

УДК 631.41

## МИНЕРАЛИЗАЦИЯ АКТИВНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА СОВРЕМЕННЫХ И ПОГРЕБЕННЫХ КАШТАНОВЫХ ПОЧВ СУХОСТЕПНОЙ ЗОНЫ

© Т.В. Кузнецова, С.Н. Удальцов, В.А. Демкин

*Ключевые слова:* погребенная почва; активное органическое вещество; минерализация; потенциально-минерализуемый углерод; константа скорости минерализации.

В длительном (150 сут.) инкубационном эксперименте биокинетическим методом оценена минерализационная способность органического вещества современных и погребенных каштановых почв сухостепной зоны Волго-Донского междуречья (Иловлинский р-н Волгоградской обл.). Показано, что интенсивность минерализации активного органического вещества погребенных каштановых почв была сопоставима либо превышала таковую для современных фоновых почв.

Получить представления о направленности и скорости элементарных почвенных процессов, состоянии органического вещества и микробных сообществ в палеопочвах, реконструировать по полученным данным вековую динамику климата помогают сравнительные исследования современных почв и палеопочв – уникальных объектов, скрытых под историческими и археологическими памятниками (курганские могильники, оборонительные валы, поселения) [1–5].

Органическое вещество является важнейшим компонентом почвы, с которым связаны многие ее свойства, сформировавшиеся в результате почвообразования, и который интегрально отражает условия формирования и эволюцию почв [4–6].

Все органическое вещество почвы по скорости деградации подразделяют на активный ( $k > 0,001 \text{ сут.}^{-1}$ ,  $T_{0,5} < 2\text{--}3$  года), медленный ( $k < 0,0002 \text{ сут.}^{-1}$ ,  $T_{0,5} > 10$  лет) и пассивный ( $k < 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ сут.}^{-1}$ ,  $T_{0,5} > 750$  лет) пулы, между которыми происходит обмен соединениями, имеющими промежуточные значения биокинетических параметров [8–11]. В биологическом круговороте участвуют преимущественно лабильные соединения углерода, период полуразложения которых составляет от нескольких суток до двух–трех лет. К активному пулу органического вещества почвы относят такие основные компоненты, как растворимое органическое вещество, микробная биомасса, часть гуминовых веществ.

В современных почвенно-биологических исследованиях широко используется способ оценки биологической активности компонентов органического вещества и вовлеченности углерода во внутрипочвенные циклы по кинетике их минерализации. Биокинетическое фракционирование, в отличие от химического, позволяет получить динамические характеристики органического вещества почвы, определить скорость трансформации доступных микроорганизмам органических компонентов, а также выявить структуру активного органического вещества, что чрезвычайно важно при моделировании потоков углерода в почве и оценке динамики органического вещества [8–11]. Несмотря на большое количество исследований по минерализации органического вещества различных по генезису почв,

оцениваемой с помощью биокинетического метода, в литературе имеется недостаточно информации о структуре активного органического вещества почв сухостепной зоны, а подобные исследования для погребенных почв практически отсутствуют.

*Цель данной работы* – сравнить минерализацию органического вещества современных и погребенных каштановых почв сухостепной зоны Волго-Донского междуречья (Волгоградская обл., Иловлинский р-н), определить скоростные параметры ( $k$ ), характеризующие кинетику постоянно оборачиваемых пулов углерода активного органического вещества, и определить долю этих пулов в составе общего органического углерода.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили каштановые почвы, погребенные под оборонительным валом Анны Иоанновны (сооружен в 1718–1720 гг.), и современные фоновые почвы (залежь, целина). Почвенные образцы были отобраны из горизонтов А1. Почвы имели следующие исходные характеристики: 1) фоновая почва залежи (СП1): рН (H<sub>2</sub>O) – 8,0, С орг – 0,88 %, N общ – 96 мг/100 г, N мин – 0,48 мг/100 г; 2) фоновая целинная почва (СП2): рН (H<sub>2</sub>O) – 7,6, С орг – 1,10 %, N общ – 117 мг/100 г, N мин – 1,01 мг/100 г; 3) погребенная почва (ПП1): рН (H<sub>2</sub>O) – 8,2, С орг – 0,80 %, N общ – 89 мг/100 г, N мин – 0,35 мг/100 г; 4) погребенная почва (ПП2): рН (H<sub>2</sub>O) – 7,5, С орг – 0,69 %, N общ – 80 мг/100 г, N мин – 0,26 мг/100 г.

