

## СТРУКТУРА И МИНЕРАЛИЗУЕМОСТЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ, В РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ПОДВЕРЖЕННЫХ ЭРОЗИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ

Н. Н. ЦЫБУЛЬКО, С. С. РОМАНЕНКО

РНДУП «Институт почвоведения и агрохимии»,  
г. Минск, Республика Беларусь, 220108, e-mail: nik.nik1966@tut.by

И. И. ЖУКОВА

Белорусский государственный педагогический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь, 220108

А. С. ТУЛИНА

ФГБУН «Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения»,  
г. Пуцино, Россия

(Поступила в редакцию 22.03.2018)

Органическое вещество в педосфере является основным природным генератором и источником углеродосодержащих газов (прежде всего,  $\text{CO}_2$ ), поступающих в атмосферу. Антропогенная деятельность привела к разомкнутости биогеохимического круговорота диоксида углерода в экосистемах, следствием чего явился прогрессирующий рост его содержания в атмосфере. Органическое вещество почвы (ОВП) нередко является лимитирующим фактором продуктивности экосистем; от качественного и количественного его состава зависит поведение загрязнений различного происхождения, формирование противозрозионной стойкости и свойств почв.

В статье приведена структура минерализуемого пула органического вещества, показатели углеродсеквестрирующей емкости почв в зависимости от степени их эродированности и периода определения. Водная эрозия способствовала увеличению минерализуемости органических соединений углерода вдвое. Содержание активного органического вещества в незэродированной почве составило 872 мг/кг, среднезэродированной – 839, сильнозэродированной – 813 и в намывтой – 990 мг/кг. В эродированных почвах показатели стабильности органического вещества снижаются на 8–23 %, а содержание  $\text{C}_{\text{пл}}$  в сильнозэродированной почве по сравнению с незэродированной увеличивается на 35 мг/кг. С увеличением степени эродированности почвы относительное содержание трудно минерализуемой фракции органического вещества возрастает от 74 до 76 %, содержание легко минерализуемой фракции снижается.

**Ключевые слова:** органическое вещество почвы, активный пул органического вещества, стабильность органического вещества, минерализация, углеродсеквестрирующая емкость.

Organic matter in the pedosphere is the main natural generator and source of carbon-containing gases (primarily  $\text{CO}_2$ ) entering the atmosphere. Anthropogenic activity led to the openness of biogeochemical cycle of carbon dioxide in ecosystems, resulting in a progressive increase in its content in the atmosphere. Soil organic matter is often a limiting factor in ecosystem productivity; its qualitative and quantitative composition influences pollution of various origins, the formation of erosion resistance and the properties of soils.

The article presents the structure of mineralized pool of organic matter, indicators of carbon-sequestering capacity of soils, depending on the degree of their erosion and the period of determination. Water erosion has doubled the mineralization of organic compounds of carbon. The content of active organic matter in non-eroded soil was 872 mg / kg, medium-eroded – 839, strongly eroded – 813 and in washed – 990 mg / kg. In eroded soils, the indicators of stability of organic matter are reduced by 8–23%, and the content of  $\text{CO}_2$  in highly eroded soil increases by 35 mg / kg compared to non-eroded. With an increase in the degree of soil erosion, the relative content of difficultly mineralizable fraction of organic matter increases from 74 to 76%, the content of easily mineralized fraction decreases.

**Key words:** soil organic matter, the active pool of organic matter, stability of organic matter, mineralization, carbon-sequestering capacity.

### Введение

Стабильность ОВП – это степень устойчивости составляющих его компонентов к биотической, физико-химической деградации, вымыванию и эрозии. Образующиеся при разложении свежего органического вещества гидрофильные компоненты быстро связываются с гидрофобными центрами гуминовых веществ, подвергаясь химической стабилизации. Органическое вещество (ОВ) микроагрегатов и органо-минеральных комплексов физически защищено от ферментативного и микробного воздействия. Разлагаемое ОВ, содержащееся в порах, диаметр которых меньше размера бактерий, становится недоступным для разложения. Значительная часть органического углерода ( $\text{C}_{\text{орг}}$ ), содержащегося в минеральных почвах, стабильна, поскольку находится в химически или физически защищенном состоянии, либо в составе малодоступных микробам гумусовых образований.

