А. Некрасова*¹, А.П. Учаев¹, М.И. Дергачева², А.А. Бетехтина¹, Т.А. Радченко¹,
¹ФГАОУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия; ² Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия
*Эл. почта: o_nekr@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.10.2024; принята к печати 28.10.2024

Изучен состав гумуса молодых почв, формирующихся на золе – специфическом техногенном субстрате, занимающим большие площади на Урале и в других регионах. Исследованы самопроизвольно заросшие смешанным лесом в южнотаежных условиях Среднего Урала участки 50–60-летних бурогольных золоотвалов двух электростанций, сложенные золой различного химического состава. Сформировавшиеся на разных золоотвалах эмбриоземы различаются между собой физико-химическими характеристиками и отличаются от фоновых почв более щелочной реакцией среды и более высоким содержанием подвижных форм фосфора и калия. Установлено, что формирование системы гумусовых веществ в молодых почвах на зольном субстрате и в зональных дерново-подзолистых почвах протекает одинаково – с преобладанием синтеза фульвокислот над гуминовыми кислотами, среди которых преобладают наиболее подвижные (бурые) гуминовые кислоты и связанные с ними фульвокислоты. Но количественные показатели состава гумуса дерново-подзолистых почв за рассматриваемый отрезок времени не достигнуты. Отличия свойств зольного субстрата проявляются в особенностях фракционного состава гумуса, в первую очередь в горизонте С. Сделан вывод, что групповой состав гумуса молодых почв, формирующихся на золе, обусловлен биоклиматическими условиями, в то время как фракционный состав каждой группы определяется особенностями зольного субстрата.

Ключевые слова: зола уноса, эмбриозем, гуминовые кислоты, фульвокислоты, южная тайга.

SPECIFIC FEATURES OF ASH DUMP SOILS HUMUS IN THE MIDDLE URALS

О.А. Nekrasova*¹, А.Р. Uchaev¹, М.И. Dergacheva², А.А. Betekhtina¹, Т.А. Radchenko¹,
¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg,
² Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk
*Email: o_nekr@mail.ru

Humus composition in young soils formed on ash, a specific technogenic substrate, which occupies large areas of Urals and other regions in Russia, has been studied. Soil samples differing in their chemical composition were taken from 50- to 60-year old brown coal ash dumps spontaneously overgrown by mixed forests at two power plants located in the southern taiga of the Middle Urals. Newly formed soils at different ash dumps differ from each other in their physicochemical characteristics and differ from the background soils by a more alkaline reaction of their milieu and a higher content of the mobile forms of phosphorus and potassium. The results of the study suggest that the system of humus substances develops in similar ways in young soils and in zonal sod-podzol soils on ash substrate. Fulvic acids synthesis dominates over humic acids synthesis. Among the latter, the most mobile (brown) humic acids and associated fulvic acids prevail, although the quantitative indicators of humus composition specific for sod-podzol soils were not achieved during the time under consideration. Differences in the properties of the ash substrate are manifested in the fractional composition of humus, mainly in the C-horizon. These observations suggest that the group composition of humus in young soils formed on ash depends on the bioclimatic conditions, whereas the fractional composition of each group depends on the characteristics of the ash substrate.

Keywords: fly ash, Technosols, humic acids, fulvic acids, southern taiga.

Введение

Почвенный гумус выполняет важнейшие экологические функции. Прежде всего он является хранителем питательных веществ и служит основным источником энергии для растений и микроорганизмов. Также, благодаря относительно высокой химической стабильности гумусовых веществ и устойчивости к биологическому разложению, почвы служат важнейшим долговременным стоком атмосферного CO₂ и содержат в метровом слое около 1500 Гт углерода [24]. В связи с этим показатели содержания и состава гумусовых веществ являются крайне важными, поскольку обуславливают как процесс почвообразования, так и состояние почв. Они активно исследуются в почвах разных природных зон [17, 18, 21], а также почвах сельскохозяйственного использования [3, 9, 10, 12, 19, 22, 29]. В последние десятилетия в результате антропогенной деятельности увеличиваются площади, занимаемые техногенными субстратами, такими как зола. Она представляет собой остаток, образующийся при сжигании твердого топлива из присутствующих в нем минеральных примесей, состав и свойства которого могут иметь свои особенности в зависимости от источника угля, а также используемой технологии. При заселении живыми организмами зола становится субстратом для почвообразования, которое активно изучается [11, 14, 31-37]. Однако данные о составе гумуса почв, формирующихся на зольном субстрате, который может отличаться значимыми для синтеза и

накопления в почве гумусовых веществ свойствами от горных пород, практически отсутствуют. В то же время установление специфики гумуса почв, формирующихся на техногенном субстрате, может послужить для оценки вклада свойств почвообразующей породы в процесс гумусообразования, а также для выявления его направленности.

