

**АККУМУЛЯЦИЯ УГЛЕРОДА ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОЙ
ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ**

Л. В. Бойцова, С. В. Непримерова, Е. Г. Зинчук

*ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14;
E-mail: larisa30.05@mail.ru**Поступила в редакцию 03.10.2022, принята к печати 30.11.2022*

В статье описаны результаты исследования аккумуляции углерода в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве в условиях различных типов землепользования Новгородской области. Виды землепользования – пашня, залежь, лес. Профили угодий состояли из горизонтов: $A_{\text{пах}}$ (A1); A2B; BC. Выделены фракции следующих размерностей: 0,25–0,05 мм – мелкий песок, 0,05–0,01 мм – крупная пыль, 0,01–0,005 мм – средняя пыль, 0,005–0,001 мм – мелкая пыль и менее 0,001 мм – ил. В данных фракциях определен органический углерод. Значения общего органического углерода ($C_{\text{орг}}$) почвы верхних горизонтов образуют следующий убывающий ряд: залежь > лес > пашня; в нижележащих горизонтах данный ряд несколько меняется и представляет следующее: лес > пашня > залежь. По суммарному содержанию углерода депонированного в мелкопылеватой и илистой фракциях в расчете на массу почвы, почва верхних горизонтов, изученных угодий образует следующий, убывающий ряд: залежь > лес > пашня. Концентрация углерода в гранулометрических фракциях уменьшается с увеличением глубины почвы. В почве верхнего горизонта пашни и залежи фракция крупной пыли давала самый высокий процент связывания углерода (24–29% C от $C_{\text{орг}}$), тогда как грубая песчаная фракция составляла 9–17% C от $C_{\text{орг}}$. В почве верхнего горизонта леса илистая фракция обнаруживала наибольший процент связывания углерода (22% C от $C_{\text{орг}}$), тогда как мелкопылеватая фракция связывала только 12,5% C от $C_{\text{орг}}$. На основании выше изложенного, можно сказать, что почва залежи характеризовалась наибольшей способностью аккумулировать углерод.

Ключевые слова: гранулометрические фракции, углерод, землепользование.

ACCUMULATION OF ORGANIC CARBON IN HEAVY LOAMY SODDY-PODZOLIC SOIL

L. V. Boitsova, S. V. Neprimerova, E. G. Zinchuk

*Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdansky pr., St. Petersburg, 195220;
E-mail: larisa30.05@mail.ru*

The paper describes the results of a study of carbon accumulation in soddy-podzolic heavy loamy soil (Umbric Albelvisoil) of various land use in the Novgorod region. The types of land use were: arable land, fallow land, forest. Three horizons from the soil profiles were studied: A1 (P); A2B (BEL); BC (BtC). Organic carbon was measured in the following texture fractions: 0.25–0.05 mm (fine sand), 0.05–0.01 mm (coarse silt), 0.01–0.005 mm (medium silt), 0.005–0.001 mm (fine silt) and less than 0.001 mm (clay). A qualitative and semi-quantitative analysis of the soil minerals of the various texture fractions was carried out. The total organic carbon ($C_{\text{орг}}$) content in the upper horizons of the soils was decreasing in the series from the fallow to the forest and to the arable land; in the underlying horizons, the order has changed somewhat and $C_{\text{орг}}$ content was decreasing from the forest to the arable land and to the fallow. According to the total content of carbon deposited in the fine silt and clay fractions per soil mass, the soil upper horizons of the studied land use types could be put in the following decreasing series: fallow > forest > arable land. The concentration of carbon in the soil texture fractions was decreasing with increasing soil depth. In the soil of the upper horizon of the arable land and fallow, the coarse silt fraction gave the highest percentage of carbon sequestration (24–29% C of $C_{\text{орг}}$), while the coarse sandy fraction accounted for 9–17% C of $C_{\text{орг}}$. In the soil of the upper horizon of the forest, the clay fraction showed the highest percentage of carbon fixation (22% C of $C_{\text{орг}}$), while the fine silt fraction bound only 12.5% C of $C_{\text{орг}}$.

Keywords: texture fractions, organic carbon, land use.

