——— ФИЗИКА ПОЧВ ——

УДК 631.417.2

# ВЗАИМОСВЯЗЬ РАЗМЕРА АГРЕГАТОВ, СОДЕРЖАНИЯ ДИСПЕРСНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И РАЗЛОЖЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ В ПОЧВЕ

© 2020 г. В. М. Семенов<sup>*a*, \*</sup>, Т. Н. Лебедева<sup>*a*</sup>, Н. Б. Паутова<sup>*a*</sup>, Д. П. Хромычкина<sup>*a*</sup>, И. В. Ковалев<sup>*b*</sup>, Н. О. Ковалева<sup>*b*</sup>

<sup>а</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, 2, Пущино Московской области, 142290 Россия <sup>b</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия \*e-mail: v.m.semenov@mail.ru Поступила в редакцию 15.05.2019 г. После доработки 12.08.2019 г. Принята к публикации 27.10.2019 г.

Исследовали распределение общего ( $C_{opr}$ ), дисперсного органического вещества ( $C_{POM}$ ) и потенциально-минерализуемого органического вещества ( $C_0$ ) в мега- (10–5, 5–2 мм), макро- (2–0.25 мм) и микроагрегатах (<0.25 мм), выделенных сухим просеиванием серой и агросерой почв (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)) разного землепользования. Наибольшее количество  $C_{opr}$  в почве под лесом и лугом было в мегаагрегатах размером 5–2 мм (43 и 37% от целого образца почвы), а в пахотной почве — в макроагрегатах (45%). В необрабатываемой почве дисперсное органическое вещество (POM) аккумулировалось преимущественно в мегаагрегатах (65–72% от С<sub>POM</sub> в целом образце), а в пахотной почве распределялось в равной мере в мегаагрегатах и макроагрегатах (46–45%). Тонкая (0.25–0.05 мм) субфракция С<sub>POM</sub> в необрабатываемой и пахотной почве содержала соответственно в 1.3 и 2.3 раза больше углерода, чем грубая (2–0.25 мм) субфракция С<sub>POM</sub>. Содержание C<sub>0</sub> в агрегатах коррелировало с С<sub>POM</sub> и с С<sub>орг</sub>. Разложение растительных остатков с широким отношением С : N в почве увеличивалось по мере уменьшения размера агрегатов. Размера агрегатов не влиял на разложение растительных остатков с узким отношением С : N. Влияние размера агрегатов на скорость разложения проявлялось преимущественно на ранней стадии трансформации растительных остатков.

*Ключевые слова:* органический углерод, дисперсное органическое вещество, потенциально-минерализуемый пул, минерализация, физическое фракционирование **DOI:** 10.31857/S0032180X20040139

#### введение

Почва представляет собой гетерогенную, динамичную и биологически активную агломерацию с трехмерной "архитектурой", которая создается совокупностью агрегатов, пронизанных системой пор [21, 33, 41, 44, 48, 49]. Агрегатами называют природные органо-минеральные образования, формирующиеся в результате группирования и взаимодействия минеральных частиц с органическими и неорганическими веществами с участием агрегирующих агентов [2, 33]. Почвенные агрегаты различаются по форме и размеру, доминирующему механизму агрегации, величине удельной поверхности, сорбционно-десорбционной способности, объему порового пространства, соотношению макро-, мезо-, микро- и ультрамикропор, содержанию и качеству органического вещества [1, 3, 4, 7, 8, 10, 14–18, 21, 38, 48, 49].

По размеру агрегаты традиционно подразделяются на микроагрегаты (<0.25 мм) и макроагрегаты (>0.25 мм) [33, 48]. В исследовательских целях структурные отдельности размером 10-2 мм обозначаются как мегаагрегаты [4, 29, 36]. Формирование микрогрегатов осуществляется четырьмя группами процессов: биологическими (заселение и колонизация микроорганизмов, биодеградация и потребление), биофизическими (биотурбация, биосмешивание, расширение пор, биотранспорт и биотранслокация), физическими (замораживаниеоттаивание, высушивание-увлажнение, сжатиенабухание, капиллярные явления, адвекция, диффузия, окклюзия, инкапсуляция, цементация) и химическими (адсорбция, осаждение, окисление, восстановление, комплексация, включая обмен лигандами) [1, 2, 39, 49-51]. Считается, что процессы и взаимодействия, которые стабилизируют микроагрегаты, отличаются от таковых, стабилизирующих макроагрегаты [49], а среднее время существования органического вещества в макроагрегатах короче, чем в микроагрегатах [30, 31].

Органическое вещество выполняет двоякую роль в формировании и стабилизации почвенных агрегатов. Гумифицированное органическое вещество действует как агрегирующий материал при формировании микроагрегатов вокруг органо-минеральных ядер и соединении микроагрегатов в макроагрегаты [1, 16, 48]. Свежие растительные остатки и образовавшиеся при их разложении твердые дискретные частицы, относящиеся к фракции дисперсного органического вещества (particulate organic matter (POM)), становятся основой макроагрегатов, внутри которых, при дальнейшем разложении окклюдированного РОМ и распаде макроагрегатов образуются микроагрегаты [41-43]. Частицы РОМ создают повышенный уровень содержания Соорг в макроагрегатах по сравнению с микроагрегатами [23], обильно колонизируются микроорганизмами [29, 45], высвобождаемые из РОМ растворимые соединения перемещаются во внутриагрегатное поровое пространство, поступают в микроагрегаты, обогащая их углеродом [46]. Соотношение тонкой (0.25–0.053 мм) и грубой (2-0.25 мм) субфракций РОМ в макроагрегатах может быть индикатором оборота макроагрегатов и стабилизации Сорг в почве: чем шире это отношение, тем больше возраст макроагрегатов [42, 43].

Органическое вещество, которое по качеству и доступности микроорганизмам может быть минерализовано до диоксида углерода, называется потенциально-минерализуемым. Разные по размеру классы агрегатов, выделенные сухим просеиванием, отличаются по содержанию углерода потенциально-минерализуемого органического вещества вследствие различий в качестве и защищенности органического вещества в крупных и мелких отдельностях [8, 10, 20, 27, 35, 36, 47]. В свою очередь разрушение структуры сопровождается краткосрочной дополнительной минерализацией внутриагрегатного органического вещества [32, 47], но в долговременном тренде дезагрегация ведет к обеднению почвы потенциально-минерализуемым органическим веществом [9]. Непосредственным источником потенциально-минерализуемого органического вещества являются твердые дискретные частицы РОМ [11]. Можно предположить, что повышенное содержание потенциально-минерализуемого органического вещества будет свойственно агрегатам, насыщенным РОМ.

