

**СПОСОБНОСТЬ ПОЧВЕННЫХ ЧАСТИЦ САМОПРОИЗВОЛЬНО  
ОБРАЗОВЫВАТЬ МАКРОАГРЕГАТЫ ПОСЛЕ ЦИКЛА УВЛАЖНЕНИЯ  
И ВЫСУШИВАНИЯ\***

© 2013 г. В. А. Холодов

*Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7  
e-mail: vkholod@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.02.2012 г.

В условиях лабораторного эксперимента изучена способность самопроизвольно формировать агрегаты  $>0.25$  мм для частиц размером 3–1 мм (ЧА), а также для свободных частиц (СЧ), имеющих в естественном сложении в почве размеры  $<0.25$  мм. СЧ и агрегаты 3–1 мм выделяли из залежных почв: дерново-подзолистой и типичного чернозема, а также из пахотной дерново-подзолистой почвы. Агрегаты 3–1 мм измельчали и пропускали через сито 0.25 мм, затем ЧА и СЧ заливали водой, высушивали и оценивали количество образовавшихся агрегатов, их водопрочность, а для пахотного варианта еще и содержание углерода. СЧ необрабатываемых почв практически не образовывали агрегатов. В то же время ЧА этих почв проявляли выраженную способность к формированию агрегатов, в том числе и водопрочных. Напротив, в пахотной дерново-подзолистой почве СЧ, наряду с ЧА, также обладали способностью самоорганизовываться в агрегаты. Водопрочность самоорганизованных агрегатов пахотной почвы была примерно одинаковой, независимо от источника (ЧА или СЧ). Высказано предположение, что в случае пахотной почвы способность СЧ формировать макроагрегаты отражает процессы механического разрушения агрегатов в почве: при вспашке происходит разрушение агрегатов и частицы, способные самопроизвольно агрегироваться, временно попадают во фракцию  $<0.25$ . Водопрочные агрегаты, полученные из ЧА или СЧ пахотной почвы, содержали больше органического углерода (1.89%) по сравнению с водопрочными агрегатами, выделенными из обычных агрегатов 3–1 мм этой почвы (1.31%).

*Ключевые слова:* агрегаты, самосборка, устойчивость почв.

DOI: 10.7868/S0032180X13040072

**ВВЕДЕНИЕ**

Структура почвы – это форма и размер структурных отдельностей в виде макроагрегатов (педов)  $>0.25$  мм, на которые распадается почва [15]. Структура верхних гумусовых горизонтов во многом определяет такие важнейшие свойства, как устойчивость почвы к действию неблагоприятных факторов окружающей среды и ее потенциальное плодородие [9, 15, 18]. В связи с этим, изучение структуры почв имеет большое значение с точки зрения регулирования глобальных циклов углерода [23], охраны окружающей среды, воспроизводства почвенного плодородия, оптимизации режима гумуса в пахотных почвах [6, 9, 15, 18, 19, 24]. Все сказанное определяет актуальность изучения почвенной структуры.

Во всех современных исследованиях почвенной структуры на начальном этапе обычно требуется либо количественно оценить содержание

структурных отдельностей, либо выделить какую-либо размерную фракцию для дальнейшего изучения. Основными методами являются разработанные в прошлом веке методы разделения почвенных агрегатов на ситах на воздухе, либо в воде [2, 12, 14, 15, 17, 21]. В последние годы совершенствование методов разделения почвенных отдельностей шло, во-первых, по пути стандартизации процедуры встряхивания сит по времени и частоте. Были разработаны методические рекомендации и созданы механические устройства для единообразного исполнения этой процедуры. Во-вторых, пристальное внимание было уделено процедурам подготовки почвенных агрегатов к просеиванию в воде [15].

В целом, методы разделения на ситах до сих пор актуальны в почвенных исследованиях. Однако они имеют один существенный недостаток, затрудняющий интерпретацию полученных результатов: принципиальную неселективность метода. С агрономической точки зрения при просеивании, наряду с агрегатами выделяются псевдо-

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 11-04-00284а, 13-04-01753).

агрегаты: отдельные имеющие по сравнению с агрегатами малую пористость, высокую плотность, не стойкие в воде, либо наоборот абсолютно устойчивые вследствие цементации [11]. Кроме того, средний срок существования почвенного агрегата в окружающей среде 27 дней [22], следовательно, при просеивании в одну размерную фракцию попадают свежееобразованные, зрелые и уже готовые распасться агрегаты. В связи с этим, естественно предположить, что их свойства будут различаться.