ВВЕДЕНИЕ

Аккумуляция органического углерода в почве является важнейшим процессом, способствующим закреплению углерода и уменьшению выбросов углекислого газа (Navarro-Pedreño et al., 2021; Gerke, 2022). Почвенные минералы, взаимодействуя с органическими веществами, образуют органоминеральные комплексы, которые способствуют сохранению органического вещества

почвы от микробиологической и физической деструкции. Особенно прочные связи устанавливаются при взаимодействии органического вещества почвы с глинистыми минералами. Гранулометрический состав почвы является фактором, определяющим степень закрепления и время хранения органического вещества. Отдельные гранулометрические фракции играют различную роль в закреплении почвенного гумуса. Это может быть

кратковременная аккумуляция частицами диаметром > 250 мкм или долгосрочная аккумуляция частицами диаметром < 250 мкм, а также общепринятая стабильность углерода, содержащегося во фракции пыли и глины (< 53 мкм) (Six et al., 2002). Относительной стабильностью отличается органическое вещество, ассоциированное с фракциями глины и ила (Boitsova, 2015), а связанное с фракцией песка, напротив, характеризуется нестабильностью и высокой чувствительностью к действию различных факторов (Matus et al., 2016). Образование органоминеральных комплексов в тонкодисперсных фракциях ила и глины (< 20 мкм) признано наиболее важным процессом стабилизации почвенного органического вещества (Hassink, 1997; Six et al., 2002; Когут, Семенов, 2020). Ряд отечественных исследователей отмечает, что мелкопылеватая и илистая фракции являются хранилищем значительного количества органических и органоминеральных соединений (Ахтырцев, Яблонских, 1986; Крыщенко и др., 1999; Овчинникова, 2010; Тищенко, 2012; Латышева, 2015). Зарубежными учеными также предложено (Six et al., 2002) оценивать углероддепонирующий потенциал почвы по доле частиц < 0,05 мм и учитывать минералогический состав почвы. Минералогический состав фракций оказывает влияние на способность защищать органический углерод от микробиологического разложения. Считается, что при одном и том же содержании фракций пыли и ила почвы с доминированием 2:1 минералов (сметиты) способны стабилизировать больше углерода, чем почвы с 1:1 минералами (каолиниты) (Singh, 2017).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В работе использованы образцы дерново-подзолистой почвы (Umbric Albeluvisoil), отобранные на угодьях НИПТИСХ пос. Борки Новгородской области. Почвенные профили заложены на различных сельскохозяйственных угодьях: пашне, залежи, в смешанном лиственном лесу с преобладанием осины (*Pópulus trémula*). На пашне выращивалась тимофеевка луговая (*Phleum pratense*), поверхность залежи покрыта клевером 1-го года (*Trifolium pratense*). По гранулометрическому составу

исследованные почвы Новгородской области относятся к тяжелому суглинку и глине. Профили следующие: пашня – A_{пах} (P по WRB) (0–26), A2B (BEL) (26–60), BC (BtC) (60–110); залежь – A_{пах} (P) (0–33), A2B (BEL) (33–54), BC (BtC) (54–100); лес – A1 (A) (2–18), A2B (ELBt) (18–45), BC (BtC) (45–90).

Содержание общего органического углерода (C_{орг}) и органического углерода, ассоциированного с различными фракциями почвы (C_ф), определялось по методу Тюрина (Растворова и др., 1995). Гранулометрическое фракционирование почвы проводилось методом разминания образца в пастообразном состоянии без применения химических диспергентов. Выделение илистой и других фракций почвы осуществлялось по методике, подробно описанной в работе Бойцовой с соавт. (2019). Выделены фракции следующей размерности: 0,25–0,05 мм – мелкий песок; 0,05–0,01 мм – крупная пыль; 0,01–0,005 мм – средняя пыль; 0,005–0,001 мм – мелкая пыль; менее 0,001 мм – ил. На основании гранулометрического анализа рассчитана доля органического углерода, входящего в состав различных фракций, от его общего содержания. Оценка накопления углерода в почве производилась с использованием коэффициента обогащения углеродом той или иной фракции почвы (Christensen, 1992):

$$E_{\text{soc}} = C_{\text{фракции}} / C_{\text{орг}},$$

где C_{фракции} – содержание углерода во фракции, выраженное в % от массы фракции; C_{орг} – содержание общего органического углерода, выраженное в % от массы почвы.