Минерализацию органического вещества исследуемых почв оценивали в лабораторных условиях с помощью биокинетического метода [8, 9]. Почвенные образцы (в трехкратной повторности) предварительно высушивали при 68 °С в течение 24 ч, затем их влажность доводили до 24 вес. % и инкубировали в стеклянных флаконах в течение 150 сут. при 22 °С. Скорость минерализации органического вещества почвы определяли по выделению диоксида углерода из почвы, концентрацию С-СО<sub>2</sub> измеряли на хроматографе Кристаллюкс-4000М (Россия). Кумулятивные кривые

продуцирования  $C-CO_2$  аппроксимировали уравнениями экспоненциальной регрессии, рассчитывали содержание потенциально-минерализуемого углерода (уравнение 1), содержание углерода различных по минерализуемости фракций активного органического вещества (уравнение 2):

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

$$C_t = C_1 [1 - \exp(-k_1 t)] + C_2 [1 - \exp(-k_2 t)] + C_3 [1 - \exp(-k_3 t)], \quad (2)$$

где  $C_t$  – кумулятивное количество  $C-CO_2$  (мг/100 г), выделившегося при инкубировании за время  $t$  (150 сут.);  $C_{\text{пм}}$  – содержание углерода потенциально-минерализуемого органического вещества;  $C_1, C_2, C_3$  – содержание углерода легко-, умеренно- и трудноминерализуемой фракций активного органического вещества;  $k_0, k_1, k_2, k_3$  – константы скорости минерализации органического вещества (сут.<sup>-1</sup>).

Содержание углерода микробной биомассы рассчитывали по уравнению 3:

$$C_t = 0,45 C_{\text{мб}} [1 - \exp(-kt)] + Vt, \quad (3)$$

где  $C_t$  – кумулятивное количество  $C-CO_2$  (мг/100 г), выделившегося при инкубировании предварительно высушенной почвы за время  $t$  (15 сут.);  $C_{\text{мб}}$  – содержание углерода микробной биомассы (мг С/100 г); 0,45 – доля углерода субстрата, использованного на образо-

вание  $C_{\text{мб}}$ ;  $V$  – константа, характеризующая равновесие между приростом и отмиранием биомассы при полной утилизации начального запаса доступного углеродного субстрата. Используя константу  $V$ , рассчитывали базальное дыхание почвы ( $V / 24$ , мг  $C-CO_2$  в час/100 г).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В первые два дня инкубации скорость продуцирования  $C-CO_2$  современными почвами была значительно выше, чем погребенными, далее (и почти на протяжении всего периода инкубации) интенсивность продуцирования  $C-CO_2$  почвой залежи была значительно выше, чем почвой целины и погребенными почвами (рис. 1). Кумулятивное продуцирование  $C-CO_2$  почвой залежи составило 182,2 мг  $C-CO_2$ /100 г, почвой целины – почти в два раза меньше (рис. 2). Размеры кумулятивного продуцирования  $C-CO_2$  погребенными почвами были сопоставимы с таковыми для фоновой целинной почвы.

Содержание  $C_{\text{пм}}$  в почве дает общее представление о минерализационной способности органического вещества: чем больше доля потенциально-минерализуемого углерода, тем органическое вещество почвы менее устойчиво и более подвержено различным минерализующим воздействиям [9, 12]. Максимальное содержание  $C_{\text{пм}}$  было обнаружено в почве залежи (190 мг/100 г), тогда как обеспеченность потенциально-минерализуемым углеродом почвы целины, имеющей самое высокое содержание  $C_{\text{орг}}$ , была в 1,8 раза ниже (табл. 1).

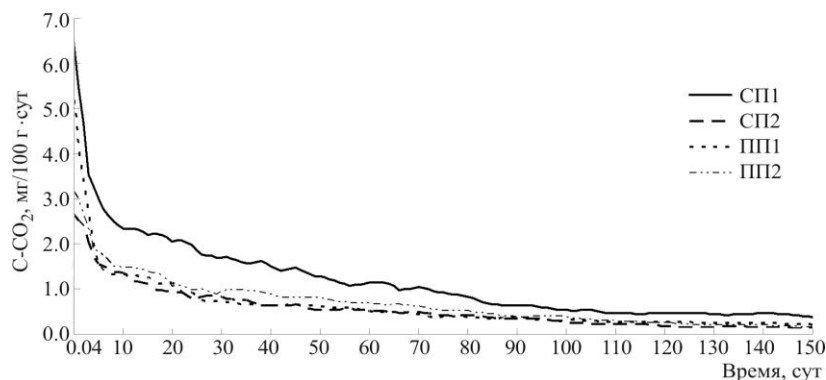


Рис. 1. Интенсивность продуцирования  $C-CO_2$  современными и погребенными каштановыми почвами