Цель работы – разработать метод выделения почвенных агрегатов, состоящих из почвенных частиц, способных самопроизвольно собираться в макроагрегаты после процесса увлажнения–иссушения, обосновать возможности его приложения для изучения почвенной структуры и сравнительно изучить с его помощью структуру длительное время необрабатываемых дерново-подзолистой почвы и чернозема, а также пахотной дерново-подзолистой почвы.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи. Изучить способность к самосборке в структурные отдельные частицы больше 0.25 мм из разных источников: частиц агрегатов (ЧА), получаемых механическим разрушением размерной фракции 3–1 мм, и бесструктурных частиц (СЧ) – частиц в естественном почвенном сложении, имеющих размеры <0.25 мм. На основе полученных данных сравнить структурное состояние необрабатываемых дерново-подзолистых почв и черноземов. Оценить на примере дерново-подзолистых почв разницу в содержании и распределении способных к самосборке частиц для пахотного и необрабатываемого вариантов землепользования. На примере дерново-подзолистой пахотной почвы изучить содержание органического углерода (С орг) в получаемых самособравшихся структурных отдельностях, в том числе водопрочных, и сопоставить его с содержанием С орг в почве в целом, ее структурных отдельностях и водопрочных агрегатах, получаемых обычными методами.

Основное внимание в предлагаемом методе уделено почвенным агрегатам, имеющим размер 3–1 мм в воздушно-сухом состоянии. Обычно к агрономически ценной части почвенной структуры относят агрегаты размерами 10–0.25 мм [11]. Однако размерную фракцию 3–1 или 4–2 мм, по мнению многих авторов, можно считать наиболее благоприятной для возделывания сельскохозяйственных культур. Например, в работе 1933 г. Качинский указывал, что “...агрегаты в 1 мм образуют уже прекрасную и благоприятную в сельском хозяйстве крупитчатую структуру.” Оптимальный размер структурных отдельностей по-видимому чаще всего лежит около 2–3 мм [4]. Тот же автор в 1947 г. для агрономически ценной структуры пи-

сал: “Допустимый диапазон крупности структурных агрегатов укладывается от 1 до 10 мм, а оптимум – 2–3–4 мм” [5]. Вильямс [3] выделял оптимальную структуру с размером 2–3 мм, считая агрономически ценными агрегаты от 1 до 10 мм. Хан [14] в своих работах, посвященных структуре почвы, опирался на размерную фракцию 3–1 мм. Кроме того, изучение распределения С орг в структурных отдельностях чернозема указывает на то, что в большинстве случаев углерод агрегатов 3–1 мм вносит наибольший вклад в общее количество почвенного органического вещества [7]. В связи с этим для получения ЧА были использованы агрегаты размером 3–1 мм.

Для запуска процессов самоорганизации почвенных частиц был выбран цикл увлажнения–иссушения. Этот процесс интересен тем, что, с одной стороны, он практически всегда упоминается как структурообразующий в почвах [4, 5, 9, 11, 15], с другой стороны, он легко воспроизводим в лабораторных условиях и минимально изменяет свойства почв. В ходе разработки методической части работы была предпринята попытка стандартизации разработанного метода с целью получения хорошей воспроизводимости как во внутреннем, так и в межлабораторном экспериментах.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый метод основан на обнаруженной способности ЧА после принудительного механического разрушения самопроизвольно вновь образовывать макроагрегаты (агрегаты >0.25 мм, далее по тексту именуемые “агрегаты”), после цикла увлажнения–иссушения в лабораторных условиях.

В работе использовали дерново-подзолистые почвы, отобранные на территории Московской обл.: лесную (под ельником, Зеленоградский р-н, окрестности УОПЭЦ “Чашниково”) и пахотную – почва зерно-траво-пропашного севооборота (Мытищинский р-н, окрестности Долгопрудной опытной агрохимической станции им. академика Д.Н. Прянишникова). Кроме того изучали образцы типичного чернозема многолетнего опыта в варианте “ежегодно косимая степь” (Курская обл., Центрально-черноземный государственный биосферный заповедник им. В.В. Алехина).