Поступление свежего органического материала – непременное условие образования агрегатов, причем разлагаемое органическое вещество является более эффективным агрегатообразующим

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 4 2020

агентом, чем устойчивые к разложению материалы [2, 19]. Разложение органического вещества в почве осуществляется лишь в том случае, если в одном и том же месте и в то же самое время присутствуют водная пленка, активные ферменты, доступный и восприимчивый к ферментам субстрат, а также благоприятные условия температуры, аэрации и рН среды [24, 37]. Отклонение от нормы одного из этих факторов может быть причиной замедления разложения, независимо от благоприятности других факторов. Наличие прямого контакта между почвой и свежими растительными остатками способствует улучшению позиционной доступности субстратов, становясь важной предпосылкой для разложения органического вещества как опада, так и самой почвы [26, 36]. Однако механизмы влияния размера почвенных агрегатов на разложение растительных остатков остаются не совсем понятными.

Цель работы — показать распределение дисперсного органического вещества (РОМ) между разными по размеру классами агрегатов в серой и в агросерой почвах, определить соотношение грубой, средней и тонкой субфракций в составе РОМ, сравнить степень разложения растительных остатков, распределенных среди мега-, макро- и микроагрегатов.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Отбор почвенных образцов и выделение воздушно-сухих агрегатов. Исследования проводили с образцами серой и агросерой почв (Luvic Retic Greyzemic Phaeozems (Loamic)), отобранными на территории мелколиственного леса (54°8341' N, 37°5729' Е), некосимого луга (54°8335' N, 37°5760' Е) и под посевом ячменя (54°8240' N, 37°5641' E). В трех точках каждого из участков на расстоянии около 5 м друг от друга в верхнем 2-20 см слое почвы вырезали по три монолита с ненарушенной структурой массой около 2 кг. Отобранные монолиты подсушивали на открытом воздухе, аккуратно разминали руками на комки и сыпучие частицы, после чего пропускали всю массу почвы через сито с диаметром отверстий 10 мм, удаляя видимые фрагменты растительных остатков. При дальнейшем высушивании образцы почвы несколько раз последовательно просеивали через сита с диаметрами отверстий 5, 2 и 0.25 мм, отделяя крупные и мелкие мегаагрегаты (10-5 и 5-2 мм), макроагрегаты (2-0.25 мм) и микроагрегаты (<0.25 мм). После взвешивания каждой выделенной фракции определяли долю агрегатов разного размера в общей массе почвенных образцов. Контролем были цельные образцы почвы с тех же участков без разделения на структурно-агрегатные фракции.

Определение дисперсного органического вещества и субфракций РОМ. Для выделения РОМ используются образцы почвы с размером частиц <2 мм [22]. Поэтому в нашем исследовании мегаагрегаты размером 10-5 и 5-2 мм предварительно размельчали до частиц меньше 2 мм, а образцы агрегатов 2-0.25 и <0.25 мм анализировали в ненарушенном состоянии. Навески агрегатов разного размера массой 10 г диспергировали в 30 мл 0.5%-ного раствора гексаметафосфата натрия  $(Na_6P_6O_{18})$  на шейкере в течение 15 ч при скорости 180 об./мин. Полученную суспензию пропускали через сито с диаметром отверстий 0.05 мм. Остаток на сите несколько раз промывали дистиллированной водой до получения прозрачной промывной жилкости. лалее сушили в течение часа при 40°С, после чего количественно переносили в емкость для высушивания при 65°С в течение суток. В каждом анализируемом образце почвы измеряли массу фракции в трех повторностях, содержание углерода во фракции РОМ (Сром) в процентах от массы фракции и массы почвы.

Субфракции РОМ выделяли из цельных образцов почвы леса, луга и пашни без предварительного разделения на агрегаты разных по размеру классов. Для этого полученную при диспергировании гексаметафосфатом натрия почвенную суспензию последовательно пропускали через сита с диаметром отверстий 1, 0.25 и 0.05 мм, получая грубую (2–1 мм), среднюю (1–0.25 мм) и тонкую (0.25– 0.05 мм) субфракции РОМ. Так же, как для цельной фракции РОМ, субфракции промывали дистиллированной водой, высушивали, учитывали массу субфракций и измеряли в них С<sub>РОМ</sub>.

Исследование разложения растительных остатков, смешанных с агрегатами разного размера. Образцы растительных остатков предварительно высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 65°С и измельчали до частиц 10-2 мм. Опавшие листья осины содержали 42.9% Сорг с соотношением C : N, равном 46.4, опавшие тонкие ветви деревьев - 46.5% и 63.1 соответственно, тонкие корни деревьев – 44.0% и 82.7, надземная масса клевера – 40.9% и 16.1, корни клевера – 37.4% и 12.4, солома ячменя — 37.7% и 52.1, корни ячменя – 37.0% и 70.3. Навески растительных остатков массой 0.1 г смешивали с 10 г сухих агрегатов разного размера (10-5, 5-2, 2-0.25 и <0.25 мм), выделенными в почве соответствующих угодий, и помещали во флаконы объемом 100 мл. Контролями были варианты с разными по размеру классами агрегатов без добавления свежих растительных остатков. Перед инкубацией добавляли дистиллированную воду до влажности почвы 25 мас. %. Образцы структурно-агрегатных отдельностей почвы с навесками надземной и подземной биомассы растений инкубировались при постоянных условиях температуры (22°С) и влажности (25 мас. %) в течение 276 суток. Повторность – трехкратная.

Измерение концентрации С-СО<sub>2</sub> в газовой фазе инкубируемых образцов в течение первой недели инкубации проводили ежедневно, в последующем - три раза в неделю, в течение второго месяца инкубации – два раза в неделю, начиная с третьего месяца инкубации – один раз в семь или десять суток. За весь период инкубации произведено 43 отбора газовых проб. Концентрацию С-СО<sub>2</sub> определяли на газовом хроматографе (Кристалл Люкс 4000 М). После каждого измерения флаконы проветривали. Скорость потока С-СО2 (мг/100 г в сутки) рассчитывали по разнице концентраций СО<sub>2</sub> за время экспозиции. Количество продуцируемого растительными остатками С-СО2 устанавливали путем вычета С-СО2, выделившегося из почвы без добавления остатков. Кумулятивную величину продуцирования С-СО<sub>2</sub> (мг/100 г) получали прибавлением количества С-СО2 в каждый срок измерения к сумме за предыдущие сроки.

Константу скорости разложения органического вещества растительных остатков в разные периоды инкубации рассчитывали по формуле:

$$k = -[\ln(C_{t2}) - \ln(C_{t1})]/t, \qquad (1)$$

где k — константа скорости разложения, сутки<sup>-1</sup>; С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>— содержание углерода (С<sub>орг</sub>) в образце в начале и в конце наблюдений, % от исходного; t — продолжительность разложения, сутки.

Количество углерода потенциально-минерализуемого органического вещества ( $C_0$ ) в агрегатах и растительных остатках рассчитывали по кумулятивному количеству С–СО<sub>2</sub>, используя однокомпонентное уравнение кинетики первого порядка:

$$C_t = C_0 (1 - \exp(-kt)),$$
 (2)

где  $C_t - доля C - CO_2$  (% от  $C_{opr}$  в образце) за время *t*, сутки;  $C_0$  – содержание углерода потенциальноминерализуемого органического вещества, % от  $C_{opr}$  в образце; *k* – константа скорости минерализации, сутки<sup>-1</sup>.

Вычисление  $C_0$  и k проводили методом нелинейной оценки программы Statistica 6.0.