Статистическая обработка результатов включала вычисления значений средних, стандартных отклонений и коэффициентов корреляции Пирсона. Достоверность различий средних значений оценивалась с помощью однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) при уровне значимости (p) меньше 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты гранулометрического анализа свидетельствуют об утяжелении почв с увеличением глубины (табл. 1). Самые низкие значения содержания илистой фракции отмечены в горизонте A_{пах} пашни, мелкой пыли — в горизонтах лесной почвы.

Таблица 1. Гранулометрический состав дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы

Тип землепользования	Пашня			Залежь			Лес		
	Содержание частиц, % от массы почвы								
Фракции, мм / Горизонт	A	A2B	BC	A	A2B	BC	A	A2B	BC
0,25–0,05	28,4	18,4	2,7	14,4	2,6	2,4	22,50	7,40	3,4
0,05–0,01	22,4	17,6	6,5	17,9	1,2	2	19,90	10,10	8,00
0,01–0,005	12,8	7,4	8,0	12,1	8,2	8,7	12,00	8,20	6,20
0,005–0,001	16,5	20,3	29,5	21,4	39,2	37,6	15,30	17,20	28,50
< 0,001	14,20	35,00	52,60	26,8	47,9	49,1	24,7	49,7	50,3

Примечание: стандартное отклонение от средних значений, приведенных в табл. 1, составляло не более 5%.

Данные о содержании общего органического углерода в изученных вариантах представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, по значениям содержания C_{орг} в верхних горизонтах почвы угодья

образуют следующий убывающий ряд: залежь > лес > пашня; по содержанию углерода в нижележащих горизонтах данный ряд несколько изменяется и является следующим: лес > пашня > залежь.

Таблица 2. Содержание общего органического углерода в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве.

Горизонт / Тип землепользования	Пашня	Залежь	Лес
A _{пах} (A1)	3,12 ± 0,01	4,97 ± 0,03	4,63 ± 0,01
A2B	0,97 ± 0,01	0,50 ± 0,00	1,12 ± 0,02
BC	0,39 ± 0,02	0,24 ± 0,01	0,43 ± 0,00

Результаты анализа распределения углерода по отдельным гранулометрическим фракциям исследуемых почв достоверно ($p < 0,02$) свидетельствуют о максимальном насыщении углеродом в горизонте A_{пах} пашни фракций мелкой пыли и ила, минимальном – фракции мелкого песка (табл. 3). В горизонте A2B наибольшей обуглероженностью отличалась фракция крупной пыли, в горизонте BC – мелкого песка.

Наибольшая доля углерода в горизонтах A_{пах} и A2B пашни приходилась на фракцию крупной пыли (табл. 3), в горизонте BC — на фракции мелкой пыли и ила. Во всех горизонтах пашни минимальная доля C_{орг} приходилась на фракцию средней пыли. Максимальная доля углерода относительно массы почвы в горизонтах A_{пах} и A2B пашни приходилась на фракцию крупной пыли (табл. 3), в горизонте BC – на илистую фракцию.

Наибольшее насыщение углеродом в горизонте A_{пах} почвы залежи характерно для фракции крупной пыли (табл. 3). В горизонтах A2B и BC наибольшей обуглероженностью отличалась фракция средней пыли. Наименьшая обуглероженность характерна для фракций мелкого песка и ила во всех горизонтах залежи. Наибольшая доля углерода от C_{орг} в горизонте A_{пах} почвы залежи приходилась на фракцию крупной пыли (табл. 3), в горизонтах A2B и BC — на фракции мелкой пыли. Во всех горизонтах залежи минимальная доля от C_{орг} приходилась на фракцию мелкого песка. Максимальная доля углерода относительно массы почвы приходилась в горизонте A_{пах} залежи на фракцию крупной пыли (табл. 1), в A2B — на фракцию мелкой пыли, в горизонте BC – на илистую фракцию. Минимальная доля углерода фракции относительно массы почвы во всех горизонтах залежи характерна для фракции мелкого песка (табл. 3).