Способность ОВ стабилизироваться в почве, трансформируясь в малодоступное для почвенных микроорганизмов состояние, – важное его свойство, а само явление стабилизации представляет характерную стадию динамики углерода. В агрономическом аспекте предпочтительнее нахождение в почве лабильного, потенциально минерализуемого и быстро оборачиваемого органического вещества, которое высвобождало бы элементы питания для растений [1]. В глобальном экологическом ас-

пекте с целью ограничения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, наоборот, желательно чтобы ОВП было стабильным, а поступающее ОВ быстрее стабилизировалось, обеспечивая почвенную секвестрацию углерода – перевод  $\text{C-CO}_2$  через биомассу растений в ОВП для долговременного сохранения в почвенном пуле [2–4].

Интенсивное использование почв приводит, с одной стороны, к увеличению стабильной фракции в «старом» ОВ, а с другой стороны, усиливает поступление в почву с растительными остатками «нового»  $\text{C}_{\text{орг}}$ , который подвергается последующей стабилизации.

Цель исследований заключалась в изучении структуры и минерализуемости органического вещества дерново-подзолистых легкосуглинистых почв на лессовидных суглинках в разной степени подверженных эрозионной деградации.

#### Основная часть

Исследования проводили в условиях центральной почвенно-экологической провинции на стационаре «Стоковые площадки» (СПК «Щемяслица» Минского района). Постоянные стоковые площадки расположены на выпуклом склоне южной экспозиции крутизной  $5-7^\circ$  по геоморфологическому профилю от водораздельной равнины до подножья склона. Объектом исследований являлись дерново-подзолистые легкосуглинистые незеродированная, средне-, сильноэродированная и намытая почвы.

Агрохимические показатели почв: незеродированная почва –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 5,74$ , гумус 1,83 %, общий азот 967 мг/кг, подвижный фосфор и калий 284 и 269 мг/кг, соответственно; среднеэродированная почва –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 5,53$ , гумус 1,78 %, общий азот 689 мг/кг, подвижный фосфор и калий 277 и 263 мг/кг соответственно; сильноэродированная почва –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 5,52$ , гумус 1,29 %, общий азот 661 мг/кг, подвижный фосфор и калий 272 и 215 мг/кг соответственно; намытая почва –  $\text{pH}_{\text{KCl}} 6,08$ , гумус 1,49 %, общий азот 800 мг/кг, подвижный фосфор и калий 315 и 262 мг/кг соответственно.

Исследования проводили при возделывании озимой пшеницы. Схема опыта включала 2 варианта: 1.  $\text{P}_{40}\text{K}_{70}$ ; 2.  $\text{N}_{110}\text{P}_{40}\text{K}_{70}$ . Фосфорные (суперфосфат аммонизированный) и калийные удобрения (калий хлористый) вносили перед посевом, азотные удобрения (карбамид) – в начале весенней вегетации ( $\text{N}_{90}$ ) и в подкормку в фазу выхода в трубку растений ( $\text{N}_{20}$ ).

Повторность вариантов в опыте четырехкратная.

Агрохимические показатели почв определяли: гумус по ГОСТу 26212–91 [5];  $\text{pH}_{(\text{KCl})}$  – потенциометрическим методом по ГОСТу 26483–85 [6]; подвижные формы фосфора и калия – по ГОСТу 26207–91 [7], общий азот – по ГОСТу 26107–84 [8]. Содержание общего органического углерода – с помощью  $\text{CN}$  анализатора Elementar Vario ELIII [9, 10]. Для определения минерализующей способности почвенные образцы отбирались в весенний и осенний периоды.