Содержание  $C_{opr}$  и  $N_{obil}$  в целой почве, во фракции РОМ и растительных остатках, растертых до частиц <0.25 мм, определяли с помощью CNHS-анализатора (Leco 932, USA). Исходные данные представлены в виде среднего ± стандартное отклонение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение  $C_{opr}$  в разных по размеру классах агрегатов. В необрабатываемой серой почве под лесом и некосимым лугом преобладала мелкая фракция мегаагрегатов размером 5–2 мм, а в агросерой пахотной почве — макроагрегаты размером 2–0.25 мм (табл. 1). Доля крупных мегаагрегатов

#### ВЗАИМОСВЯЗЬ РАЗМЕРА АГРЕГАТОВ

	Размер агрегатов, мм							
УТОДЬЕ	10-5	5-2	2-0.25	<0.25				
Доля агрегатов, % от массы почвы								
Лес	19	41	26	14				
Луг	23	35 29		13				
Пашня	20	26	42	13				
Содержание С <sub>орг</sub> , % от массы фракции								
Лес	$1.79\pm0.01$	$2.04\pm0.03$	$2.11\pm0.03$	$1.86\pm0.02$				
Луг	$1.50\pm0.02$	$1.66\pm0.03$	$1.75\pm0.05$	$1.59\pm0.01$				
Пашня	$1.33\pm0.03$	$1.48\pm0.04$	$1.56\pm0.04$	$1.41\pm0.02$				
Доля С <sub>орг</sub> во фракциях, % от С <sub>орг</sub> в целом образце почвы								
Лес	18	43	29	13				
Луг	22	37	32	13				
Пашня	18	26	45	12				
Отношение С : N								
Лес	$11.5\pm0.3$	$11.2 \pm 0.2$	$10.7\pm0.4$	$10.1 \pm 0.0$				
Луг	$11.2\pm0.3$	$10.8\pm0.5$	$10.3\pm0.3$	$9.9\pm0.3$				
Пашня	$10.8\pm0.5$	$10.5\pm0.2$	$10.1\pm0.1$	$9.4\pm0.1$				

Таблица 1. Сод	держание о	рганического	углер	ода в	почвенных	агрегатах	разного	разме	ра
----------------	------------	--------------	-------	-------	-----------	-----------	---------	-------	----

Примечание. Содержание С<sub>орг</sub> в цельных образцах почвы под лесом, лугом и пашней 1.93, 1.60 и 1.45% от массы почвы, отношение С : N – 10.7, 10.4 и 10.0 соответственно.

размером 10-5 и микроагрегатов меньше 0.25 мм в почве разных землепользований была примерно одинаковой, составляя 19-23 и 13-14% от массы соответственно. Соотношение мегаагрегатов и макроагрегатов к микроагрегатам в почве под некосимым лугом было примерно таким же, как и под лесом, составляя 4.6 : 2.3 : 1 и 4.4 : 1.9 : 1, тогда как для пахотной почвы свойственно увеличение доли макроагрегатов за счет уменьшения доли мегаагрегатов. Соотношение фракций агрегатов в гумусовых горизонтах зависит от физико-химических свойств почвы и чувствительно к изменению землепользования, эрозии, обработке почвы, поливу, другим факторам и нарушающим воздействиям [2-5, 15, 23, 25, 40].

В агрегатах всех размеров почвы под лесом в среднем содержалось больше  $C_{opr}$ , чем под лугом и пашней в 1.2 и 1.4 раза соответственно. Содержание  $C_{opr}$  в агрегатах разного размера уменьшалось в следующем ряду: макроагрегаты (2–0.25 мм) > мелкие мегаагрегаты (5–2 мм) > микроагрегаты (<0.25 мм) > крупные мегаагрегаты (10–5 мм). Отношение C : N в органическом веществе агрегатов сужалось по мере уменьшения размера агрегатов. Доля агрегатов разного размера в массе почвы трех систем землепользования была более изменчивым показателем, чем содержание  $C_{opr}$  в агрегатах (коэффициенты вариабельности 39–49 и

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 4 2020

6-8% соответственно). Как следствие, основное количество  $C_{opr}$  в почве леса и луга было сосредоточено в самой большой по массе фракции мелких мегаагрегатов размером 5-2 мм, а в пахотной почве — во фракции макроагрегатов размером 2-0.25 мм. В целом, в необрабатываемой почве под лесом и лугом распределение  $C_{opr}$  по трем классам агрегатов подчинялось следующей последовательности: мегаагрегаты > макроагрегаты > микроагрегатов: мегаагрегаты = макроагрегаты > микроагрегаты. Независимо от землепользования в микроагрегатах присутствовало 12-13%  $C_{opr}$  от его количества в цельном образце.

Похожую зависимость наблюдали при исследовании дерново-подзолистой супесчаной почвы: под лесом в мега-, макро- и микроагрегатах аккумулировалось 51, 38 и 11% С<sub>орг</sub> от цельного образца почвы, а под сельскохозяйственными культурами – 38, 37 и 22% [8]. В другом исследовании в мегаагрегатах дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы содержалось 43–90% от всего С<sub>орг</sub> в гумусовом горизонте с уменьшением в ряду пашня > луг > лес и одновременным увеличением доли углерода макро- и микроагрегатов в 3.5-5 и 7–11 раз соответственно [4]. Выявленная убывающая закономерность распределения содержания органического углерода по трем клас-

сам агрегатов (мегаагрегаты > макроагрегаты > > микроагрегаты) согласуется с данными о накоплении лигнина в агрегатах обсуждаемого размерного ряда. Как показано нашими предыдущими исследованиями, во фракциях размером <0.25 мм содержание лигнина было в 10 раз меньше, нежели во фракциях >0.25 мм [28]. При этом максимальное количество лигниновых фенолов было сосредоточено внутри агрегата, где в условиях анаэробной среды минерализация растительных биополимеров заторможена. Однако максимальная степень окисленности фенольных соединений и максимальная степень трансформации биополимеров лигнина наблюдается на поверхности агрегатов большего размера и в наиболее мелких фракциях микроагрегатов. По-видимому, промежуточные нестабильные радикалы инкрустируются глинистыми минералами, способствуя стабилизации органического вещества и образованию агрегатов с высоким содержанием Сорг. В других исследованиях [31] время оборачиваемости органического вещества в макроагрегатах составляло 14 лет, а его состав представлен соединениями типичными для остатков растений и почвенных организмов (углеводы, мономеры лигнина и фенолы, димеры лигнина, липиды, жирные кислоты, стерины, суберин, алифатические и ароматические азотистые соединения). В крупных и мелких микроагрегатах размером 0.25-0.05 и <0.05 мм время оборачиваемости Сорг было более продолжительным – 61 год и 275 лет, соответственно, при этом в органическом веществе мелких микроагрегатов преобладали гумифицированные вещества, а соединения, представляющие растительные и микробные компоненты (димеры лигнина, стерины, суберин и жирные кислоты) отсутствовали.