Таблица 3. Содержание углерода во фракциях дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы

Гор-т	Фракции, мм / Тип землепольз-ния	Пашня			Залежь			Лес		
		C _ф , % от массы фракции	C _ф , % от массы почвы	Доля C _ф от C _{орг} , %	C _ф , % от массы фракции	C _ф , % от массы почвы	Доля C _ф от C _{орг} , %	C _ф , % от массы фракции	C _ф , % от массы почвы	Доля C _ф от C _{орг} , %
A _{пах} A1	0,25–0,05	1,87	0,61	17,0	3,19	0,46	9,3	3,82	0,86	18,6
	0,05–0,01	3,30	0,74	23,7	8,01	1,43	28,9	4,44	0,94	20,4
	0,01–0,005	3,51	0,45	14,4	6,28	0,76	15,3	5,04	0,70	15,1
	0,005–0,001	3,64	0,60	19,3	5,11	1,09	22,0	4,03	0,67	12,5
	<0,001	4,06	0,58	18,5	3,40	0,91	18,3	3,31	0,92	22,2
A2B	0,25–0,05	1,19	0,22	22,6	0,14	0,004	0,7	1,39	0,09	9,5
	0,05–0,01	2,38	0,42	43,1	0,88	0,01	2,1	1,13	0,15	15,7
	0,01–0,005	0,67	0,05	5,1	0,94	0,08	15,6	1,11	0,10	10,1
	0,005–0,001	0,46	0,09	9,6	0,79	0,31	62,7	1,24	0,24	25,5
	<0,001	0,24	0,09	9,5	0,10	0,09	18,4	1,07	0,52	30,9
BC	0,25–0,05	1,20	0,03	8,3	0,10	0,002	0,9	1,26	0,04	9,9
	0,05–0,01	0,32	0,02	5,3	0,34	0,01	2,8	0,72	0,06	13,4
	0,01–0,005	0,21	0,02	4,4	0,47	0,04	16,7	0,78	0,05	11,2
	0,005–0,001	0,27	0,08	20,4	0,36	0,13	55,0	0,26	0,08	19,1
	<0,001	0,43	0,23	58,0	0,10	0,5	20,1	0,38	0,19	44,5

Оценка распределения углерода по отдельным гранулометрическим фракциям лесной почвы показала значительное насыщение углеродом фракции средней пыли по сравнению с грубыми и более тонкими фракциями. В нижележащих горизонтах максимальное насыщение органическим веществом характерно для фракции песка 0,25–0,05 мм. Однако доля углерода данных фракций в C_{орг} минимальна. Максимальная доля углерода относительно массы почвы в горизонте

A1 почвы леса приходилась на фракции крупной пыли и ила (табл. 3), в A2B и BC — на илистую фракцию, что согласуется с данными других исследователей. Так, Jafarzadeh-Haghighi et al. (2016) изучали накопление C_{орг} фракциями 250–2000, 53–250, < 53 мкм в верхнем горизонте почв леса. В работе установлено максимальное накопление органического углерода фракциями менее 53 мкм, что соответствует пыли и илу. Накопление органического углерода в

данных фракциях происходило в количестве от 70 до 92% от $C_{орг}$, доля фракций пыли и ила в исследованных почвах составляла от 30,7 до 63,1%. В ходе настоящего исследования установлено, что минимальная доля углерода фракции от массы почвы в горизонте A1 леса характерна для фракции мелкой пыли (табл. 1), в A2B – для средней пыли, в BC – для мелкого песка. В верхнем горизонте лесной почвы частицы песка аккумулировали больше органического вещества, чем на пашне и залежи, что согласуется с данными, полученными другими авторами (Oades et al., 1987; Subhrajit K. Saha et al., 2010).

Доля углерода от $C_{орг}$, приходящегося на частицы $< 0,005$ мм (мелкая пыль + ил), способствующие длительной стабилизации почвенного углерода, была максимальной в верхних горизонтах залежи и составила для горизонта A1 – 40,32%, для A2B – 81,06%. Более низкие значения данного показателя характерны для почвы пашни (37,74% и 19,08% соответственно) и лесной почвы (34,72% и 56,49% соответственно).