Минерализуемый пул почв оценивали методом биокинетического фракционирования органического вещества [1]. Данный метод позволяет оценить доступность для микроорганизмов углеродсодержащего субстрата по содержанию в нем потенциально-минерализуемого углерода ( $\text{C}_{\text{пм}}$ ) и углерода легко ( $\text{C}_1, k_1 > 0,1 \text{ сут}^{-1}$ ), умеренно ( $\text{C}_2, 0,1 < k_2 > 0,01 \text{ сут}^{-1}$ ) и трудно ( $\text{C}_3, 0,01 < k_3 > 0,001 \text{ сут}^{-1}$ ) минерализуемых его фракций.

Воздушно-сухие образцы почв с размером структурно-агрегатных отдельностей  $< 2 \text{ мм}$  помещали в стеклянные флаконы в трехкратной повторности и добавляли воду до весовой влажности 25 %. Почвенные образцы инкубировали в течение 150 суток при температуре  $22^\circ\text{C}$ . Количество продуцируемого образцами почвы  $\text{CO}_2$  определяли ежедневно в течение первой недели эксперимента, затем три, два и один раз в неделю. За период инкубации было произведено 38 определений концентрации  $\text{CO}_2$ . Концентрацию  $\text{CO}_2$  в газовых пробах измеряли на хроматографе Кристалл Люкс 4000 М [9].

Расчет содержания потенциально-минерализуемого углерода ( $\text{C}_{\text{пм}}$ ) в почве производился по кумулятивному количеству  $\text{C-CO}_2$ , выделившегося за весь период инкубации (уравнение 1). Аппроксимируя кумулятивные кривые продуцирования  $\text{C-CO}_2$  за весь период инкубации трехкомпонентным уравнением экспоненциальной регрессии (уравнение 2), вычисляли содержание углерода легко ( $\text{C}_1, k_1 > 0,1 \text{ сут}^{-1}$ ), умеренно ( $\text{C}_2, k_2 > 0,01 \text{ сут}^{-1}$ ) и трудно минерализуемых ( $\text{C}_3, k_3 > 0,001 \text{ сут}^{-1}$ ) фракций активного ОВП.

$$Ct = C_{\text{пм}} \cdot [1 - \exp -k_0 \cdot t] \quad 1)$$

$$Ct = C_1 \cdot [1 - \exp -k_1 \cdot t] + C_2 \cdot [1 - \exp -k_2 \cdot t] + C_3 \cdot [1 - \exp -k_3 \cdot t] \quad 2)$$

$$Ct = C_1 \cdot [1 - \exp -k_1 \cdot t] + C_2 \cdot [1 - \exp -k_2 \cdot t] \quad 3)$$

$$Ct = C_1 \cdot [1 - \exp -k_1 \cdot t] + C_3 \cdot [1 - \exp -k_3 \cdot t] \quad 4)$$

где  $C_1$  – кумулятивное количество  $\text{C-CO}_2$  (мг/100 г) за время  $t$  (сутки);  $C_{\text{пм}}$  – содержание (мг/100 г) потенциально минерализуемого углерода;  $C_1, C_2, C_3$  – содержание (мг/100 г) углерода легко, умеренно и трудно минерализуемых фракций активного пула ОВП;  $k_0, k_1, k_2, k_3$  – константы скорости минерализации органического вещества соответствующих фракций ( $\text{сут}^{-1}$ ).

За годы исследований метеорологические условия вегетационных периодов различались. По степени увлажнения 2012 г. характеризовался избыточным увлажнением с ГТК 2,04, а 2013 и 2014 гг. – хорошей увлажненностью с ГТК 1,52 и 1,50 соответственно.

В наших исследованиях содержание общего органического углерода ( $C_{орг}$ ) в пахотном слое с увеличением степени эродированности почвы снижалось от 15000 до 12500 мг/кг почвы. В намытой почве содержалось 13300 мг/кг  $C_{орг}$  (табл. 1).