Настоящее исследование посвящено установлению особенностей гумуса сформированных на нерекультивированных участках 50–60-летних золоотвалах почв под лесными сообществами в южнотаежных условиях Среднего Урала (на примере золоотвалов Верхнетагильской и Среднеуральской электростанций).

Объекты и методы исследования

Исследование проводилось на золоотвалах Верхнетагильской и Среднеуральской государственных районных электростанциях (ВТГРЭС и СУГРЭС соответственно) в Свердловской области, на Среднем Урале (рис. 1).

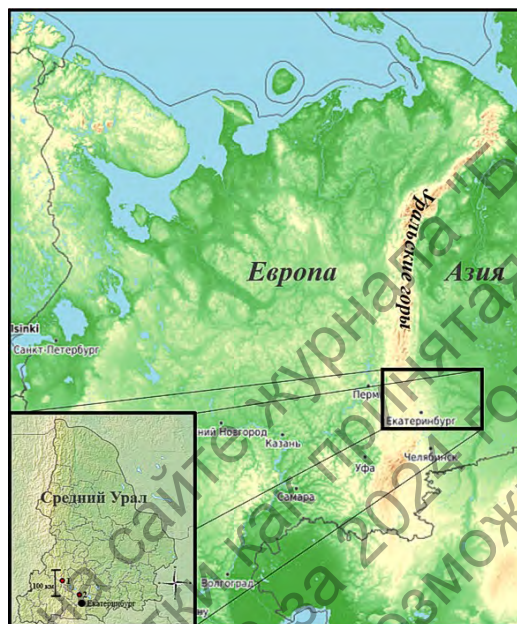


Рис. 1. Расположение объектов исследования: 1 – золоотвал Верхнетагильской ГРЭС; 2 – золоотвал Среднеуральской ГРЭС

Золоотвал ВТГРЭС занимает площадь 125 га, золоотвал СУГРЭС – 192 га. Оба объекта сложены золой уноса бурых углей: первый – из Челябинского и Богословского месторождений, второй – из Челябинского и Экибастузского месторождений [30] и имеют выровненную поверхность и близкий возраст, составляющий 50–60 лет. Расстояние между ними составляет 53 км.

Исследуемые золоотвалы находятся в бореальной умеренно-континентальной климатической области, в подзоне южной тайги. Среднегодовая температура воздуха территории расположения золоотвалов составляет 1,9–2,2°C, годовая сумма осадков равна 600–660 мм [25, 26].

Ко времени проведения исследования на нерекультивированных участках золоотвалов самопроизвольно сформировались смешанные лесные сообщества с доминированием березы (*Betula pendula* Roth) и осины (*Populus tremula* L.), на золоотвале ВТГРЭС возраст древесных растений составлял 40 лет, на СУГРЭС – 50 лет [31, 32]. Изучение видового состава флоры и растительности лесных участков отвалов выявило близость некоторых показателей, в частности сомкнутости крон, запаса биомассы травяно-кустарничкового яруса и общего флористического богатства. Однако по многим признакам (высота древесного яруса, степень развития напочвенных ярусов, видовая насыщенность и другие), растительные сообщества различаются, что связано, очевидно не только с разным временем их формирования, но и отличиями в характеристиках зольного субстрата.

Морфологический анализ поверхности золоотвалов под лесными сообществами позволил выявить начальные этапы почвообразования, проявляющиеся в наличии горизонта подстилки (O) мощностью от 0,5 до 2 см (на золоотвале СУГРЭС – дополнительно грубогумусового горизонта АТ мощностью 2,5 см), а также светлогумусового горизонта АУ мощностью 5–7 см, отличающегося от подстилающего сизовато-серого зольного субстрата (горизонт С) более серой окраской и наличием слабой структуры. Молодые почвы, формирующиеся на золоотвалах, классифицированы нами как эмбриоземы согласно [4] и как техносоли (technosols) в соответствии с [28].

На расстоянии 2–7 км от золоотвалов были также изучены фоновые почвы, которые на основании набора генетических горизонтов O–A–E–B–BC–C были отнесены к дерново-подзолистым [23] или Retisols [28].

В образцах почв, отобранных из трех разрезов на каждом лесном участке, были определены следующие физико-химические показатели: содержание общего органического углерода ($C_{орг.}$) – по Тюрину; общего азота ($N_{общ.}$) – по Кьельдалю, с применением оборудования Velp (Италия); значения pH измерялись на pH-метре Anion 4100 (Россия); содержание подвижного фосфора (P_2O_5) определялось по Кирсанову с использованием спектрофотометра UV Probe-1650 (Япония), подвижного калия (K_2O) – с применением пламенного фотометра PFA-378 (Россия), обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} – титриметрически [1, 2]. Качественный состав гумуса изучался по модифицированной методике В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой [16].