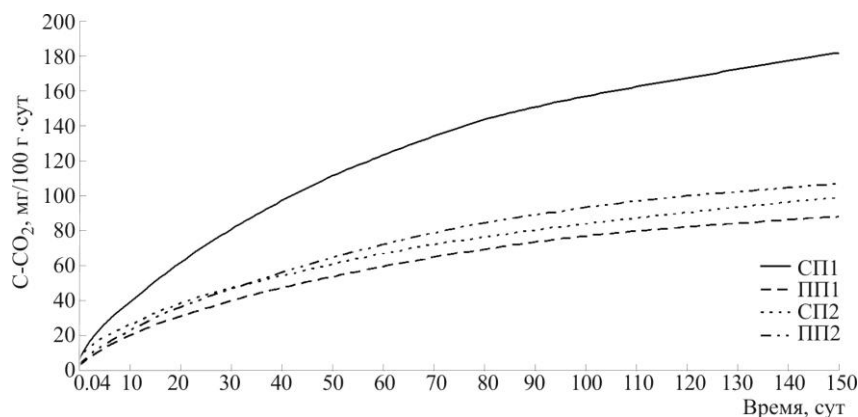


Рис. 2. Кумулятивные кривые продуцирования  $C-CO_2$  современными и погребенными каштановыми почвами

Таблица 1

Потенциальная минерализационная способность органического вещества современных и погребенных каштановых почв сухостепной зоны

Почва	Потенциально-минерализуемый углерод			С орг : С <sub>пм</sub>
	мг/100 г	% от С орг	Константа скорости минерализации (k), сут. <sup>-1</sup>	
Современная почва				
СП1	190	22	0,018	4,6
СП2	99	9	0,020	11,1
Погребенная почва				
ПП1	93	12	0,018	8,6
ПП2	114	17	0,017	6,0

Содержание С<sub>пм</sub> в погребенных почвах было сопоставимо или несколько выше такового для фоновой почвы целины. Доля С<sub>пм</sub> от С орг в современных почвах составляла 9 и 22 %, а в погребенных – 12 и 17 %. Скоростные параметры (k) потенциально-минерализуемого углерода для всех исследуемых почв были сопоставимы. О минерализационной стабильности органического вещества почвы можно судить также и по соотношению С<sub>пм</sub> : С орг – чем шире это соотношение, тем выше устойчивость органического вещества [9, 12]. Наибольшая стабильность органического вещества выявлена для целинной почвы (табл. 1). Органическое вещество почвы залежи по сравнению с погребенными почвами было менее устойчиво к разложению.

Потенциально-минерализуемое органическое вещество почвы неоднородно по своему качественному составу и имеет достаточно широкий спектр соединений с большей и меньшей скоростью минерализации [8, 9, 12]. Аппроксимирование кривых продуцирования С-СО<sub>2</sub> трехкомпонентным уравнением экспоненциальной регрессии (уравнение 3) позволяет выделить и количественно оценить различные по скорости минерализуемости фракции углерода (легко-, умеренно- и трудноминерализуемая) в составе активного пула органического вещества. Содержание фракций С<sub>1</sub> – С<sub>3</sub> дает представление об активности оборачиваемости разных компонентов органического вещества; чем выше скорость оборачиваемости, тем органическое вещество почвы менее стабильно и более подвержено процессам деструкции [9, 12]. Структура активного органического вещества исследуемых почв была представлена легко- и трудноминерализуемыми фракциями, тогда как фракция умеренноминерализуемого углерода ни в палеопочвах, ни в их современных аналогах не была обнаружена (табл. 2).

Доля фракции С<sub>1</sub> от С орг в современных почвах составляла 1,6 %, а в погребенных – 1,2 %, доля фракции С<sub>3</sub> от С орг в фоновых почвах составляла 9 и 21 %, в погребенных – 11 и 16 %.