Таким образом, распределение С<sub>орг</sub> между иерархически организованными по размеру классами агрегатов создает объемно-пространственную компартментность почвенного резервуара органического углерода. Агрегация — один из ключевых механизмов физической стабилизации, а образование и поведение микро- и макроагрегатов неразрывно связано с накоплением, динамикой и сохранностью органического вещества в почве. Меньше сведений о путях формирования, среднем времени существования и функциях мегаагреатов, в составе которых сосредоточено значительное количество органического углерода.

Дисперсное органическое вещество в разных по размеру агрегатах. Ранее показано, что в необрабатываемых и пахотных почвах РОМ представлено от 10 до 48% от всего С<sub>орг</sub>, при этом содержание этой фракции сильно зависит от землепользования, способов обработки почвы и удобрений [11]. Фракция РОМ, выделенная из агрегатов серой почвы разных угодий, была обогащена в 2.3–2.6 раза органическим углеродом (С<sub>РОМ</sub>) по сравнению

с органическим веществом, содержащимся в этих отдельностях (табл. 2). В серой почве леса и луга наиболее обогащенными Сром были мелкие мегаагрегаты 5-2 мм, а в агросерой пахотной почве макроагрегаты 2-0.25 мм. Самое низкое содержание С<sub>РОМ</sub> (3.07-3.32% от массы фракции или 0.39-0.45% от массы почвы) было в микроагрегатах как необрабатываемой, так и пахотной почвы. Содержание Сром в агрегатах четырех размеров было более вариабельным, чем  $C_{opr}$  (12–20 и 6–8% соответственно), но значения  $C_{POM}$  и  $C_{opr}$  достоверно коррелировали между собой (r = 0.599, P = 0.040). В мегаагрегатах, выделенных в почве под лесом и лугом, находилось соответственно 72 и 65% от всего СРОМ в гумусовых горизонтах, при этом самыми насыщенными РОМ были мелкие мегаагрегаты размером 5-2 мм. В пахотной почве вклад мегаагрегатов и макроагрегатов был одинаковым, но фракция макроагрегатов оказалась более насыщенной органическим веществом твердых дискретных частиц. В составе РОМ в почве под лесом, в зависимости от размера агрегатов, находилось 23–32% от валового  $C_{\rm opr}$  в этих отдельностях, а в почве под лугом и пашней – 24–27 и 16–18% соответственно. В других исследованиях распределение РОМ между водоустойчивыми мега-, макро- и микроагрегатами глинистой почвы, выделенными мокрым просеиванием, было относительно равномерным, с небольшим преобладанием в макрои микроагрегатах [23].

Соотношение грубой и тонкой субфракций в составе дисперсного органического вещества. Фракция РОМ представляет собой не гомогенную массу однородного вещества, а включает в себя твердые дискретные частицы разного размера и качества. Традиционно выделяют грубую (2-0.25 мм) и тонкую (0.025–0.053 мм) субфракции РОМ [30, 42, 43]. Грубая субфракция РОМ более подвержена разложению, а тонкая субфракция – стабилизации [30]. Нами были выделены три субфракции РОМ: грубая (2-1 мм), средняя (1-0.25 мм) и тонкая (0.25-0.05 мм). В серой и в агросерой почвах преобладает тонкая субфракция РОМ, при этом доля тонкого РОМ увеличивается в ряду лес-луг-пашня, а среднего и грубого РОМ, наоборот, уменьшается (рис. 1). Грубому РОМ свойственно более высокое содержание  $C_{\rm opr}$  и более широкое отношение C : N, чем среднему и тонкому по размеру РОМ. Различия между субфракциями РОМ по массе были более рельефными, чем по содержанию в них углерода, поэтому самая большая по массе тонкая субфракция содержала от 57 до 71% от всего С<sub>РОМ</sub> в почве, возрастая в ряду угодий лес < < луг < пашня. Вклад средней и грубой субфракций в Сром почвы составлял 21-27 и 9-17% соответственно с другой зависимостью от землепользования: лес≥луг > пашня. При подразделении РОМ на две субфракции (2-0.25 и 0.25-0.053 мм), как

#### ВЗАИМОСВЯЗЬ РАЗМЕРА АГРЕГАТОВ

Vacarya	Размер агрегатов, мм							
угодье	10-5	5-2	2-0.25	<0.25				
Масса фракции РОМ, % от массы агрегатов								
Лес	$13.0 \pm 0.6$	$12.0\pm0.1$	$11.2 \pm 0.9$	$12.7\pm0.3$				
Луг	$10.1\pm1.9$	$9.8\pm0.3$	$10.4\pm0.7$	$11.7\pm0.7$				
Пашня	$6.1 \pm 0.2$	$6.4 \pm 1.0$	$7.0\pm0.4$	$7.2\pm0.8$				
Содержание С <sub>РОМ</sub> , % от массы фракции								
Лес	$4.45\pm0.05$	$5.45\pm0.15$	$4.36\pm0.20$	$3.32\pm0.17$				
Луг	$3.77\pm0.23$	$4.51\pm0.12$	$4.14\pm0.05$	$3.24\pm0.02$				
Пашня	$3.66\pm0.04$	$3.99\pm0.00$	$4.10\pm0.04$	$3.07\pm0.04$				
Отношение С : N во фракции РОМ								
Лес	$14.9\pm0.6$	$15.8\pm0.5$	$14.9\pm0.2$	$12.8\pm0.8$				
Луг	$14.0\pm0.6$	$14.2\pm0.6$	$13.8 \pm 0.1$	$12.7\pm0.7$				
Пашня	$13.0 \pm 0.4$	$14.6\pm0.9$	$13.2\pm0.3$	$12.6\pm0.9$				
Содержание С <sub>РОМ</sub> , % от С <sub>орг</sub> в целых агрегатах								
Лес	32.4	32.1	23.0	22.6				
Луг	25.5	26.7	24.5	23.8				
Пашня	16.8	17.2	18.4	15.6				
Доля $\mathrm{C}_{\mathrm{POM}}$ в агрегатах, $\%$ от $\mathrm{C}_{\mathrm{POM}}$ в целом образце почвы								
Лес	20	52	26	10				
Луг	23	42	31	11				
Пашня	19	27	45	10				

Таблица 2. Содержание углерода дисперсного органического вещества (С<sub>РОМ</sub>) в почвенных агрегатах разного размера

Примечание. Содержание С<sub>РОМ</sub> в цельных образцах почвы под лесом, лугом и пашней 4.33, 3.80 и 3.79% от массы фракции (0.68, 0.41 и 0.23% от массы почвы), отношение С : N – 13.6, 13.6 и 13.2 соответственно.

это предложено в работах [42, 43], соотношение тонкой субфракции к грубой по массе составляло в ряду лес—луг—пашня 1.6, 2.1 и 6.7, а по запасам углерода, соответственно 1.3, 1.3 и 2.3. Приведенные выше данные указывают, что грубая фракция РОМ представлена еще не фрагментированными или частично фрагментированными растительными остатками, а тонкая фракция — разложившимися до отдельных частиц. Таким образом, мегаагрегаты и макроагрегаты представляют собой главный резервуар РОМ, на долю которого приходится значительная часть органического углерода в почве. В свою очередь, РОМ гетерогенно по составу и качеству.