Расчет коэффициента обогащения показал, что его максимальные значения в горизонте $A_{пах}$ были характерны для фракции крупной пыли залежи, в горизонте A2B – для фракции крупной пыли пашни, в BC – для мелкого песка пашни. Из изученных фракций наибольшей депонирующей способностью в двух верхних горизонтах всех угодий обладали фракции пыли, что положительно влияло на длительное закрепление органического углерода в почве. В горизонтах BC фракция песка не способствовала долговременному сохранению органического углерода, так как представлена кварцем, который в силу особенностей своего строения не способен

длительно удерживать углерод (Бойцова, Непримерова, 2018; Boitsova et al., 2018).

Корреляционный анализ выявил обратно пропорциональную связь между величинами $C_{орг}$ и E_{soc} , а также между $C_{ил}$ и E_{soc} ($r = (-0,24) - (-0,96)$).

Если рассчитать отношение количества органического вещества от массы почвы, приходящегося на конкретную фракцию, к количеству частиц конкретной фракции ($V_{сф}/V_{ф}$), то можно установить, что максимальные значения отношения характерны для фракций пыли в верхнем горизонте почвы залежи (табл. 4). В горизонте A2B наибольшим значением данного отношения характеризовались фракции крупной пыли лесной почвы. В горизонте BC максимальные величины данного отношения характерны для фракции песка лесной почвы и почвы пашни, а также для илистой фракции залежи, что совпадает с распределением величин E_{soc} в данном горизонте. Получается, что наибольшей потенциальной депонирующей способностью в верхнем горизонте обладала почва залежи, в горизонте A2B – почва леса, в горизонте BC – почва залежи за счет наибольшего значения отношения $V_{сф}/V_{ф}$, характерного для илистой фракции. При корреляционном анализе влияния количества частиц того или иного размера на накопление органического углерода выявлено достоверное положительное влияние количества частиц крупных и средних фракций ($r = 0,94-0,99$) и достоверное отрицательное влияние количества мелких фракций (мелкой пыли и ила) ($r = -0,72-(-0,96)$) в почве пашни и залежи. Для почвы леса характерна несколько иная тенденция, достоверное отрицательное влияние выявлено лишь для фракции ила ($r = (-0,90)$).

Таблица 4. Величина коэффициента обогащения и отношение содержания углерода фракции (% от массы почвы) к количеству фракции (% от массы почвы) в дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве

Горизонт	Фракция, мм	Пашня		Залежь		Лес	
		E_{soc}	$V_{сф} / V_{ф}$	E_{soc}	$V_{сф} / V_{ф}$	E_{soc}	$V_{сф} / V_{ф}$
A (A1)	0,25–0,05	1,16	0,021	0,64	0,032	0,83	0,038
	0,05–0,01	1,22	0,033	2,21	0,080	0,96	0,047
	0,01–0,005	1,32	0,035	1,87	0,063	1,09	0,058
	0,005–0,001	1,81	0,036	1,63	0,051	0,87	0,044
	$< 0,001$	1,30	0,041	0,68	0,034	0,80	0,037
A2B	0,25–0,05	1,23	0,012	0,28	0,002	1,62	0,012
	0,05–0,01	2,45	0,024	1,76	0,008	1,04	0,015
	0,01–0,005	0,69	0,007	1,89	0,010	1,26	0,012
	0,005–0,001	0,47	0,004	1,58	0,008	2,22	0,014
	$< 0,001$	0,25	0,003	0,19	0,002	0,94	0,010
BC	0,25–0,05	5,35	0,011	0,42	0,001	3,17	0,012
	0,05–0,01	1,27	0,003	1,42	0,005	1,70	0,008
	0,01–0,005	0,55	0,003	2,37	0,005	2,07	0,008
	0,005–0,001	1,13	0,003	1,90	0,003	2,39	0,003
	$< 0,001$	1,69	0,004	4,57	0,010	0,88	0,004

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом анализ показал, что суммарное содержание углерода, депонированного в мелкопылеватой и илистой фракциях верхнего горизонта, в расчете на массу почвы достоверно ($p < 0,01$) уменьшается в ряду: залежь $>$ лес $>$ пашня. Средние значения содержания органического

углерода, ассоциированного с илистой фракцией, в верхнем горизонте изученных почв в расчете на массу почвы достоверно ($p < 0,001$) уменьшаются в таком же ряду. При этом содержание углерода, ассоциированного с илистой фракцией, в почве залежи и леса находится практически на одном уровне при расчете на кг фракции (34,0 г С кг⁻¹ фракции для почвы залежи и 33,1 г С кг⁻¹ фракции для почвы леса). В

почве пашни содержится в 1,2 раза больше углерода, ассоциированного с илом, в расчете на кг фракции, чем в почве залежи и леса. Данная почва отличается более высокой обуглероженностью илистой фракции. Во всех вариантах между содержанием углерода илистой фракции и $C_{орг}$ обнаружена достоверная прямая тесная корреляционная связь ($r = 0,84-0,96$).