Смешанный почвенный образец был составлен из пяти индивидуальных проб. Индивидуальные пробы (каждая около 2 кг) отбирали с участка площадью примерно 5 м<sup>2</sup> из верхнего гумусового горизонта (А1) на глубине 5–15 см. Из полученного образца (около 10 кг) методом квартования создавали средний образец (1.5 кг), из которого были отобраны крупные корни.

В образцах определяли содержание органического углерода сжиганием в бихромате калия по

Содержание углерода и величина рН в исследованных почвах

Почва, угодье	С орг, %	рН водный
Дерново-подзолистая, Московская обл.		
под лесом	2.77	4.7
пахотная	1.31	6.3
Чернозем типичный, ежегодно косимая степь, Курская обл.	5.52	6.8

Тюрину со спектрофотометрическим окончанием [8] и величины рН в отношении почва : вода = 1 : 2.5 [1]. Полученные значения приведены в таблице.

В ряду изученных почв содержание органического углерода изменялось от 1.31 до 5.52%, что соответствует приводимым в литературе пределам [12]. Следует отметить закономерно более низкое, обусловленное вовлеченностью в сельскохозяйственное использование, содержание углерода в пахотной дерново-подзолистой почве по сравнению с аналогом под лесом.

Величина рН изменялась от 4.7 в дерново-подзолистой необрабатываемой почве до 6.8 в типичном черноземе степи, что характерно для этих типов [12]. Величина рН 6.3 пахотной дерново-подзолистой почвы отражает регулярно проводимое в ней известкование. В целом рассмотренные показатели отобранных образцов характерны для исследуемых типов почв с учетом типа землепользования.

Метод получения почвенных структурных отдельностей, способных к самосборке, в том числе водопроочных. Для наглядности, разработанная схема выделения приводится на рис. 1. Из

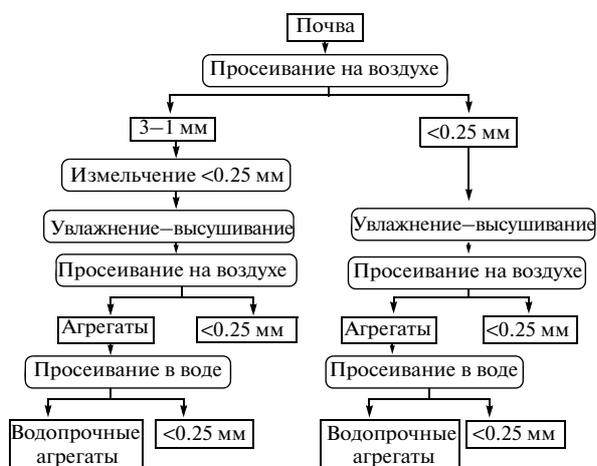


Рис. 1. Используемая в работе схема получения почвенных структурных отдельностей.

почвенной массы в воздушно-сухом состоянии набором сит диаметром 3, 1 и 0.25 мм просеиванием на воздухе выделяли почвенные воздушно-сухие агрегаты естественного сложения двух размерных фракций: 3–1 и <0.25 мм.

Выделенные агрегаты 3–1 мм разрушали в ступке и всю массу пропускали через сито 0.25 мм. Полученные ЧА (20 г) помещали в чашку Петри и добавляли такое же количество дистиллированной воды (20 мл). Затем высушивали на воздухе при комнатной температуре двое суток. С СЧ проделывали аналогичные операции, за исключением процедуры измельчения.

После высыхания, частицы образуют достаточно гомогенную массу, состоящую из самособравшихся агрегатов и неплотно сцепленных почвенных частиц. Для их разделения всю навеску из чашки Петри переносили в пластиковые пробирки для центрифугирования на 50 мл с закрывающейся крышкой (типа “Falcon”). Для удобства, из одной чашки Петри примерно равные количества почвы переносили в две пробирки. Пробирки закрывали, помещали на оборотный ротатор и встряхивали 90 мин при 25 об./мин.

Продолжительность встряхивания на оборотном ротаторе была выбрана на основе предварительных экспериментов, согласно которым, в первые 60 мин встряхивания содержание агрегатов >0.25 мм снижалось, затем, в течение следующих 60 мин, оставалось постоянным, после чего вновь начинало уменьшаться, достигая значений, сопоставимых с ошибкой эксперимента – 1–2%. Кроме того, средние значения содержания агрегатов, выделяемых после встряхивания от 60 до 120 мин, были близки к величинам, получаемым при разминании резиновым пестиком без нажима, но имели меньший разброс и лучше воспроизводились.