Для удобства сопоставления свойств почв золоотвалов и фоновых почв были рассчитаны средневзвешенные характеристики исследуемых показателей для верхней 20-сантиметровой толщи, поскольку, как было показано ранее [13], процессы начального почвообразования охватывают преимущественно эту часть почвообразующих пород.

Гумусовые профилограммы были построены согласно [6], с использованием программы Originpro 2018.

Результаты и обсуждение

В валовом составе золы уноса ВТГРЭС и СУГРЭС преобладают оксиды кремния и алюминия (таблица 1), следующими по количеству являются оксиды железа. Содержание оксидов кальция и магния в золе ВТГРЭС при сравнении с золой СУГРЭС выше в 1,6 и 3,1 раза соответственно, количества остальных соединений сопоставимы. Зола отличается от наиболее распространенных почвообразующих пород Среднего Урала меньшим содержанием SiO_2 и, в соответствии с подходами к горным породам, является менее кислой. Ранее было установлено, что в гранулометрическом составе золы уноса изучаемых золоотвалов преобладает фракция мелкого песка и (или) крупной пыли [31, 32].

Табл. 1

Валовой состав золы ВТГРЭС и СУГРЭС и некоторых горных пород Среднего Урала (%)

Оксид	Объект			
	Зола ВТГРЭС*	Зола СУГРЭС [27]	Гранодиорит [15]	Гранит [15]
SiO_2	58,9	48,9	63–68	68–73
Al_2O_3	18,2	37,6	12–17	12,0–15,5
Fe_2O_3	9,9	5,4	0,5–3,0	0,5–2,5
CaO	4,3	2,7	3,0–6,0	1,5–4,0
MgO	2,8	0,9	0,5–3,5	0,1–1,5
K_2O	1,2	1,0	1,5–4,0	0,5–3,0
Na_2O	3,1	2,1	2,5–4,0	3,0–6,0
TiO_2	1,2	1,1	0,2–1,0	0,1–0,6
P_2O_5	0,3	0,3	Не опр.	Не опр.

* рассчитано по данным элементного состава, предоставленного администрацией ВТГРЭС

Средневзвешенные для 20-сантиметровой толщи физико-химические характеристики молодых почв, сформировавшихся за 50–60 лет на золоотвалах ВТГРЭС и СУГРЭС (таблица 2), указывают на их различия по нескольким изученным показателям (значению pH, содержанию общего азота, а также подвижных форм фосфора и калия), которые существенно выше на первом объекте. Неоднородность эмбриоземов лесных участков золоотвалов по физико-химическим свойствам, по всей видимости, обусловлена различиями свойств исходной золы, которая служит для них почвообразующей породой, а также разными возможностями перехода соединений зольного субстрата в подвижные формы.

Почвы, формирующиеся в лесных сообществах золоотвалов, по сравнению с почвами естественных лесов (фоновыми почвами), имеют (таблица 2) более щелочную реакцию среды и содержат в несколько раз больше подвижных форм фосфора и калия, при этом почвы золоотвала СУГРЭС характеризуются более низким содержанием общего азота.

Табл. 2

Пределы варьирования средневзвешенных физико-химических характеристик эмбриоземов золоотвалов (n=3) и фоновых почв (n=3)

Показатель	Почва, 0–20 см		
	Золоотвал ВТГРЭС	Золоотвал СУГРЭС	Фон
pH	5,83–7,03	5,12–5,50	4,47–5,15
$C_{орг.}$, %	4,26–5,59	3,96–5,76	4,08–7,97
$N_{общ.}$, %	0,24–0,32	0,11–0,16	0,18–0,29
Ca^{2+} , ммоль/100 г	0,8–3,1	1,9–2,9	1,7–2,7
Mg^{2+} , ммоль/100 г	0,4–1,5	0,9–1,5	0,7–1,5
P_2O_5 , мг/100 г	22,9–26,3	14,7–23,8	0,6–2,0
K_2O , мг/100 г	17,4–27,6	7,6–10,1	3,1–5,8

Поскольку в исходной золе присутствуют несгоревшие частицы угля, с которыми связано относительно высокое содержание органического углерода в зольном субстрате, прежде всего рассмотрим состав гумусовых веществ собственно золы, не охваченной процессами почвообразования. Он приведен на примере золы молодого золоотвала ВТГРЭС, отобранной в нескольких повторностях на глубине 20–40 см на недавно освободившемся от воды технического пруда участке (таблица 3).