Таблица 1. Общее содержание органического углерода и общего азота в исследуемых почвах

Степень эродированности почвы	$C_{орг}$ , мг/кг	$N_{общ}$ , мг/кг почвы	C:N
Неэродированная	15000	967	15,5
Среднеэродированная	13250	689	19,2
Сильноэродированная	12500	661	18,9
Намытая	13300	800	16,6

Органическое вещество почвы по времени оборачиваемости подразделяется на три пула: активный ( $T < 3-10$  лет), медленный ( $T = 10-100$  лет) и пассивный ( $T > 100$  лет) [11]. Активный (лабильный) пул образует свежее ОВ высокого энергетического и питательного статуса, быстро утилизируемое микроорганизмами и расходуемое при макроагрегации; химически и физически не защищенное ОВ, способное к химическим и биохимическим реакциям. Медленный пул состоит из физически защищенного и исходно прочного ОВ. Пассивный пул представляет недоступное микроорганизмам по биохимическим характеристикам и (или) связанное минеральной частью почвы ОВ.

С увеличением эродированности почвы абсолютное количество фракции  $C_1$  снижалось, а фракции  $C_3$  увеличивалось. Относительно содержание легко минерализуемой фракции в средне- и сильноэродированной почвах составило соответственно 26 и 30 % от активного ОВ.

Нами определен активный пул органического вещества (АОВ), а также установлены особенности распределения углерода между легко ( $k_1 > 0,1$  сут<sup>-1</sup>) и трудно минерализуемыми ( $k_3 > 0,001$  сут<sup>-1</sup>) фракциями активного пула органического вещества исследуемых почв. Вклад данных фракций в пул АОВ колебался в зависимости от условий эксперимента (табл. 2).

Таблица 2. Структура минерализуемого пула органического вещества почв разной эродированности при температуре 22 °С и влажности 25 вес, %

Степень эродированности почвы	Период отбора проб почвы	$C_1$		$k_1$ , сут <sup>-1</sup>	$C_3$		$k_3$ , сут <sup>-1</sup>
		мг/кг	% от АОВ		мг/кг	% от АОВ	
Неэродированная	Осенний	239±12	28	0,225±0,012	611±39	72	0,012±0,001
	Весенний	226±9	25	0,288±0,019	669±33	75	0,011±0,000
Среднеэродированная	Осенний	224±13	26	0,205±0,005	632±13	74	0,011±0,000
	Весенний	215±3	26	0,260±0,035	605±62	74	0,013±0,001
Сильноэродированная	Осенний	208±8	30	0,280±0,012	685±8	70	0,013±0,000
	Весенний	183±17	25	0,217±0,028	548±27	75	0,010±0,002
Намытая	Осенний	212±16	25	0,270±0,006	629±35	75	0,013±0,001
	Весенний	369±3	32	0,188±0,000	768±1	68	0,013±0,001

Примечание:  $C_1$  – углерод легко минерализуемой фракции активного органического вещества со временем оборачиваемости менее 10 суток,  $C_3$  – углерод трудно минерализуемой фракции активного органического вещества со временем оборачиваемости 10–1000 суток,  $k_1$  и  $k_3$  – константы скорости минерализации  $C_1$  и  $C_3$  соответственно, сут<sup>-1</sup>.

В неэродированной почве содержание АОВ составило 87,2 мг/100 г. почвы, или 5,81 % от общего количества органического вещества, в среднеэродированной – 83,8 (6,32 %), сильноэродированной – 81,3 (6,50 %) и в намытой – 99,0 мг/100 г почвы (7,4 %) соответственно.

Намытая почва отличается наиболее высокой минерализационной способностью и относительным содержанием легко минерализуемой фракции (29 %) активного органического вещества.

При определении структуры минерализуемого пула органического вещества в ранневесенний период, в начале возобновления вегетации озимой пшеницы установлено следующее. Как и в осенний период, абсолютное количество фракции  $C_1$  уменьшалось по мере увеличения эродированности почвы, а относительное количество не зависело от эродированности почвы и составляло 25–26 % от минерализуемого пула органического вещества.