Потенциально-минерализуемое органическое вещество в почвенных агрегатах. Агрегация сочетает в себе многие механизмы физической, химической и биологической стабилизации органического вещества в почве. Агрегированному в мега-, макро- и микроагрегаты и свободному, находящемуся между агрегатами, органическому веществу свойственна разная защищенность и, как следствие, разная доступность для использования почвенными микроорганизмами. Наличие физических барьеров и

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 4 2020

неблагоприятных для микроорганизмов экологических условий в конгломерате частиц и агрегатов вызывает вариабельность в содержании потенциально-минерализуемого органического вещества среди разных по размеру структурно-агрегатных отдельностей почвы [8, 10, 20, 36].

На рис. 2 видно, что низкое содержание потенциально-минерализуемого органического вещества (С<sub>0</sub>) свойственно крупным мегаагрегатам (10-5 мм) и микроагрегатам (<0.25 мм), а высокое – мелким мегаагрегатам (5-2 мм) и макроагрегатам (2-0.25 мм). Вариабельность распределения  $C_0$  по агрегатам была сильнее (14%), чем  $C_{opr}$ (6-8%), но слабее, чем РОМ (12-20%). Самое высокое содержание С<sub>0</sub> в макроагрегатах пахотной почвы было в 1.4 меньше, чем самое низкое его содержание в крупных мегаагрегатах необрабатываемой почвы. По фактическим запасам С<sub>0</sub> агрегаты разных размеров образовывали следующие последовательности: почва под лесом - 5-2 > 2-0.25 > 10-5 > меньше 0.25 мм, пахотная почва – 2-0.25 > 5-2 > 10-5 > меньше 0.25 мм. В целом, основным резервуаром С<sub>0</sub> в необрабатываемой почве являются мегаагрегаты и в меньшей мере —



**Рис. 1.** Распределение органического углерода между крупной 2–1 мм (*1*), средней 1–0.25 мм (*2*) и тонкой 0.25–0.05 мм (*3*) субфракциями дисперсного органического вещества (РОМ).

макроагрегаты (62 и 31% от  $C_0$  в цельном образце соответственно), а в пахотной почве вклад этих классов агрегатов примерно одинаковый (40 и 44% от  $C_0$  в цельном образце). Авторы другого ис-

следования пришли к выводу, что минерализация органического вещества выше в агрегатах более крупного размера (макро- и мегаагрегаты), имеющих низкую структурную стабильность, чем в



**Рис. 2.** Содержание потенциально-минерализуемого органического вещества ( $C_0$ ) в почвенных агрегатах разного размера: 1 - 10-5 мм, 2 - 5-2 мм, 3 - 2-0.25 мм, 4 - <0.25 мм. Содержание  $C_0$  в цельных образцах почвы под лесом и пашней 129 ± 1.4 и 77 ± 0 мг/100 г (0.13 и 0.08% от массы почвы) соответственно.

микроагрегатах [36]. В отличие от этих результатов, минерализация органического вещества была больше в макроагрегатах <2 мм, чем в мегаагрегатах 2—4 и 4—8 мм, благодаря более равномерной влажности и увеличения доступа к субстрату [35] или мало зависела от размера агрегатов, выделенных мокрым просеиванием [34]. Можно заметить, что при одинаковых условиях температуры и влажности, поддерживаемых в инкубационном эксперименте, органическое вещество, содержащееся в разных по размеру агрегатах, мало отличается по минерализационной способности, завися в большей мере от землепользования (рис. 2). Следовательно, различия

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 4 2020



**Рис. 3.** Эффективность разложения остатков древесной растительности (А – листья осины, Б – мелкие ветви деревьев, В – тонкие корни деревьев) среди агрегатов разного размера: 1 - 10 - 5 мм, 2 - 5 - 2 мм, 3 - 2 - 0.25 мм, 4 - < 0.25 мм, 5 -смешанный образец почвы.

между мега-, макро- и микроагрегатами по содержанию С<sub>0</sub> зависят в первую очередь от количества поступающего в агрегаты свежего органического вещества и доли агрегатов в массе почвы. Это предположение хорошо подтверждается корреляцией  $C_0 c C_{opr}$  (r = 0.996,  $P < 10^{-3}$ ) и с  $C_{POM}$  (r = 0.654, P = 0.040) в исследуемых образцах. Изменение доли РОМ, вызванное образованием из разлагающихся растительных остатков, может быть причиной вариабельности содержания C<sub>орг</sub> и C<sub>0</sub> в разных по размеру агрегатах почвы [36]. В инкубационном эксперименте через 60 суток с начала разложения остатков кукурузы в мега-, макро- и микроагрегатах содержалось 46, 14 и 0.3% от внесенного  $C_{opr}$ , через год – 23, 12 и 1.2%, соответственно, а через два года – 11, 12 и 3.8% [30]. Как было показано в этой работе, через 2 месяца опыта выделенные в макроагрегатах легкая фракция органического вещества (LF), грубое и тонкое РОМ были на 24, 16 и 31% представлены углеродом растительных остатков, а через год – на 18, 7 и 28% соответственно. В микроагрегатах легкая фракция через 2 месяца и один год содержала 38 и 10% углерода растительных остатков, а тонкое POM - 27 и 53% соответственно. Таким образом, разложение растительных остатков является одновременно фактором образования почвенных агрегатов и формирования пулов внутриагрегатного и межагрегатного органического вещества.

Разложение растительных остатков, распределенных среди агрегатов разного размера. По теории разложение субстрата происходит в случае достаточной секреции внеклеточных ферментов микроорганизмами, успешной диффузии ферментов к соответствующему органическому веществу и успешной диффузии продуктов распада обратно в клетки микроорганизмов, которые вряд ли будут теми же самыми, кто секретировал фермент [24, 37]. Структурно-агрегатное сложение почвы создает множество физических барьеров для успешной утилизации микроорганизмами органических кластеров. Соотношение мега-, макрои микроагрегатов может быть одним из факторов, влияющих на разложение и включение растительных остатков в состав почвенного органического вещества. Имеются данные, что минерализация остатков канолы и пшеницы в макрои/или микроагрегатах была достоверно выше, чем в мегаагрегатах двух разных почв [36].

В нашем эксперименте за 276 суток инкубации минерализовалось от 20 до 73% углерода, содержащегося в исследуемых растительных остатках (рис. 3 и 4), соответствуя в целом величинам, полученным ранее для этих видов [12]. Размеры минерализации растительных остатков уменьшались в следующей последовательности: корни клевера > надземная масса клевера > солома ячменя > листья осины > корни ячменя > мелкие ветви деревьев > тонкие корни деревьев. Полученный ряд согласуется с содержанием и композиционным составом лигниновых фенолов в этих растительных остатках. В клевере преобладают кумариловые фенолы с наибольшей степенью микробной минерализации, в ячмене – кумариловые и феруловые фенолы с меньшей полверженностью минерализации, а в остатках деревьев – сирингиловые и ванилиновые фенолы наиболее устойчивые к микробному разложению [6].