Качественный состав гумуса золы характеризуется крайне низким содержанием экстрагируемых веществ – гуминовых кислот и фульвокислот, и, соответственно, высокой долей негидролизуемого остатка, составляющей 98–99%. Во фракционном составе гуминовых кислот преобладают прочно связанные с устойчивыми полуторными оксидами (ГК3), меньшее представительство имеют связанные с кальцием (ГК2), в минимальных количествах присутствуют свободные и связанные с подвижными полуторными оксидами (ГК1). Фульвокислоты, связанные с гуминовыми кислотами разных фракций, образуют по убыванию содержания аналогичный ряд: ФК3>ФК2>ФК1. Гумус, присутствующий в зольном субстрате, соответствует фульватному типу.

Табл. 3

Качественный состав гумуса (% к С_{общ.}) золы ВТГРЭС

№	С _{орг.} , %	Гуминовые кислоты			Фульвокислоты				Гумины	С _{ГК} :С _{ФК}
		ГК1	ГК2	ГК3	ФК1а	ФК1	ФК2	ФК3		
1	4,61	0,04	0,05	0,13	0,02	0,14	0,35	0,46	98,84	0,22
2	3,92	0,03	0,10	0,20	0,03	0,20	0,26	0,77	98,45	0,26
3	4,10	0,03	0,13	0,19	0,05	0,14	0,21	0,92	98,38	0,28

В связи с высоким сходством показателей состава гумуса молодых почв отдельного исследуемого золоотвала на рис. 2 (А, Б) представлены усредненные данные по трем разрезам. Суммарное содержание гуминовых кислот во всех разрезах увеличивается от горизонта подстилки (10–14 %) к нижерасположенному горизонту АУ или АТ (13–19 %) и далее резко сокращается в горизонте С, где оно не превышает 5 %.

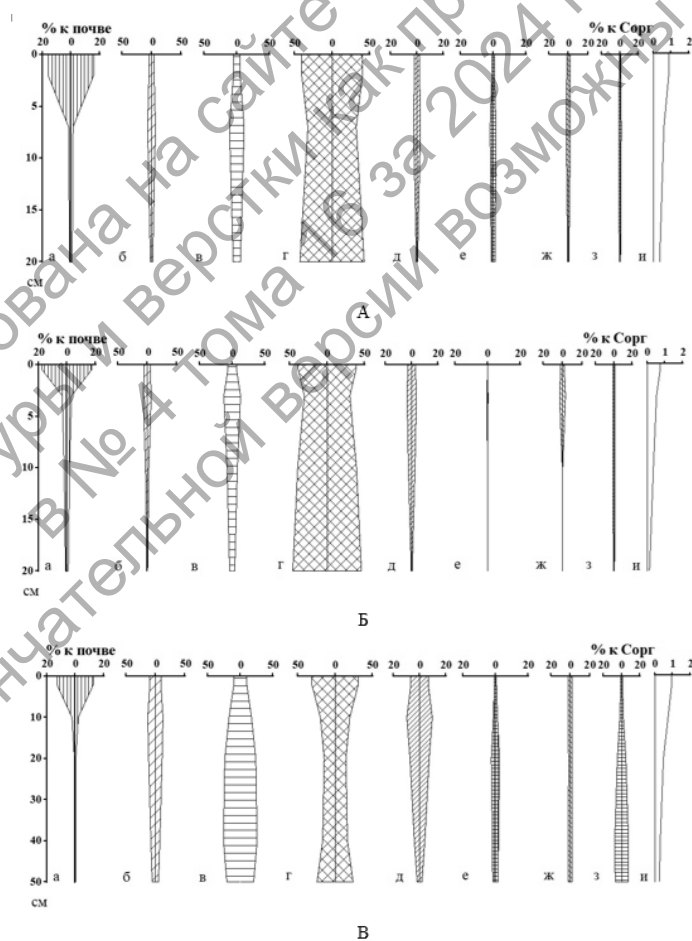


Рис. 2. Гумусовый профиль почв: А – эмбриоземы золоотвала ВТГРЭС, Б – эмбриоземы золоотвала СУГРЭС, В – зональные дерново-подзолистые почвы. Обозначения: а – общий органический углерод, % к почве; % к общему органическому углероду; б – сумма гуминовых кислот (ГК); в – сумма фульвокислот (ФК); г – негидролизуемые формы гумуса; д – ГК фр.1; е – ГК фр. 2; ж – ГК фр. 3; з – ФК фр. 1а; и – С_{ГК}:С_{ФК}.

В верхних горизонтах (рис. 2 А, Б) преобладают бурые ГК, их средневзвешенная доля среди гуминовых кислот составляет для золоотвалов ВТГРЭС и СУГРЭС соответственно 48% и 57%, на долю следующей по представительству фракции прочно связанных с устойчивыми полуторными оксидами ГК приходится 37% и 40%, доля связанных с кальцием ГК минимальна и равна 15% и 3%. В горизонте С эмбриоземов изучаемых золоотвалов фракционный состав гуминовых кислот различается: на золоотвале ВТГРЭС доминируют черные ГК, на которые приходится 63% от суммы ГК; на золоотвале СУГРЭС преобладают бурые ГК, составляющие 60% от суммы ГК.