Только в намытой почве наблюдалось повышение удельного веса легко минерализуемой фракции до 32 %. Полученные данные указывают на роль водно-эрозионных процессов и массопереноса в результате весеннего снеготаяния в изменении минерализуемого пула органического вещества почв склоновых агроландшафтов.

В среднем в изученных почвах содержалось в 2,8–4,1 раза больше фракции  $C_3$ , чем  $C_1$ . В неэродированной почве на долю легкоминерализуемой фракции приходится 27 % и на долю трудноминера-

лизуемой фракции – 73 %. С увеличением эродированности почвы наблюдается уменьшение как абсолютного, так и относительного содержания фракции  $C_1$  в структуре АОВ.

Процентное содержание  $C_{\text{пм}}$  от общего количества органического углерода характеризует минерализационную способность органического вещества почвы. Однако его относительное количество по отношению к общему органическому углероду, характеризующему минерализуемость органического вещества почвы, различалось и составило в незэродированной почве 4,6 %, в среднеэродированной почве – 5,1, в сильноэродированной почве – 5,6 и в намытой почве – 6,4 % (табл. 3).

Таблица 3. Потенциально минерализуемый углерод ( $C_{\text{пм}}$ ) и углеродсеквестрирующая ёмкость в почвах разной смывтости при температуре 22 °С и влажности 25 вес, %

Степень эродированности почвы	Период отбора проб почвы	$C_{\text{пм}}$		$k_0, \text{сут}^{-1}$	Секвестрирующая ёмкость
		мг/кг почвы	% от $C_{\text{орг}}$		
Незэродированная	Осенний	718±30	4,6	0,030±0,001	19,9
	Весенний	674±29	4,7	0,028±0,001	21,3
	Среднее	696	4,6	0,029	20,6
Среднеэродированная	Осенний	706±10	5,1	0,027±0,001	17,8
	Весенний	642±20	5,1	0,028±0,001	19,6
	Среднее	674	5,1	0,028	18,7
Сильноэродированная	Осенний	768±5	5,6	0,026±0,001	15,3
	Весенний	694±29	5,8	0,027±0,001	17,0
	Среднее	731	5,7	0,026	16,2
Намытая	Осенний	720±30	6,4	0,028±0,000	17,5
	Весенний	971±13	6,8	0,031±0,001	12,7
	Среднее	845	6,6	0,030	15,1

Примечание:  $k_0$  – константа скорости минерализации  $C_{\text{пм}}, \text{сут}^{-1}$ .

В результате исследования установлено, что содержание потенциально-минерализуемого углерода ( $C_{\text{пм}}$ ) в почвах зависит от валового количества  $C_{\text{орг}}$ . В осенний период после уборки культуры и проведения зяблевой вспашки содержание  $C_{\text{пм}}$  в незэродированной, средне-, сильноэродированной и намытой почвах колебалось в пределах от 706 до 768 мг/кг почвы.

В ранневесенний период при возобновлении вегетации озимой пшеницы содержание  $C_{\text{пм}}$  в незэродированной и эродированных почвах было ниже, чем в осенний период и колебалось в пределах 642–694 мг/кг почвы. Намытая почва в ранневесенний период содержала на 35 %  $C_{\text{пм}}$  больше, чем в осенний период – 971 мг/кг почвы.

Относительное количество потенциально-минерализуемого углерода по отношению к общему органическому углероду в ранневесенний период возрастало по мере повышения степени эродированности почвы. Максимальным оно было в намытой почве – 6,8 %.

Следует отметить, что в ранневесенний период наблюдалось снижение содержания  $C_{\text{пм}}$  в пахотном слое по мере увеличения эродированности почвы. Так если на незэродированной почве количество его составляло 728 мг/кг, то на средне- и сильноэродированной почвах соответственно 635 и 632 мг/кг, или на 12,7–13,2 % меньше.