После встряхивания почву из пробирок взвешивали, переносили на сито 0.25 мм и просеивали, отделяя самособравшиеся агрегаты от неагрегированных частиц. Определяли массу самособравшихся агрегатов, и рассчитывали долю их содержания в взятой навеске.

Для выделения водопроочных агрегатов, состоящих из ЧА, навеску полученных на предыдущем этапе самособравшихся структурных отдельностей помещали на сито 0.25 мм, ячейки которого предварительно были увлажнены (для этого сито на 1 мин погружали в дистиллированную воду и доставали, не встряхивая). Дожидались когда вода, удерживаемая между ячейек сита, увлажнит навеску агрегатов. Если влаги на ячейках сита было недостаточно, к низу сетки сита прикладывали переувлажненную фильтровальную бумагу (бумагу погружали в воду, затем давали излишней воде

стечь) и достигали увлажнения агрегатов до капиллярной влагоемкости.

Затем сито с агрегатами погружали в дистиллированную воду на 10 мин. По истечении этого времени проводили просеивание в воде путем повторяемых десять раз колебаний сита в воде вправо–влево на  $45^\circ$  и вверх–вниз. На сите оставались водопрочные агрегаты, способные к самосборке после механического разрушения. Полученные препараты водопрочных агрегатов высушивали при температуре  $105^\circ\text{C}$ .

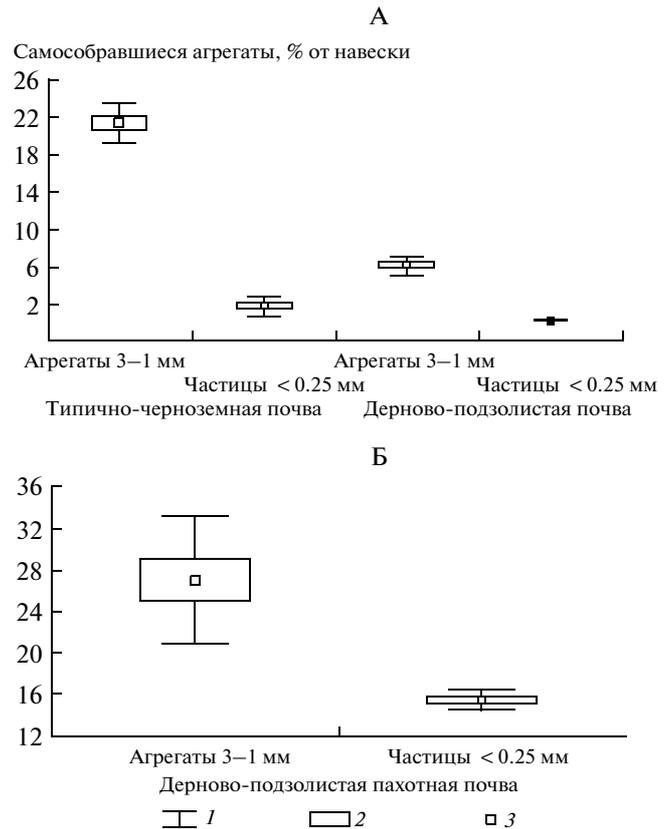
Суспензию с прошедшими через сито частицами  $<0.25$  мм высушивали в тарированных фарфоровых чашках, взвешивали и по данным об изначальной массе почвы, доле самособравшихся сухих агрегатов и взятой их навески для выделения водопрочных агрегатов, рассчитывали количество водопрочных агрегатов, способных к самосборке (процент от массы самособравшихся агрегатов и процент от массы изначально взятой навески).

В связи с тем, что органическое вещество в гумусовых горизонтах обычно является одним из основных структурообразующих агентов [14, 18, 24, 25], все полученные по схеме агрегаты и частицы из дерново-подзолистой пахотной почвы были проанализированы на содержание углерода сжиганием в бихромате калия по Тюрину со спектрофотометрическим окончанием [8]. Полученные данные были сопоставлены с общим содержанием С орг в водопрочных агрегатах, выделенных из почвенных агрегатов 3–1 мм общепринятыми методами [7, 15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Самосборка агрегатов из предварительно разрушенных структурных отдельностей 3–1 мм и из почвенных частиц естественного сложения  $<0.25$  мм после увлажнения–высушивания. Способность механически разрушенных частиц структурных отдельностей 3–1 мм и почвенных частиц  $<0.25$  мм самопроизвольно собираться в агрегаты (образования крупнее 0.25 мм) тестировалась как в необрабатываемых почвах (типичный чернозем ежегодно косимой степи и дерново-подзолистая почва под ельником), так и в пахотной почве (дерново-подзолистая почва зерно-траво-пропашного севооборота).