Фульвокислоты распределены по профилю исследуемых почв аналогично гуминовым кислотам (рис. 2 А, Б) с максимумом в горизонтах под подстилкой (24–25%) и минимумом в горизонте С (13%). Среди ассоциированных с гуминовыми кислотами фульвокислот (таблица 4) в составе гумуса преобладают связанные с бурыми гуминовыми кислотами ФК1, но в горизонте С молодых почв золоотвала ВТГРЭС преобладают фульвокислоты, связанные с черными гуминовыми кислотами.

Табл. 4

Фракционный состав фульвокислот (% к сумме С_{фк}) молодых почв золоотвалов

Горизонт	Глубина	ФК1а	ФК1	ФК2	ФК3
<i>Эмбриозем золоотвала ВТГРЭС (n=3)</i>					
О	0–2	12,9	75,0	2,4	9,7
АУ	2–7	13,8	43,1	33,9	9,2
С	7–20	11,7	23,4	52,3	12,5
<i>Эмбриозем золоотвала СУГРЭС (n=3)</i>					
О	0–0,5	9,3	76,4	0,6	13,7
АТ	0,5–3	7,5	68,8	0,8	22,9
АУ	3–10	18,1	66,9	3,1	11,8
С	10–20	9,4	67,2	3,1	20,3

Неэкстрагируемые гумусовые вещества в наименьших количествах (56–63%) содержатся в составе гумуса горизонтов А или АТ, в наибольших (82–94%) – в горизонте С.

Гумус подстилки имеет гуматно-фульватный состав (значения интегрального показателя соотношения углерода гуминовых кислот и фульвокислот составляют 0,83–0,86). В горизонте А тип гумуса гуматно-фульватный в почвах золоотвала ВТГРЭС или фульватный в почвах золоотвала СУГРЭС (Сгк:Сфк равно 0,54 и 0,31 соответственно). В горизонте С гумус фульватный, при этом значения Сгк:Сфк в эмбриоземах золоотвала ВТГРЭС составляют 0,40, в то время как в эмбриоземах золоотвала СУГРЭС они значительно ниже и в среднем равны 0,16.

Таким образом, несмотря на имеющиеся различия по вещественному составу между исходным зольным субстратом и молодыми почвами исследуемых золоотвалов, формирующиеся в них системы гумусовых веществ [7, 8] обладают сходными показателями долевого соотношения основных групп. Различия гумуса почв разных золоотвалов касаются фракционного состава, в котором на золоотвале ВТГРЭС при сравнении с золоотвалом СУГРЭС фракции черных гуминовых кислот (ГК2) и связанных с ними фульвокислот (ФК2) имеют большее представительство, а в горизонте С даже преобладают.

В составе гумуса почв 50–60-летних золоотвалов по сравнению с таковым углей зольного субстрата (таблица 3, рис. 2) содержится значительно меньше негидролизующих гумусовых веществ и больше – экстрагируемых гуминовых кислот и фульвокислот. Среди последних преобладают фракции бурых гуминовых кислот (ГК1) и связанных с ними фульвокислот (ФК1), в то время как в зольном субстрате преобладают фракции связанных с кальцием гуминовых кислот (ГК2) и ассоциированных с ними фульвокислот (ФК2).

При сравнении с преобладающими на прилегающих к золоотвалам территориях дерново-подзолистыми почвами, состав гумуса которых был обобщен для Среднего Урала по собственным и литературным [5, 20] данным (рис. 2 В, n=7), гумусовые вещества, сформировавшиеся в эмбриоземах на самозарастающих участках 50–60 летних золоотвалов под смешанными лесами (рис. 2 А, Б), характеризуются значительно более низким содержанием экстрагируемых гумусовых кислот (ГК и ФК) и, соответственно, большей долей гуминов. В то же время в верхних горизонтах эмбриоземов пропорции отдельных фракций гуминовых кислот и фульвокислот близки к таковым в фоновых почвах – преобладают свободные и связанные с подвижными полуторными оксидами ГК1 и связанные с ними ФК1. Кроме того, значения интегрального показателя гумуса эмбриоземов золоотвалов (Сгк:Сфк), как и дерново-подзолистых почв, составляют меньше 1.

Заключение

Исследованы особенности гумуса почв, формирующихся на выровненных участках золоотвалов Среднего Урала близкого возраста, расположенных в сходных климатических условиях в подзоне южной тайги под самопроизвольно сформировавшимися однотипными сообществами смешанных лесов.