Новым результатом исследования стал факт разной подверженности растительных остатков разложению в зависимости от размера агрегатов почвы. Разложение растительных остатков с широким отношением С : N (листья осины, мелкие ветви и тонкие корни деревьев, солома и корни ячменя) отчетливо увеличивалось по мере уменьшения размера структурных отдельностей почвы в 1.1–1.5 раза, тогда как разложение листьев и



**Рис. 4.** Эффективность разложения растительных остатков (А – надземная масса клевера, Б – корни клевера, В – солома ячменя, Г – корни ячменя) среди агрегатов разного размера: *1*–10–5 мм, *2*–5–2 мм, *3*–2–0.25 мм, *4*–<0.25 мм, *5*– смешанный образец почвы.

корней клевера, имеющих узкое отношение C: N, не зависело от размера агрегатов. Можно предположить, что влияние размера почвенных частиц на разложение растительных остатков проявляется за счет увеличения доступности микроорганизмам-деструкторам почвенного азота, недостаток которого особенно ощущается при освоении субстратов с широким С : N отношением [13]. Для обогащенных азотом остатков клевера фактор доступности почвенного азота не был лимитирующим и влияние размера агрегатов не проявлялось. Это предположение подтверждается сужением отношения C : N в частицах почвы меньше 0.25 мм по сравнению с крупными отдельностями 10-5 мм, наличием достоверной отрицательной корреляции C : N в агрегатах почвы с минерализацией слаборазлагаемых растительных остатков (r = -0.448, P = 0.047) и отсутствием таковой для сильноразлагаемых остатков клевера. Полученные результаты согласуются с данными о преобладании в мега- (>2 мм) и макроагрегатах (2-0.25 мм) дисперсного органического вещества, представленного полуразложившимися растительными остатками (табл. 2), а также с со-

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 4 2020

держанием лигнина и его окисленных форм внутри и на поверхности крупных агрегатов [28].

Разложение растительных остатков замедлялось в течение инкубации (рис. 5). В течение стартовых десяти суток разложение надземной массы и корней клевера шло со средней ( $k_1 = 0.025 -$ 0.048 сут<sup>-1</sup>) скоростью, листьев осины и соломы ячменя — со средней ( $k_1 = 0.012 - 0.015 \text{ сут}^{-1}$ ) или с медленной ( $k_2 = 0.008 - 0.009$  сут<sup>-1</sup>) скоростью, в зависимости от размера агрегатов, с которыми смешивались образцы. Остальные виды растительных остатков разлагались с медленной скоростью ( $k_2 =$ = 0.003 - 0.006 сут<sup>-1</sup>). Медленная скорость разложения ( $k_2 = 0.001 - 0.007 \text{ сут}^{-1}$ ) была присуща всем растительным остаткам между 10 и 90 сутками инкубации, при этом влияние размера агрегатов на разложение становилось менее отчетливым. На более поздних стадиях инкубации большинство растительных остатков разлагалось с очень медленной ( $k_3 = 0.0006 - 0.0008 \text{ сут}^{-1}$ ) скоростью. Главный недостаток оценки разложения растительных остатков в почве по измерению С-СО2 без использования изотопного метода - это веро-



Рис. 5. Константа скорости разложения растительных остатков среди агрегатов разного размера на протяжении инкубации (в среднем для семи видов растительных остатков): 1-10-5 мм, 2-5-2 мм, 3-2-0.25 мм, 4-<0.25 мм.

ятность получения завышенных величин разложения органических материалов из-за увеличения минерализации в почве нативного органического вещества (прайминг-эффект). Подобное наблюдалось в опыте с растительными остатками, смешанными с мега-, макро- и микроагрегатами [36]. В предыдущей нашей работе разложение растительных остатков, инкубируемых с почвой, было выше, чем с вермикулитом лишь на 0–6% от внесенного [12].

Таким образом, качество растительных остатков более значимый фактор разложения, чем агрегатный состав почвы. Влияние размера агрегатов на разложение растительных остатков проявляется косвенно и в том случае, если активность микроорганизмов лимитируется физическими барьерами и низким содержанием азота в разлагаемом материале. Замедление минерализации растительных остатков в почве с доминированием мегаагрегатов способствует накоплению органического вещества в виде твердых дискретных частиц, образующих фракцию дисперсного органического вещества.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соотношение агрегатов разных по размеру классов является одним из значимых факторов формирования свойств и режимов почвы, отражаясь на качественном составе почвенного органического вещества посредством влияния на процессы его разложения и стабилизации. Мегаагрегаты — доминирующая фракция в гумусовом горизонте необрабатываемой серой почве под лесом и некосимым лугом, макроагрегаты — в агросерой пахотной почве. Основное количество С<sub>орг</sub> в почве под лесом и лугом было сосредоточено в самой большой по массе фракции мелких мегааг-

регатов размером 5-2 мм, а в пахотной почве — во фракции макроагрегатов размером 2-0.25 мм. Мегаагрегаты являются главным хранилищем С<sub>орг</sub> в необрабатываемой почве, в пахотной почве возрастает вклад макроагрегатов. Запасы С<sub>орг</sub> в микроагрегатах не зависели от землепользования и составляли 12-13% от С<sub>орг</sub> в цельном образце.

Фракция РОМ, представленная твердыми дискретными частицами растительных остатков, является количественно значимым компонентом почвенного органического вещества. В составе РОМ в почве под лесом, в зависимости от размера агрегатов, находилось 23-32% от валового  $C_{opr}$  в этих отдельностях, а в почве под лугом и пашней – 24-27 и 16–18% соответственно. Основные запасы РОМ в почве под лесом и лугом сосредоточены в мегаагрегатах (72 и 65% от всего  $C_{POM}$  в гумусовых горизонтах), а в пахотной почве вклад мегаагрегатов и макроагрегатов был одинаковым.

Фракция РОМ не однородна, а состоит из твердых дискретных частиц разного размера и качества. В почве под лесом, лугом и на пашне соотношение тонкой субфракции (0.25–0.05 мм) к грубой (2–0.25 мм) составляло по массе 1.6, 2.1 и 6.7, а по запасам углерода, соответственно 1.3, 1.3 и 2.3.

Агрегированному в мега-, макро- и микроагрегаты и свободному, находящемуся между агрегатами, органическому веществу свойственна разная защищенность и, как следствие, разная способность к минерализации. Основные запасы потенциально-минерализуемого органического вещества ( $C_0$ ) в необрабатываемой почве сосредоточены в мегаагрегатах и в меньшей мере в макроагрегатах (62 и 31% от  $C_0$  в цельном образце соответственно), а в пахотной почве вклад этих классов агрегатов примерно одинаковый (40 и 44% от  $C_0$  в цельном образце). Содержание  $C_0$  в агрегатах коррелировало с  $C_{POM}$  и с  $C_{opr}$ .