Количество частиц, самопроизвольно собравшихся в агрегаты, для рассматриваемых структурных отдельностей необрабатываемых почв приводятся на диаграмме, визуализирующей основные статистические показатели для полученных средних – Box & Whisker Plot,  $n = 4$  для каждого варианта (рис. 2А).



**Рис. 2.** Самопроизвольное образование агрегатов из бесструктурных частиц  $<0.25$  мм естественного сложения (СЧ) и полученных путем разрушения агрегатов 3–1 мм до размеров  $<0.25$  мм (ЧА) необрабатываемых почв (А) и дерново-подзолистой пахотной почвы (Б). Здесь и далее: 1 – стандартное отклонение; 2 – ошибка среднего; 3 – среднее.

В необрабатываемых почвах отсутствуют процессы механического разрушения агрегатов и, следовательно, все частицы, способные самопроизвольно собираться в структурные отдельности  $>0.25$  мм, уже агрегированы и в свободном состоянии практически не существуют.

Результаты, полученные в ходе экспериментов с составляющими необрабатываемых почв, подтверждают выдвинутое предположение. Из СЧ образовывалось меньше 2% агрегатов, что сопоставимо с ошибкой эксперимента. Для СЧ типичного чернозема этот показатель составил 1.6%, а для дерново-подзолистой почвы – 0.2%. Как видно из рис. 2А и подтверждается проведенным  $t$ -тестом ( $\alpha = 0.01$ ,  $n = 8$ ), значимых отличий между этими двумя средними не существует. Полученные значения сопоставимы с ошибкой эксперимента, кроме того, визуальный осмотр полученных частиц больше 0.25 мм показал, что не менее 50% их составляют корешки растений с диаметром меньше 0.25 мм, а длиной больше этого значения. Соответственно частицы такой формы не

во всех случаях проходят через сито, что во многом и обуславливает отклонение обсуждаемого показателя от нуля. Таким образом, можно заключить, что в необрабатываемых почвах частицы <0.25 мм практически не обладают способностью самособираться в агрегаты.

Напротив, согласно экспериментальным данным, ЧА, полученные механическим разрушением агрегатов 3–1 мм необрабатываемых почв, обладают хорошо выраженной способностью самоорганизовываться. Видно, что 21.2% ЧА типичного чернозема и 6.1% дерново-подзолистой почвы самособрались в структурные отдельные >0.25 мм. По результатам оценки значимости отличий по *t*-критерию ( $\alpha = 0.01$ ,  $n = 8$ ) оба средних отличались как друг от друга, так и от средних значений количества самособравшихся агрегатов из СЧ.

Таким образом, в состав структурных отдельных 3–1 мм входят частицы, способные после механического разрушения самопроизвольно после увлажнения–высушивания образовывать агрегаты, а частицы естественного сложения <0.25 мм этой способности лишены. Однако в случае обработки почвы, вызывающей механическое разрушение агрегатов, взаимосвязи будут более сложные. Например, в размерную фракцию <0.25 мм могут попадать частицы из разрушенных агрегатов. В связи с этим далее было исследовано структурное состояние пахотной дерново-подзолистой почвы, длительное время используемой в сельском хозяйстве под зерно-траво-пропашным севооборотом.

В пахотной почве СЧ, так же как и ЧА, самопроизвольно образовывали агрегаты после увлажнения–высушивания. Так, 27.0% полученных ЧА вновь самоорганизовались в структурные отдельные >0.25 мм. При использовании в эксперименте СЧ этот показатель составил 15.3%. Полученные данные приводятся на диаграмме, визуализирующей основные статистические характеристики полученных средних (рис. 2Б). Видно, что интервалы основных статистических характеристик полученных средних (ошибка и стандартное отклонение) не перекрываются. Это указывает на то, что количество самособравшихся агрегатов зависит от источника почвенных частиц: при использовании механически разрушенных почвенных агрегатов 3–1 мм этот показатель выше по сравнению с бесструктурными частицами почв. Вывод подтверждается статистически значимым отличием рассматриваемых средних, согласно оценке по *t*-критерию ( $\alpha = 0.01$ ,  $n = 10$ ).