Полученные материалы позволили заключить, что формирование системы гумусовых веществ в эмбриоземах на золе близкого гранулометрического состава, различающейся рядом химических свойств, в целом протекает единообразно, с преобладанием синтеза фульвокислот над синтезом гуминовых кислот. В

верхних горизонтах в составе экстрагируемых гумусовых веществ преобладают свободные и связанные с подвижными полуторными оксидами гуминовые кислоты и связанные с ними фульвокислоты. Влияние особенностей породы через 50–60 лет почвообразования проявляется главным образом в горизонте С, который в случае нейтральной реакции среды в почве золоотвала ВТГРЭС характеризуется специфичностью фракционного состава гумуса, проявляющейся в преобладании связанных с кальцием гуминовых кислот и ассоциированных с ними фульвокислот.

Несмотря на отличия вещественного состава молодых почв золоотвалов от фоновых дерново-подзолистых почв, связанные главным образом с более щелочной реакцией среды и лучшей обеспеченностью подвижными формами фосфора и калия первых, процесс гумусообразования протекает в них в том же направлении, что и в зональных почвах, однако количественные показатели состава гумуса дерново-подзолистых почв за рассматриваемый отрезок времени эмбриоземами не достигнуты.

Таким образом, групповой состав гумуса изученных молодых почв, формирующихся на техногенном зольном субстрате, обусловлен биоклиматическими условиями, в то время как его фракционный состав определяется особенностями почвообразующей породой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-24-20010) <https://rscf.ru/en/project/24-24-20010/>.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Аринушкина ЕВ. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ; 1970.
2. Воробьева ЛА. Теория и практика химического анализа почв. М.: ГЕОС; 2006.
3. Воропаева ЕВ, Воропаев ВВ. Изменение содержания и качественного состава гумуса окультуренной дерново-подзолистой почвы в различных системах удобрения овощного севооборота. *Агрехимия*. 2019;(12):32-8.
4. Гаджиев ИМ, Курачев ВМ. Генетические и экологические аспекты исследования и классификация почв техногенных ландшафтов. В кн.: *Экология и рекультивация техногенных ландшафтов*. Новосибирск: Наука; 1992. С. 6-15.
5. Гафуров ФГ. Почвы Свердловской области. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета; 2008.
6. Дергачева МИ. Органическое вещество почв: статика и динамика. Новосибирск: Наука; 1984.
7. Дергачева МИ. Система гумусовых веществ почв. Новосибирск: Наука; 1989.
8. Дергачева МИ. Система гумусовых веществ как основа диагностики палеопочв и реконструкции палеоприродной среды. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН; 2018.
9. Ерёмин ДИ, Груздева НА, Ерёмин ДВ. Изменение гумусового состояния серых лесных почв восточной окраины Зауральского плато под действием длительной распашки. *Почвоведение*. 2018;(7):826-35.
10. Иванова МВ, Солдатов ПА, Плотников АА. Влияние длительного использования различных систем удобрений на динамику гумуса в пахотном слое дерново-подзолистой почвы Костромской области. *Агрехимический вестник*. 2020;(3):11-5.
11. Константинов АО, Новоселов АА, Лойко СВ. Особенности процессов почвообразования на участках самозрастающих золоотвалов твердотопливной теплоэлектростанции. *Вестн ТГУ Биол.* 2018;43:6-24.
12. Матвеева НИ, Петров НЮ, Зволинский ВП. Групповой и фракционный состав гумуса почв солонцовых комплексов овощных севооборотов Нижнего Поволжья (на примере светло-каштановых почв севера Астраханской области и каштановых почв юга Волгоградской области). *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020;6(86):76-81.
13. Махонина ГИ. Экологические аспекты формирования почв в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2003.
14. Новоселов АА. Индикаторы почвообразования на техногенных субстратах золоотвалов. *Российский журнал прикладной экологии*. 2019;(3):46-50.
15. Петрографический кодекс. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ; 2008.
16. Пономарева ВВ, Плотникова ТА. Методические указания по определению содержания и состава гумуса в почвах. Л.: Наука; 1975.
17. Раупова НБ, Абдуллаев СА. Состав и свойства гумуса почв вертикальной зональности Западного Тянь-Шаня и их смытых разностей. *Научное обозрение. Биологические науки*. 2019;(2):63-8.
18. Ташкузиев ММ, Шадиева НИ. Состав гумуса, гумусное состояние почв вертикальной зональности бассейна реки Санзар и изменение его под влиянием противозерозионных процессов. *Почвоведение и агрохимия*. 2020;(3):25-33.
19. Турусов ВИ, Сальников РВ. Изменение микрофлоры и состава гумуса почвы в зависимости от звена севооборота. *Центральный научный вестник*. 2019;4(3):20-1.
20. Фирсова ВП, Дергачева МИ, Павлова ТС, Новгородова ГГ, Степанов СБ. Особенности горно-лесных почв Южного Урала. В кн.: *Особенности горного почвообразования под пологом лесов*. Свердловск. 1978. С. 62-99.