Концентрация углерода в гранулометрических фракциях уменьшается с увеличением глубины почвы. В верхнем горизонте почвы пашни и залежи для фракции крупной пыли обнаружен самый высокий процент связывания углерода (24–29% С от $C_{орг}$), тогда как для грубой песчаной фракции – 9–17% С от $C_{орг}$. В верхнем горизонте почвы леса илистая фракция характеризовалась наибольшим процентом

связывания углерода (22% С от $C_{орг}$), тогда как мелкопылеватая фракция связывала только 12,5% С от $C_{орг}$. Пылеватые фракции почвы залежи содержали достоверно ($p < 0,002$) большее количество органического углерода по сравнению с другими вариантами. Данная почва обладала максимальной депонирующей способностью, что подтверждалось наибольшей долей углерода фракций мелкой пыли и ила в составе общего органического углерода среди изученных типов землепользования.

Минералы илистой и мелкопылеватой фракций изученной почвы образуют прочные органоминеральные комплексы с органическим веществом почвы, что способствует его длительной аккумуляции.

Список литературы

- Ахтырцев Б. П., Яблонских Л. А. Зависимость состава гумуса от гранулометрического состава в почвах лесостепи // Почвоведение. 1986. № 7. С. 114–120.
- Бойцова Л. В., Непримерова С. В. Секвестрирование органического вещества в дерново-подзолистой супесчаной почве // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2018. № 6. С. 24–27. DOI: 10.30850/vrsn/2018/6/24-27
- Бойцова Л. В., Непримерова С. В., Зинчук Е. Г. Влияние минералогического состава почв на стабилизацию в них органического углерода // Агрофизика. 2019. № 4. С. 1–8. DOI: 10.25695/AGRP.2019.04.01
- Когут Б. М., Семенов В. М. Оценка насыщенности почвы органическим углеродом // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2020. Вып. 102. С. 103–124. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124
- Крыщенко В. С., Кузнецов Р. В., Самохин А. П. Взаимосвязь между гумусностью почв и их гранулометрическим составом // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 1999. № 2. С. 54–60.
- Кузьмин В. А. Органическое вещество механических фракций дерново-подзолистых почв со вторым гумусовым горизонтом // Почвоведение. 1969. № 6. С. 3–11.
- Латышева Л. А. Роль органического вещества илистой фракции в динамике качественного состава гумуса буроземов острова Рейнеке // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2015. № 3(31). С. 17–26. DOI: 10.17223/19988591/31/2
- Овчинникова М. Ф. Состав и свойства гумусовых веществ различных гранулометрических фракций эродированной дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2010. № 5. С. 13–21.
- Растворова О. Г., Андреев Д. П., Гагарина Э. И., Касаткина Г. А., Федорова Н. Н. Химический анализ почв. СПб.: СПбГУ, 1995. 254 с.
- Семенов В. М., Когут Б. М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Тищенко С. А., Безуглова О. С. Гумусное состояние почв локально переувлажненных ландшафтов нижнего Дона // Почвоведение. 2012. № 2. С. 156–165.
- Boitsova L.V., Zinchuk E.G., Neprimerova S.V., Balashov E.V. Distribution of total and clay-associated organic matter in profiles of arable loamy sand Spodosol // Folia Oecologica. 2015. Vol. 42. № 1. pp. 1–9.
- Boitsova L.V., Zinchuk E.G., Neprimerova S.V. Influence of different types of land use on accumulation of organic matter in soddy podsolich soils // Проблемы агрохимии и экологии. 2018. № 3. С. 45–50.
- Christensen B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // Advances in Soil Science. 1992. Vol. 20(1). 90 p.
- Gerke J. The Central Role of Soil Organic Matter in Soil Fertility and Carbon Storage // Soil Syst. 2022. Vol. 6(2). № 33. 1M C.ЭЖ
- Navarro-Pedreño J., Almendro-Candel M.B., Zorpas A.A. The Increase of Soil Organic Matter Reduces Global Warming, Myth or Reality? // Sci. 2021. Vol. 3(1). № 18. DOI: 10.3390/sci3010018
- Oades J.M., Vassallo A.M., Waters A.G., Wilson M.A. Characterization of organic matter in particle-size and density fractions from red-brown earth by solid state. ^{13}C NMR // Australian J. of Soil Sci. Research. 1987. Vol. 25. pp. 71–82.
- Jafarzadeh-Haghighi A.H., Shamshuddin J., Hamdan J., Zainuddin N. Structural composition of organic matter in particle-size fractions of soils along a climo-biosequence in the Main Range of Peninsular Malaysia // Open Geosci. 2016. № 8. pp. 503–513.
- Matus F., Garrido E., Hidalgo C., Paz F., Etchevers J., Merinoy C., Báez A. Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting Mineralogy // Terra Latinoamericana. 2016. Vol. 34. pp. 311–319.
- Singh M., Sarkar B., Sarkar S., Churchman J., Bolan N., Mandal S., Menon M., Purakayastha T.J., Beerling D.J. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy // Advances in Agronomy. 2017. DOI: 10.1016/bs.agron.2017.11.001
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // Plant and Soil. 2002. Vol. 241. pp. 155–176. DOI: 10.1023/A:1016125726789

- Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles // *Plant Soil*. 1997. Vol. 191. pp. 77–87.
- Subhrajit K. Saha P. K., Ramachandran Nair, Vimala D. Nair, B. Mohan Kumar Carbon storage in relation to soil size-fractions under tropical tree-based land-use systems // *Plant Soil*. 2010. Vol. 328. pp. 433–446. DOI: 10.1007/s11104-009-0123-x

References

- Akhtyrtsev B. P., Yablonskikh L. A. Zavisimost' sostava gumusa ot granulometricheskogo sostava v pochvakh lesostepi [Dependence of the composition of humus on the particle size distribution in the soils of the forest-steppe] // *Pochvovedeniye*, 1986, no. 7, pp. 114–120.
- Boytsova L. V., Neprimerova S. V. Sekvestrirovaniye organicheskogo veshchestva v dernovo-podzolistoy supeschanoy pochve [Sequestration of organic matter in sod-podzolic sandy loamy soil] // *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*, 2018, no. 6, pp. 24–27. DOI: 10.30850/vrsn/2018/6/24-27
- Boytsova L. V., Neprimerova S. V., Zinchuk E. G. Vliyaniye mineralogicheskogo sostava pochv na stabilizatsiyu v nikh organicheskogo ugleroda [Influence of the mineralogical composition of soils on the stabilization of organic carbon in them] // *Agrofizika*, 2019, no. 4, pp. 1–8. DOI: 10.25695/AGRP.2019.04.01.
- Kogut B. M., Semenov V. M. Otsenka nasyshchennosti pochvy organicheskim uglerodom [Assessment of soil saturation with organic carbon] // *Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchayeva*, 2020, vyp. 102, pp. 103–124. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-102-103-124
- Kryshchenko V. S., Kuznetsov R. V., Samokhin A. P. Vzaimosvyaz' mezhdum gumusnost'yu pochv i ikh granulometricheskim sostavom [Interrelation between soil humus content and their granulometric composition] // *Izv. vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki*, 1999, no. 2, pp. 54–60.
- Kuz'min V. A. Organicheskoye veshchestvo mekhanicheskikh fraktsiy dernovo-podzolistykh pochv so vtorym gumusovym gorizontom [Organic matter of mechanical fractions of sod-podzolic soils with a second humus horizon] // *Pochvovedeniye*, 1969, no. 6, pp. 3–11.
- Latysheva L. A. Rol' organicheskogo veshchestva ilistoy fraktsii v dinamike kachestvennogo sostava gumusa burozemov ostrova Reyneke [The role of organic matter of the silt fraction in the dynamics of the qualitative composition of humus in the burozems of Reineke Island] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2015, no. 3(31), pp. 17–26. DOI: 10.17223/19988591/31/2.
- Ovchinnikova M. F. Sostav i svoystva gumusovykh veshchestv razlichnykh granulometricheskikh fraktsiy erodirovannoy dernovo-podzolistoy pochvy [The composition and properties of humic substances of various granulometric fractions of eroded sod-podzolic soil] // *Agrokimiya*, 2010, no. 5, pp. 13–21.
- Rastvorova O. G., Andreyev D. P., Gagarina E. I., Kasatkina G. A., Fedorova N. N. *Khimicheskii analiz pochv* [Chemical analysis of soils]. Saint-Petersburg: Publishing house of SPbSU, 1995, 254 p.
- Semenov V. M., Kogut B. M. *Pochvennoye organicheskoye veshchestvo* [Soil organic matter]. Moscow: GEOS, 2015, 233 p.