Разложение растительных остатков с широким отношением C : N (листья осины, мелкие ветви и тонкие корни деревьев, солома и корни ячменя) увеличивалось по мере уменьшения размера структурных отдельностей почвы, тогда как разложение листьев и корней клевера, имеющих узкое отношение C : N, не зависело от размера агрегатов. Влияние размера агрегатов на скорость разложения проявлялось преимущественно на ранней стадии трансформации растительных остатков.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование влияния размеров почвенных агрегатов на разложение растительных остатков и распределение дисперсного органического вещества в почве проведено при поддержке РФФИ (№ 17-04-00707-а). Данные по соотношению субфракций в дисперсном органическом веществе получены при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-14-01120). Вопросы распределения потенциально-минерализуемого органического вещества среди агрегатов разного размера рассмотрены в рамках темы Государственного задания № 0191-2019-0045.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Артемьева З.С. Органическое вещество и гранулометрическая система почвы. М.: ГЕОС, 2010. 240 с.
- 2. Воронин А.Д. Основы физики почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
- 3. Дубовик Е.В., Дубовик Д.В. Взаимосвязь содержания углерода органических соединений и структурного состояния чернозема типичного // Почвоведение. 2019. № 2. С. 171–183. https://doi.org/10.1134/S0032180X19020047
- Ерохова А.А., Макаров М.И., Моргун Е.Г., Рыжова И.М. Изменение состава органического вещества дерново-подзолистых почв в результате естественного восстановления леса на пашне // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1308–1314. https://doi.org/10.7868/S0032180X14110045
- 5. Зайдельман Ф.Р., Ковалев И.В. Изменение физических свойств светло-серых гидроморфных почв под влиянием оглеения и разных видов дренажа // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 1994. № 3. С. 30-41.
- Ковалева Н.О., Ковалев И.В. Биотрансформация лигнина в дневных и погребенных почвах горных ландшафтов // Почвоведение. 2009. № 11. С. 1362– 1373.
- 7. Когут Б.М., Артемьева З.С., Кириллова Н.П., Яшин М.А., Сошникова Е.И. Компонентный состав органического вещества воздушно-сухих и водоустойчивых макроагрегатов 2–1 мм типичного чернозема в условиях контрастного землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 161–170. https://doi.org/10.1134/S0032180X19020084
- 8. Когут Б.М., Яшин М.А., Семенов В.М., Авдеева Т.Н., Маркина Л.Г., Лукин С.М., Тарасов С.И. Распределение трансформированного органического вещества в структурных отдельностях дерново-подзолистой супесчаной почвы // Почвоведение. 2016. № 1. С. 52–64.

https://doi.org/10.7868/S0032180X1601007X

9. Семенов В.М., Журавлев Н.С., Тулина А.С. Минерализация органического вещества в серой лесной почве и типичном черноземе, обесструктуренных физическими воздействиями // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1254–1266. https://doi.org/10.7668/S0022180X1510010X

https://doi.org/10.7868/S0032180X1510010X

 Семенов В.М., Иванникова Л.А., Семенова Н.А., Ходжаева А.К., Удальцов С.Н. Минерализация органического вещества в разных по размеру агрегатных фракциях почвы // Почвоведение. 2010. № 2. С. 157–165. 11. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Паутова Н.Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых и пахотных почвах // Почвоведение. 2019. № 4. С. 440-450.

https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130

- Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1172–1184. https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113
- 13. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Тулина А.С., Кудеяров В.Н. Разложение и минерализация фитомассы в серой лесной почве: кинетический анализ // Почвоведение. 2001. № 5. С. 569–577.
- 14. Филиппова О.И., Холодов В.А., Сафронова Н.А., Юдина А.В., Куликова Н.А. Микроагрегатный, гранулометрический и агрегатный состав гумусовых горизонтов ряда почв европейской России // Почвоведение. 2019. № 3. С. 335–347. https://doi.org/10.1134/S0032180X19030031
- 15. Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Фарходов Ю.Р., Белобров В.П., Юдин С.А., Айдиев А.Я., Лазарев В.И., Фрид А.С. Изменение соотношения фракций агрегатов в гумусовых горизонтах черноземов в различных условиях землепользования // Почвоведение. 2019. № 2. С. 184–193. https://doi.org/10.1134/S0032180X19020060
- Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53-61.
- 17. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Органическое вещество и структура почвы: учение В.Р. Вильямса и современность // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2014. № 1. С. 42–51.
- Шеин Е.В., Харитонова Г.В., Милановский Е.Ю., Дембовецкий А.В., Федотова А.В., Коновалова Н.С., Сиротский С.Е., Первова Н.Е. Агрегатообразование в засоленных почвах ландшафтов бугров Бэра // Почвоведение. 2013. № 4. С. 442–453. https://doi.org/10.7868/S0032180X13040126
- 19. Abiven S., Menasseri S., Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability A literature analysis // Soil Biol. Biochem. 2009. V. 41. № 1. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.09.015
- Bimüller C., Kreyling O., Kölbl A., von Lützow M., Kögel-Knabner I. Carbon and nitrogen mineralization in hierarchically structured aggregates of different size // Soil Tillage Res. 2016. V. 160. P. 23–33. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.12.011
- 21. *Bronick C.J., Lal R.* Soil structure and management: a review // Geoderma. 2005. V. 124. № 1–2. P. 3–22. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005
- 22. Cambardella C.A., Elliott E.T. Particulate Soil Organic Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence // Soil Sci. Soc. Am. J. 1992. V. 56. № 3. P. 777–783.

https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x

23. Devine S., Markewitz D., Hendrix P., Coleman D. Soil Aggregates and Associated Organic Matter under Con-

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 4 2020

ventional Tillage, No-Tillage, and Forest Succession after Three Decades // PLoS ONE. 2014. V. 91. P. e84988.

https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084988

- 24. *Ekschmitt K., Liu M., Vetter S., Fox O., Wolters V.* Strategies used by soil biota to overcome soil organic matter stability why is dead organic matter left over in the soil? // Geoderma. 2005. V. 128. № 1–2. P. 167–176. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.024
- 25. Fernández R., Quiroga A., Zorati C., Noellemeyer E. Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage // Soil Tillage Res. 2010. V. 109. № 2. P. 103–109. https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.002
- 26. Jha P., Garg N., Lakaria B.L., Biswas A.K., Rao A.S. Soil and residue carbon mineralization as affected by soil aggregate size // Soil Tillage Res. 2012. V. 121. P. 57–62.

https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.018

- Jia J., Yu D., Zhou W., Zhou L., Bao Y., Meng Y., Dai L. Variations of soil aggregates and soil organic carbon mineralization across forest types on the northern slope of Changbai Mountain // Acta Ecologica Sinica. 2015. V. 35. № 2. P. 1–7. https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2014.03.008
- Kovalev I.V., Kovaleva N.O. The role of lignin phenols in organic-mineral interactions in soils // 19th International Conference of Humus Substances and their Contribution to the Climate Change Mitigation. Sofia: Bulgarian Humic Substances Society, 2018. P. 119–122.
- Li F, Xue C., Qiu P, Liu Y, Shi J., Shen B., Yang X., Shen Q. Soil aggregate size mediates the responses of microbial communities to crop rotation // Eur. J. Soil Biology. 2018. V. 88. P. 48–56. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.06.004
- Li S., Gu X., Zhuang J., An T., Pei J., Xie H., Li H., Fu S., Wang J. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility // Soil Tillage Res. 2016. V. 155. P. 199–206.