21. Хижняк ИН. Особенности гумусного состояния аллювиально-луговых почв левобережной лесостепи Украины. Почвоведение и агрохимия. 2019;(1):39-49.
22. Чеботарев НТ, Микушева ЕН, Мушинский АА. Влияние минеральных удобрений и извести на фракционно-групповой состав и баланс гумуса дерново-подзолистой почвы среднетаежной зоны Республики Коми. Агрохимический вестник. 2019;(6):9-12.
23. Шишов ЛЛ, Тонконогов ВД, Лебедева ИИ, Герасимова МИ. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004.

Общий список литературы / Reference List

1. Arinushkina EV. Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv. [Guidelines for chemical analysis of soils]. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta; 1970. (In Russ.)
2. Vorob'eva LA. Teoriya i praktika himicheskogo analiza pochv. [Theory and practice of chemical analysis of soils]. Moscow: GEOS; 2006. (In Russ.)
3. Voropaeva EV, Voropaev VV [Changes of humus content and humus composition of Sod-Podzolic soil in vegetable crop rotation at different fertilizer application]. Agrohimiya. 2019;(12):32-8. (In Russ.)
4. Gadzhiev IM, Kurachev VM [Genetic and ecological aspects of research and classification of soils of technogenic landscapes]. In: Ekologiya i rekul'tivaciya tekhnogennyh landshaftov. Nauka, Sib. otdeme; 1992. p. 6-15. (In Russ.)
5. Gafurov FG. Pochvy Sverdlovskoj oblasti. [Soils of the Sverdlovsk region]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta; 2008. (In Russ.)
6. Dergacheva MI. Organicheskoe veshchestvo pochv: statika i dinamika. [Soil organic matter: statics and dynamics] Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1984. (In Russ.)
7. Dergacheva MI. Sistema gumusovyh veshchestv pochv. [The system of humic substances of soils]. Novosibirsk: Nauka, 1989. (In Russ.)
8. Dergacheva MI. Sistema gumusovyh veshchestv kak osnova diagnostiki paleopochv i rekonstrukcii paleoprirodnoj sredy. [The system of humus substances as the basis for the diagnosis of paleosoils and reconstruction of the paleoenvironment]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2018. (In Russ.)
9. Eremin DI, Gruzdeva NA, Eremina DV [The change in the humus state of gray forest soils of the Eastern outskirts of the Trans-Ural plateau under the influence of prolonged plowing]. Pochvovedenie. 2018;(7):826-35. (In Russ.)
10. Ivanova MV, Soldatov PA, Plotnikov AA [Influence of long-term use of fertilizers on the dynamics of humus in the arable layer of soddy-podzolic soil of the Kostroma region]. Agrohimicheskij vestnik. 2020;(3):11-5. (In Russ.)
11. Konstantinov AO, Novoselov AA, Loiko SV. [Special features of soil development within overgrowing ash deposit sites at a solid fuel power plant]. Vestnik TGU. Biologiya. 2018;43:6-24. (In Russ.)
12. Matveyeva NI, Petrov NY, Zvolinsky VP [Group and fractional composition of humus in soils of solonetz complexes of vegetable crop rotations in the Lower Volga region (exemplified with light brown soils in the north of the Astrakhan region and brown soils in the north of the Astrakhan region and brown soils in the south of the Volgograd region)]. Izvestiya Orenburgskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta. 2020;6(86):76-81. (In Russ.)
13. Makhonina GI. Ekologicheskiye Aspekty Formirovaniya Pochv v Tekhnogennykh Ekosistemakh Urala. [Ecological Aspects of Soil Formation in Anthropogenic Ecosystems of the Urals]. Yekaterinburg: Izdatelstvo Ural'skogo Universiteta; 2003. (In Russ.)
14. Novoselov AA [Indicators of soil formation on the technogenic substrates of ash dumps]. Rossiyskij Zhurnal Prikladnoy Ekologii. 2019;(3):46-50. (In Russ.)
15. Petrograficheskij Kodeks [Petrographic Code]. Saint-Petersburg: Izdatelstvo VSEGEI; 2008. (In Russ.)
16. Ponomareva VV, Plotnikova TA. Metodicheskiye Ukazaniya po Opredeleniyu Soderzhaniya i Sostava Gumusa v Pochvakh. [Guidelines for Determining the Content and Composition of Humus in Soils]. Leningrad: Nauka; 1975. (In Russ.)
17. Raupova NB, Abdullayev SA [Composition and properties of humus soils across vertical zones of the Western Tien Shan and their washed differences]. Nauchnoye Obozreniye Biologicheskoye Nauki. 2019;(2):63-8. (In Russ.)
18. Tashkuziyev MM, Shadiyeva NI [Humus composition, humus state of soils across vertical zones of River Sanzar basin and its change under the influence of anti-erosion processes]. Pochvovedeniye i Agrokimiya. 2020;(3):25-3. (In Russ.)
19. Turusov VI, Salnikov RV [Changes in microflora and group composition of soil humus depending on the level of crop rotation]. Centralnyi Nauchnyi Vestnik. 2019;4(3):20-1. (In Russ.)
20. Firsova VP, Dergacheva MI, Pavlova TS, Novgorodova GG, Stepanov SB. [Specific feature of the mountain forest soils of South Urals]. In: Osobennosti Gornogo Pochvoobrazovaniya pod Pologom Lesov. Sverdlovsk; 1978. P. 62-99. (In Russ.)
21. Khyzhniak IN [The humus state and its features in the alluvial-floodplain soils of the left-bank forest-steppe in Ukraine]. Pochvovedeniye i Agrokimiya. 2019;(1):39-49. (In Russ.)
22. Chebotarev NT, Mikusheva EN, Mushinsky AA [Influence of mineral fertilizers and lime on fractional-group composition and balance of humus in the soddy-podzolic soil of the Middle taiga in the Komi Republic]. Agrokhimicheskij Vestnik. 2019;(6):9-12. (In Russ.)