Микробная биомасса как активный компонент органического вещества почвы наиболее чувствительна к факторам окружающей среды. В современных почвах содержание С<sub>мб</sub> было в 2,1 и 1,7 раза выше, чем в погребенных (табл. 3). Базальное дыхание, рассчитанное по скорости продукции С-СО<sub>2</sub> при равновесии между отмиранием и приростом биомассы, было выше в со-

временной почве залежи. Базальное дыхание остальных исследуемых почв было одинаковым.

Показателем устойчивости микробного сообщества почвы может служить микробный метаболический коэффициент (qCO<sub>2</sub>) – отношение скорости базального дыхания микроорганизмов к их биомассе [13]. Полагается, что чем ниже величина метаболического коэффициента, тем почвенная система более устойчива к различным воздействиям [14–15]. Для погребенных почв величина qCO<sub>2</sub> была выше, чем для их современных аналогов (табл. 3), вероятно, лимитирующими факторами для развития микроорганизмов в погребенных почвах были недостаток свежего легкодоступного органического субстрата и минерального азота.

Интенсивность минерализации органического вещества почвы можно оценить по произведению содержания углерода в соответствующем пуле и константы минерализации этого пула (k) [12]. В почве залежи интенсивность минерализации потенциально-минерализуемого углерода была самой высокой (табл. 4), а интенсивность минерализации С<sub>пм</sub> в фоновой целинной почве и погребенных почвах была сопоставима. Интенсивность минерализации углерода легкоминерализуемой фракции в современных почвах была в 1,2 и 4,4 раза выше, чем в погребенных. Фракция С<sub>3</sub> углерода в современной почве залежного участка была более подвержена минерализационным воздействиям, а в фоновой почве целины данная фракция была более устойчива к минерализации. Интенсивность минерализации трудноминерализуемой фракции активного органического вещества погребенных почв была сопоставима или выше таковой для целинной почвы.

Таблица 2

Структура активного пула органического вещества современных и погребенных каштановых почв

Почва	Легкоминерализуемая фракция углерода			Трудноминерализуемая фракция углерода		
	С <sub>1</sub> , мг/100 г	% от С орг	k <sub>1</sub> , сут. <sup>-1</sup>	С <sub>3</sub> , мг/100 г	% от С орг	k <sub>2</sub> , сут. <sup>-1</sup>
Современная почва						
СП1	14,1	1,6	0,942	186	21	0,015
СП2	17,9	1,6	0,338	97	9	0,012
Погребенная почва						
ПП1	9,3	1,2	0,321	91	11	0,014
ПП2	8,2	1,2	0,603	113	16	0,014

Таблица 3

Содержание углерода микробной биомассы в современных и погребенных каштановых почвах

Почва	С <sub>мб</sub>			Базальное дыхание, мг С-СО <sub>2</sub> в час /100 г почвы	qCO <sub>2</sub> , (мг С-СО <sub>2</sub> в час/г С <sub>мб</sub> )
	мг/100 г	% от С орг	k, сут. <sup>-1</sup>		
Современная почва					
СП1	31,2	3,5	1,099	0,10	3,35
СП2	27,3	2,5	1,141	0,06	2,13
Погребенная почва					
ПП1	14,6	1,8	0,790	0,06	3,82
ПП2	16,1	2,3	0,949	0,06	4,03

Таблица 4

Интенсивность минерализации органического вещества современных и погребенных каштановых почв

Почва	Интенсивность минерализации = $S_k$ , мг/100 г сут.		
	$S_{pm}$	$S_1$	$S_3$
Современная почва			
СП1	3,42	13,23	2,76
СП2	1,98	6,04	1,14
Погребенная почва			
ПП1	1,67	2,99	1,25
ПП2	1,94	4,92	1,60