https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.009

 Monreal C.M., Schulten H.-R., Kodama H. Age, turnover and molecular diversity of soil organic matter in aggregates of a Gleysol // Can. J. Soil Sci. 1997. V. 77. P. 379–388.

https://doi.org/10.4141/S95-064

- Mueller C.W., Schlund S., Prietzel J., Kögel-Knabner I., Gutsch M. Soil aggregate destruction by ultrasonication increases soil organic matter mineralization and mobility // Soil Sci. Soc. Am. J. 2012. V. 76. P. 1634–1643. https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0186
- Oades J.M., Waters A.G. Aggregate hierarchy in soils // Aust. J. Soil Res. 1991. V. 29. P. 815–828. https://doi.org/10.1071/SR9910815
- Rabbi S.M.F., Wilson B.R., Lockwood P.V., Danie H., Young I.M. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses // Geoderma. 2014. V. 216. P. 10–18. https://doi.org/10.1016/i.geoderma.2012.10.022

https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.023

35. Reeves S.H., Somasundaram J., Wang W.J., Heenan M.A., Finn D., Dalal R.C. Effect of soil aggregate size and long-term contrasting tillage, stubble and nitrogen management regimes on CO<sub>2</sub> fluxes from a Vertisol // Geoderma. 2019. V. 337. P. 1086–1096. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.022

- Sarker J.R., Singh B.P., Cowie A.L., Fang Y., Collins D., Dougherty W.J., Singh B.K. Carbon and nutrient mineralisation dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues // Soil Biol. Biochem. 2018. V. 116. P. 22–38. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.030
- Schimel J.P., Weintraub M.N. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model // Soil Biol. Biochem. 2003. V. 35. P. 549–563. https://doi.org/10.1016/S0038-07170300015-4
- 38. *Shein E., Milanovskiy E.* Soil structure formation: role of the soil amphiphilic organic matter // Biogeosystem Technique. 2014. V. 2. № 2. P. 182–190. https://doi.org/10.13187/bgt.2014.2.182
- 39. Shein E.V., Kharitonova G.V., Milanovsky E.Y. Aggregation of natural disperse formations: Value of organic matter, soluble salts and diatoms // Biogeosystem Technique. 2016. V. 7. № 1. P. 77–86. https://doi.org/0.13187/bgt.2016.7.77
- 40. *Šimanský V., Bajčan D.* Stability of soil aggregates and their ability of carbon sequestration // Soil Water Res. 2014. V. 9. № 3. P. 111–118. https://doi.org/10.17221/106/2013-SWR
- Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between microaggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil Tillage Res. 2004. V. 79. P. 7–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008
- 42. Six J., Elliott E.T., Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32. № 14. P. 2099–2103. https://doi.org/10.1016/S0038-07170000179-6
- 43. *Six J., Paustian K.* Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool // Soil Biol. Biochem. 2014. V. 68. P. A4-A9. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014
- 44. Six J., Paustian K., Elliott E. T., Combrink C. Soil Structure and Organic Matter: I. Distribution of Aggregate-Size Classes and Aggregate-Associated Carbon // Soil Sci. Soc. Am. J. 2000. V. 64. № 2. P. 681–689. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x
- 45. Smith A.P., Marín-Spiotta E., de Graaff M.A., Balser T.C. Microbial community structure varies across soil organic matter aggregate pools during tropical land cover change // Soil Biol. Biochem. 2014. V. 77. P. 292–303. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.05.030
- 46. Smucker A.J.M., Park E.J., Dorner J., Horn R. Soil micropore development and contributions to soluble carbon transport within macroaggregates // Vadose Zone J. 2007. V. 6. P. 282–290. https://doi.org/10.2136/vzj2007.0031
- Tian J., Pausch J., Yu G., Blagodatskaya E., Gao Y., Kuzyakov Y. Aggregate size and their disruption affect <sup>14</sup>C-labeled glucose mineralization and priming effect // Applied Soil Ecology. 2015. V. 90. P. 1–10. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.01.014

ПОЧВОВЕДЕНИЕ № 4 2020

- Tisdall J.M., Oades J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils // J. Soil Sci. 1982. V. 33. P. 141–163. https://doi.org/10.1111/j.1365–2389.1982.tb01755.x
- Totsche K.U., Amelung W., Gerzabek M.H., Guggenberger G., Klumpp E., Knief C., Lehndorff E., Mikutta R., Peth S., Prechtel A., Ray N., Kögel-Knabner I. Microaggregates in soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2018. V. 181. P. 104–136.

https://doi.org/10.1002/jpln.201600451

50. von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review // Eur. J. Soil Sci. 2006. V. 57.  $\mathbb{N}_{2}$  4. P. 426–445.

https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x

 von Lützow M., Kögel-Knabner I., Ludwig B., Matzner E., Flessa H., Ekschmitt K., Guggenberger G., Marschner B., Kalbitz K. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008. V. 171. P. 111–124. https://doi.org/10.1002/jpln.200700047

## Relationships between the Size of Aggregates, Particulate Organic Matter Content and Plant Residues Decomposition in the Soil

## V. M. Semenov<sup>1, \*</sup>, T. N. Lebedeva<sup>1</sup>, N. B. Pautova<sup>1</sup>, D. P. Khromychkina<sup>1</sup>, I. V. Kovalev<sup>2</sup>, and N. O. Kovaleva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia <sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia \*e-mail: v.m.semenov@mail.ru

The distribution of total ( $C_{opr}$ ), particulate organic matter ( $C_{POM}$ ) and potentially mineralizable organic matter ( $C_0$ ) in mega– (10–5, 5–2 mm), macro– (2–0.25 mm) and microaggregates (<0.25 mm) isolated by dry sieving in the samples of gray and agrogray soils (Greyzemic Phaeozems (Albic, Aric)) of different land uses was investigated. The highest  $C_{org}$  content was recorded in soils under forest and meadow in mega–aggregates 5–2 mm in size (43 and 37% of the whole sample, respectively), while in the arable soil, it was in the macro–aggregate fraction (45%). In uncultivated soil  $C_{POM}$  was accumulated mainly in mega–aggregates (65–72% of  $C_{POM}$  in the whole sample), and in the arable soil it was distributed equally among mega–aggregates and macro–aggregates (46–45%). The fine (0.25–0.05 mm)  $C_{POM}$  subfraction in uncultivated and arable soils contained 1.3 and 2.3 times more carbon than the coarse (2–0.25 mm)  $C_{POM}$  subfraction, respectively. The content of  $C_0$  in the aggregates correlated with the  $C_{POM}$  and with the  $C_{org}$ . Decomposition of plant residues with a low C: N ratio. The effect of aggregate size on the decomposition rate was important mainly on the early stages of this process.

*Keywords:* organic carbon, particulate organic matter, potentially mineralizable pool, mineralization, physical fractionation