Таким образом, почвенные агрегаты 3–1 мм дерново-подзолистой пахотной почвы содержат почти в полтора раза больше частиц, способных самостоятельно собираться в агрегаты по сравнению с СЧ. Следует отметить высокую способ-

ность СЧ пахотной почвы самоорганизовываться по сравнению с таковыми необрабатываемых почв, которые практически лишены этой особенности. Вероятно, это связано с использованием почвы в зерно-траво-пропашном севообороте. Часть агрегатов была разрушена в результате обработки, и их частицы попали в размерную фракцию <0.25 мм, при этом сохранив способность самособираться в агрегаты на момент отбора почвенных образцов.

Следует отметить, что из ЧА дерново-подзолистой пахотной почвы самопроизвольно образовывалось значительно больше агрегатов (27.0%), чем из таковых аналогичной, но необрабатываемой почвы (6.1%). Вероятно, наблюдаемые отклонения отражают типы использования почв. Как известно, органическое вещество способствует агрегатообразованию [14, 15, 18, 24]: чем его больше, тем больше агрегатов. Существует и механизм обратной связи: почвенные агрегаты препятствуют минерализации органического вещества, входящего в их состав, таким образом сохраняя его [18, 24]. В пахотной дерново-подзолистой почве идет постоянное разрушение агрегатов в результате вспашки, одним из противоположно направленных процессов является их самосборка. Само собирающиеся агрегаты сохраняют органическое вещество и, соответственно, не разрушаются. В то же время частицы, не способные агрегироваться после разрушения теряют углерод и вместе с ним способность образовывать агрегаты, даже под внешним воздействием. В результате, в составе агрегатов регулярно перепашиваемой почвы, наблюдается относительное накопление частиц, которые при разрушении способны самопроизвольно формировать агрегаты.

Следует отметить, что приводимые данные не вскрывают механизмов образования агрегатов в почве, но позволяют сделать предположение о принципиальном отличии для нативных и залежных почв частиц, входящих в состав агрегатов и частиц в естественном сложении <0.25 мм. Вероятно, часть ЧА обладает сродством как друг к другу, так и к СЧ, что при их механическом разрушении способствует агрегатообразованию. Причинами такого поведения ЧА можно предположить как их физико-химические особенности, так и, вероятно, их заселенность микроорганизмами. Вероятно оба фактора имеют значение. В целом проблема требует дальнейшего исследования.

Помимо структурной организованности, агрономически ценные почвенные агрегаты должны обладать водопрочностью. В связи с этим, в полученных самособравшихся агрегатах была определена доля водопрочных.

Водопрочность агрегатов, самособравшихся из предварительно разрушенных структурных отдель-

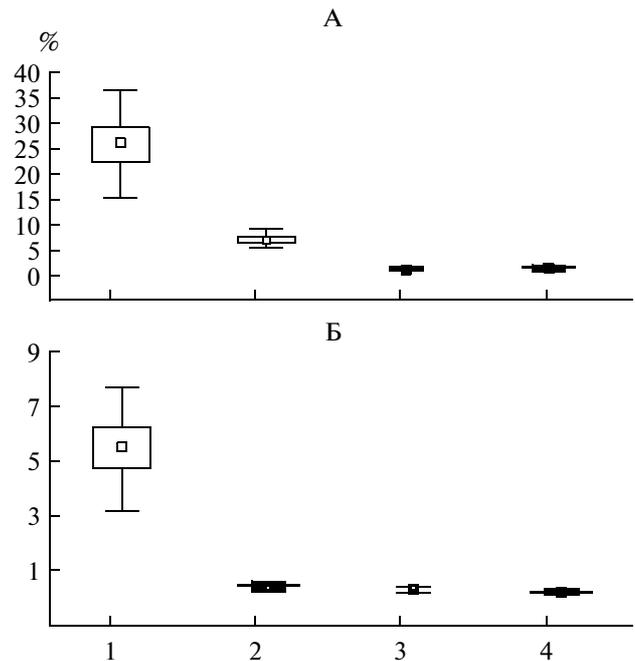
ности. Полученные на предыдущем этапе сухие самособравшиеся структурные отдельности были просеяны в воде через сито 0.25 мм. В связи с тем, что из СЧ необрабатываемых почв агрегатов образовывалось крайне мало, их количества было недостаточно для получения значимых результатов методом просеивания в воде. Кроме того, как уже указывалось выше, эти отдельности более чем на 50% состояли из мелких корешков. Поэтому, с большой долей вероятности можно утверждать, что водопрочность этих структурных отдельностей не имеет ни диагностического, ни практического значения. В связи с этим, агрегаты, выделенные из СЧ необрабатываемых почв, в дальнейшей работе не использовали.