- Tishchenko S. A., Bezuglova O. S. Gumusnoye sostoyaniye pochv lokal'no pereuvlazhnennykh landshaftov nizhnego Dona [Humus state of soils in locally waterlogged landscapes of the lower Don] // *Pochvovedeniye*, 2012, no. 2, pp. 156–165.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G., Neprimerova S. V., Balashov E. V. Distribution of total and clay-associated organic matter in profiles of arable loamy sand Spodosol // *Folia Oecologica*, 2015, vol. 42, no. 1, pp. 1–9.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G., Neprimerova S. V. Influence of different types of land use on accumulation of organic matter in soddy podzolic soils // *Problemy agrokhimii i ekologii*, 2018, no. 3, pp. 45–50.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G., Neprimerova S. V., Balashov E. V. Distribution of total and clay-associated organic matter in profiles of arable loamy sand Spodosol // *Folia Oecologica*. 2015. Vol. 42. № 1. pp. 1–9.
- Boitsova L. V., Zinchuk E. G., Neprimerova S. V. Influence of different types of land use on accumulation of organic matter in soddy podzolic soils // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2018. № 3. С. 45–50.
- Christensen B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates // *Advances in Soil Science*. 1992. Vol. 20(1). 90 p.
- Gerke J. The Central Role of Soil Organic Matter in Soil Fertility and Carbon Storage // *Soil Syst*. 2022. Vol. 6(2). № 33. 1M C.ЭЖ
- Navarro-Pedreño J., Almendro-Candel M. B., Zorpas A. A. The Increase of Soil Organic Matter Reduces Global Warming, Myth or Reality? // *Sci*. 2021. Vol. 3(1). № 18. DOI: 10.3390/sci3010018
- Oades J. M., Vassallo A. M., Waters A. G., Wilson M. A. Characterization of organic matter in particle-size and density fractions from red-brown earth by solid state. ¹³CNMR // *Australian J. of Soil Sci. Research*. 1987. Vol. 25. pp. 71–82.
- Jafarzadeh-Haghighi A. H., Shamshuddin J., Hamdan J., Zainuddin N. Structural composition of organic matter in particle-size fractions of soils along a climo-biosequence in the Main Range of Peninsular Malaysia // *Open Geosci*. 2016. № 8. pp. 503–513.
- Matus F., Garrido E., Hidalgo C., Paz F., Etchevers J., Merinoy C., Báez A. Carbon saturation in the silt and clay particles in soils with contrasting Mineralogy // *Terra Latinoamericana*. 2016. Vol. 34. pp. 311–319.

- Singh M., Sarkar B., Sarkar S., Churchman J., Bolan N., Mandal S., Menon M., Purakayastha T.J., Beerling D.J. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy // *Advances in Agronomy*. 2017. DOI: 10.1016/bs.agron.2017.11.001
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils // *Plant and Soil*. 2002. Vol. 241. pp. 155–176. DOI: 10.1023/A:1016125726789
- Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles // *Plant Soil*. 1997. Vol. 191. pp. 77–87.
- Subhrajit K. Saha P. K., Ramachandran Nair, Vimala D. Nair, B. Mohan Kumar Carbon storage in relation to soil size-fractions under tropical tree-based land-use systems // *Plant Soil*. 2010. Vol. 328. pp. 433–446. DOI: 10.1007/s11104-009-0123-x