Таким образом, наши исследования показали, что минерализационная способность органического вещества современных и погребенных каштановых почв сухостепной зоны сопоставима либо превышает таковую для современных фоновых почв. Можно полагать, что на момент погребения минерализационные процессы в каштановой почве протекали активнее, чем в современной почве, что позволяет говорить о более влажном и прохладном климате в прошлом. Полученные количественные характеристики и кинетические параметры постоянно оборачиваемых углеродных пулов активного органического вещества палеопочв могут быть использованы при оценке и прогнозировании состояния органического вещества почв в условиях аридизации в связи с глобальными изменениями климата.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин В.А., Демкина Т.С., Алексеев А.О., Хомутова Т.Э., Золотарева Б.Н., Каширская Н.Н., Удальцов С.Н., Алексеева Т.В., Борисов А.В., Демкина Е.В., Журавлев А.Н. Палеопочвы и климат степей Нижнего Поволжья в I–IV вв. н. э. Пушино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2009. 96 с.
2. Демкин В.А., Борисов А.В., Демкина Т.С., Хомутова Т.Э., Золотарева Б.Н., Каширская Н.Н., Удальцов С.Н., Ельцов М.В. Волго-Донские степи в древности и средневековье (по материалам почвенно-археологических исследований). Пушино: SYNCHRO-BOOK, 2010. 120 с.
3. Дергачева М.И., Васильева Д.И. Реконструкция природных условий в степной зоне Самарского Поволжья в позднем бронзовом веке (по данным изучения гумуса погребенных почв) // Вопросы археологии Поволжья. Самара, 2003. Вып. 3. С. 316–323.
4. Иванов И.В., Табанакова Е.Д. Изменения мощности гумусового горизонта и эволюция черноземов Восточной Европы в голоцене (механизмы, причины, закономерности) // Почвоведение. 2003. № 9. С. 1029–1042.
5. Кудряков В.Н., Демкин В.А., Комаров А.С. Природная антропогенная эволюция почв, круговорот углерода в ландшафтах в связи с

- изменениями климата и катастрофическими явлениями // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. М.: ИФЗ РАН. 2008. Т. 4. С. 13–35.
6. Добровольский Г.В., Ковалева Н.О. Информационная функция почв в биосфере // Роль почв в биосфере. Тр. Ин-та экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. М.: МАКС Пресс, 2010. Вып. 10. С. 7–24.
  7. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Розанова М.С. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // Почвоведение. 2004. № 8. С. 918–926.
  8. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В. Структурно-функциональное состояние органического вещества почвы // Почвенные процессы и пространственно-временная организация почв / отв. ред. В.Н. Кудряков; Ин-т физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН. М.: Наука, 2006. С. 230–247.
  9. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и секвестрирующая емкость почв зонального ряда // Почвоведение. 2008. № 7. С. 819–832.
  10. Paul E.A., Collins H.P., Leavitt S.W. Dynamics of resistant soil carbon of Midwestern agricultural soils measured by naturally occurring  $^{14}C$  abundance // Geoderma. 2001. V. 104. P. 239–256.
  11. Paul E.A., Morris S.J., Conant R.T., Planie A.F. Does the Acid Hydrolysis–Incubation Method Measure Meaningful Soil Organic Carbon Pools? // Soil Sci. Soc. Am. J. 2006. V. 70. P. 1023–1035.
  12. Kadono A., Funakawa S., Kosaki T. Factors controlling potentially mineralizable and recalcitrant soil organic matter in humid Asia // Soil Sci. Plant Nutr. 2009. V. 55. № 2. P. 243–251.
  13. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // Soil Biol. Biochem. 1978. V. 10. P. 215–221.
  14. Wardle D.A., Ghani A. A critique of the microbial metabolic quotient ( $qCO_2$ ) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development // Soil Biol. Biochem. 1995. V. 27. № 12. P. 1601–1610.
  15. Wardle D.A., Parkinson D. Relative importance of the effect 2,4-D, glyphosate, and environmental variables on the soil microbial biomass // Plant and Soil. 1991. V. 34. P. 209–219.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН, грантов Ведущей научной школы (НШ-6620.2012.4) и Российского фонда фундаментальных исследований (12-04-00385-а).

Поступила в редакцию 15 сентября 2012 г.

Kuznetsova T.V., Udaltsov S.N., Demkin V.A. ACTIVE ORGANIC MATTER MINERALIZATION IN MODERN AND BURIED CHESTNUT SOILS OF DRY STEPPE ZONE

The susceptibility of soil organic matter to mineralization in the modern and buried chestnut soils of the dry steppe zone of the Volga-Don interfluvium (Iovlinskiy district, Volgograd region) in a 150 day-long incubation experiment was estimated by the using of biokinetic method. It was shown that the intensity of active organic matter mineralization in the buried chestnut soils is comparable with the intensity of mineralization in the modern soils or exceeds it.

*Key words:* buried soils; active organic matter; mineralization; potentially mineralizable carbon; constants of organic matter mineralization.