Водопрочность была оценена для агрегатов, самособравшихся из ЧА всех рассматриваемых вариантов почв, а также из СЧ дерново-подзолистой пахотной почвы. Водопрочность оценивали по содержанию водопрочных агрегатов.

Содержание водопрочных агрегатов в самособравшихся структурных отдельностях приведено на рис. 3А. Наибольшая водопрочность (25.7% водопрочных агрегатов) была у структурных отдельностей, полученных из ЧА типичного чернозема ежегоднокосимой степи, наименьшая — у пахотной дерново-подзолистой почвы. Причем содержание водопрочных агрегатов в структурных отдельностях пахотной почвы не зависело от использования для самосборки ЧА или СЧ. Содержание водопрочных агрегатов для этих вариантов составило 1.2 и 1.4% соответственно, полученные средние значимо не отличались ( $t$ -тест при  $\alpha = 0.01$ ,  $n = 6$ ).

Отсутствие различий в водопрочности обоих вариантов самособравшихся агрегатов пахотной почвы подтверждает высказанное выше предположение о том, что часть агрегатов в ходе использования ее в зерно-траво-пропашном севообороте была разрушена в результате обработки, а их частицы попали в размерную фракцию  $<0.25$  мм. При этом они сохранили способность самособираваться в агрегаты на момент отбора почвенных образцов.

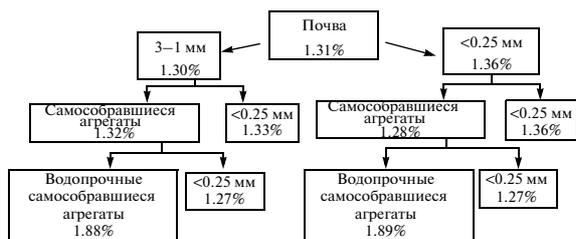
Содержание водопрочных агрегатов в самособравшихся из ЧА структурных отдельностей необрабатываемой дерново-подзолистой почвы (7.1%) было значимо больше, чем у пахотной ( $t$ -тест при  $\alpha = 0.01$ ,  $n = 6$ ) и меньше, чем у структурных отдельностях, полученных ЧА из чернозема. Однако в этом случае,  $t$ -тест для  $n = 6$  устанавливает значимые различия только для уровня значимости 0.05. Вероятно это связано с небольшим объемом выборки и широким варьированием данных о содержании водопрочных агрегатов в самособравшихся отдельностях из ЧА типичного чернозема (рис. 3А).



**Рис. 3.** Содержание водопрочных агрегатов в самособравшихся структурных отдельностях (А) и в навесках, взятых для получения этих отдельностей (Б). Источники: 1 – разрушенные агрегаты 3–1 мм (ЧА) чернозема типичного ежегодно косимой степи; 2 – разрушенные агрегаты 3–1 мм (ЧА) дерново-подзолистой почвы под лесом; 3 – разрушенные агрегаты 3–1 мм (ЧА) дерново-подзолистой пахотной почвы; 4 – бесструктурные частицы естественного сложения  $<0.25$  мм (СЧ) дерново-подзолистой пахотной почвы.

На качественном уровне содержание водопрочных агрегатов в полученных структурных отдельностях отражает описанные в литературе взаимосвязи между водопрочностью структуры, типом почвы и характером ее использования. Структура чернозема по сравнению с дерново-подзолистыми почвами обладает большей водопрочностью, целинная дерново-подзолистая почва содержит больше водопрочных агрегатов по сравнению с пахотной [13, 14, 25]. Однако выход водопрочных агрегатов (рис. 3Б) при расчете для почвы в целом, то есть от взятой навески для получения самоорганизовавшихся структурных отдельностей, гораздо ниже приводимых в литературе данных [7, 13, 14]. Например, при изучении водопрочных агрегатов типичного чернозема разных типов использования во фракции 3–1 мм отмечают наличие от 38 до 88% водопрочных агрегатов [7].