23. Shishov LL, Tonkonogov VD, Lebedeva II, Gerasimova MI. *Klassifikatsiya i Diagnostika Pochv Rossii*. [Classification and Diagnostics of Soils in Russia]. Smolensk: Oykumena; 2004. (In Russ.)
24. Batjes NH Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur J Soil Sci*. 2014;65:4-21.
25. Climate-Data.org. Climate Data for Cities Worldwide. <https://en.climate-data.org/asia/russian-federation/sverdlovsk-oblast/sredneuralsk-44950/> (accessed on 27 August 2024).
26. Climate-Data.org. Climate Data for Cities Worldwide. Available online: <https://en.climate-data.org/asia/russian-federation/sverdlovsk-oblast/verkhny-tagil-45250/> (accessed on 27 August 2024).
27. Dergacheva M, Trunova V, Nekrasova O, Siromlya T, Uchaev A, Bazhina N, Radchenko T, Betekhtina A. Assessment of the macro- and microelement composition of fly ash from 50-year-old ash dumps in the Middle Urals (Russia). *Metals*. 2021;11:1-15.
28. IUSS Working Group WRB. *World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps*. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS); 2022.
29. Ivanov P, Banov M. Comparative characteristics of soil organic matter in technosols built with different geological materials and agricultural land use. *Bulg J Agric Sci*. 2020;26(2):293-8.
30. Lukina NV, Filimonova EI, Glazyrina MA, Maleva MG, Prasad MNV, Chibrik TS. Biological reevaluation of fly ash dumps strengthening bioeconomy and circular economy in the Ural region of Russia. In: *Bioremediation and Bioeconomy: a Circular Economy Approach*. Chapter 19. Elsevier BV; 2024. P. 499-527.
31. Nekrasova O, Radchenko T, Filimonova E, Lukina N, Glazyrina M, Dergacheva M, Uchaev A, Betekhtina A. Natural forest colonization and soil formation on ash dump in southern taiga. *Folia Forestalia Polonica Ser A Forestry*. 2020;62(4):306-16.
32. Nekrasova O, Radchenko T, Filimonova E, Uchaev A, Dergacheva M, Petrova T, Betekhtina A. Features of forest communities and soils formed on an ash dump of the Middle Urals. *Forest Ideas*. 2022;28(1):88-99.
33. Pandey VC, Singh N. Fast green capping on coal fly ash basins through ecological engineering. *Ecol Eng*. 2014;73:671-5.
34. Uzarowicz L, Zagorski Z. Mineralogy and chemical composition of technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from selected thermal power stations in Poland. *Soil Sci Annu*. 2015;66(2):82-91.
35. Uzarowicz L, Zagorski Z, Mendak E, Bartminski P, Szara E, Kondras M, Oktaba L, Turek A, Rogozinski R. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part I. Properties, classification, and indicators of early pedogenesis. *Catena*. 2017;157:75-89.
36. Uzarowicz L, Kwasowski W, Spiewak O, Switoniak M. Indicators of pedogenesis of Technosols developed in an ash settling pond at the Belchatow thermal power station (central Poland). *Soil Sci Annu*. 2018;69:49-59.
37. Uzarowicz L, Skibab M, Leuc M, Zagorskia Z, Gasińskid A, Trzcíńskie J. Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution. *Catena*. 2018;162:255-69.