Большая минерализуемость органического вещества эродированных почв по сравнению с незэродированной может объясняться разрушением почвенных агрегатов в результате водной эрозии, что приводит к уменьшению его защищенности. Минерализуемость органического вещества намытой почвы была примерно такой же, как и незэродированной почвы.

Полученные данные показывают, что органическое вещество незэродированной почвы характеризуется наиболее высокой стабильностью (19,9–21,3). По мере увеличения степени смывтости почвы наблюдается снижение данного показателя с 17,8–19,6 до 15,3–17,0.

По нашему мнению, более высокая стабильность органического вещества незэродированной почвы связана с его физической стабилизацией, сущность которой заключается в обеспечении пространственной недосыгаемости микроорганизмами и ферментами в результате агрегации. Органическое вещество намытого бесструктурного почвенного материала характеризуется самой низкой стабильностью.

### Заключение

Соотношение общего органического углерода и общего азота практически не зависит от степени их эродированности и составляет 16,6–19,2, что способствует протеканию минерализационных процессов в почве.

Водная эрозия способствовала увеличению минерализуемости органических соединений углерода в почвах. В эродированной и намытой почвах органические соединения минерализовались вдвое быстрее, чем в незэродированной почве. Содержание активного органического вещества в незэродированной почве составило 872 мг/кг, среднеэродированной – 839, сильноэродированной – 813 и в намы-

той – 990 мг/кг. Наиболее высокая минерализационная способность с относительным содержанием легкоминерализуемой фракции активного органического вещества (29 %) отмечена для намывтой почвы.

Процессы водной эрозии приводят к снижению содержания активного пула органического вещества почвы в 1,04–1,07 раза. В эродированных почвах показатели стабильности органического вещества снижаются на 8–23 %, а содержание  $C_{\text{пл}}$  в сильноэродированной почве по сравнению с незэродированной увеличивается на 35 мг/кг. С увеличением эродированности почвы относительное содержание трудноминерализуемой фракции органического вещества возрастает от 74 до 76 %, содержание легкоминерализуемой фракции снижается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Janzen, H. H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? / H. H. Janzen // Soil. Biol. Biochem. – 2006. – V. 38. – №3. – P. 419–424.
2. Минерализуемость органического вещества и секвестрирующая емкость почв зонального ряда / В. М. Семенов [и др.] // Почвоведение. – 2008. – №7. – С. 1–14.
3. Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change / R. Lal // Geoderma. – 2004. – V. 123. – №1–2. – P. 1–22.
4. Six, J. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and nature grassland soils / J. Six, etc. // Soil. Sci. Soc. 16 Amer. J. – 1998. – V. 62. – P. 1367–1377.
5. Почвы. Определение органического вещества в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26213-91. – Введ. 07.01.93. – Минск : Изд-во стандартов, 1992. – 6 с.
6. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение рН по методу ЦИНАО : ГОСТ 26483-85. – Введ. 07.01.86. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. – 4 с.
7. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО : ГОСТ 26207-91. – Введ. 07.01.93. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1992. – 6 с.
8. Почвы. Методы определения общего азота : ГОСТ 26107-84. – Введ. 07.01.85. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1985. – 6 с.
9. Карягина, Л. А. К методике определения  $CO_2$  в почве газохроматографическим методом / Л. А. Карягина, Н. Е. Воробьева, П. С. Фирсов // Почвоведение и агрохимия : сб. науч. тр. / Белорус. науч.-исслед. ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 1981. – Вып. 17. – С. 156–160.
10. Экспериментальное определение активного органического вещества в некоторых почвах природных и сельскохозяйственных экосистем / В. М. Семенов [и др.] // Почвоведение. – 2006. – № 3. – С. 282–292.
11. Роль растительной биомассы в формировании активного пула органического вещества почвы / В. М. Семенов [и др.] // Почвоведение. – 2004. – № 11. – С. 1350–1359.