В нашем же случае, для типичного чернозема этот показатель составил 5.5% от исходно взятой навески агрегатов 3–1 мм. Для агрегатов дерново-подзолистой почвы под лесом – 0.4%, под пашней – 0.3 и для частиц  $<0.25$  дерново-подзолистой пахотной почвы – 0.2%. Во всем рассматриваемом



**Рис. 4.** Содержание органического углерода в структурных отдельностях, выделенных согласно разработанной схеме (рис. 1) из дерново-подзолистой почвы зерно-траво-пропашного севооборота.

мом ряду средних значимо отличалось только значение, полученное для размерной фракции 3–1 мм чернозема, остальные – все варианты дерново-подзолистых почв – по данным  $t$ -теста значимо не различались ( $\alpha = 0.05$ ,  $n = 6$ ). Как видно, содержание водопрочных агрегатов самособравшихся отдельностей в черноземе больше по сравнению с дерново-подзолистыми почвами. При этом варианты использования дерново-подзолистой почвы не оказывали влияния на рассматриваемый показатель. Однако для получения более обоснованного вывода, необходимы дальнейшие исследования на выборке большего объема.

Для установления возможных различий в строении получаемых согласно разработанной схеме (рис. 1) структурных отдельностей и частиц  $<0.25$  мм, во всех выделенных образцах дерново-подзолистой пахотной почвы было определено содержание углерода.

Содержание углерода в полученных в ходе эксперимента агрегатах и частиц  $<0.25$  мм дерново-подзолистой почвы зерно-траво-пропашного севооборота. Для наглядности, содержание углерода в полученных структурных отдельностях совмещено со схемой их выделения и приводится на рис. 4. Значимость регистрируемых отличий оценивали  $t$ -тестом при уровне значимости  $\alpha = 0.01$ , объем выборки колебался от 6 до 8.

Полученные сухим просеиванием почвы частицы естественного сложения  $<0.25$  мм содержали значимо больше С орг по сравнению с почвой в целом и воздушно-сухими агрегатами 3–1 мм. Это связано с попаданием при просеивании в размерную фракцию  $<0.25$  мм мелких растительных остатков, которые практически невозможно отделить от почвы при подготовке образцов к анализу на углерод. Этим объясняется такое же (1.36%) содержание С орг в частицах, которые не агрегировались при самоорганизации СЧ.

Средние по содержанию С орг для большинства других вариантов близки между собой и по

данным  $t$ -теста ( $n = 30$ ,  $\alpha = 0.01$ ) принадлежат одной выборке.

В то же время значимо большее содержание С орг (1.89%) наблюдали в водопрочных агрегатах, полученных из самособравшихся структурных отдельностей. Причем эта величина была статистически одинакова как для водопрочных агрегатов, полученных из ЧА, так и полученных из СЧ. Обе величины значимо отличались от всех остальных рассматриваемых средних.

Таким образом, если исключить влияние неразложившихся растительных остатков, можно считать, что в большинстве полученных, согласно разработанной схеме, структурных отдельностей и частицах  $<0.25$  пахотной почвы было примерно одинаковое содержание С орг, соответствующее величине этого параметра для почвы в целом (1.31%). Однако в водопрочных агрегатах самособравшихся отдельностей содержание С орг было больше примерно на 40%.

Полученное значение С орг в водопрочных агрегатах самособравшихся структурных отдельностей было сопоставлено с величиной С орг в водопрочных агрегатах, получаемых обычными методами из почвы. С этой целью из ненарушенных почвенных агрегатов 3–1 мм выделены водопрочные агрегаты  $>0.25$  мм [7, 15], в которых было измерено содержание С орг. Среднее значение полученной величины (1.56%) было значимо меньше по сравнению с С орг водопрочных агрегатов самособравшихся отдельностей. Интересно отметить, что содержание углерода в частицах, на которые распались неводопрочные агрегаты 3–1 мм, было значимо меньше, чем для почвы в целом и составило 1.17%.

Большой уровень содержания С орг в водопрочных агрегатах самособравшихся структурных отдельностей по сравнению с водопрочными агрегатами, полученными обычным способом, указывает на их принципиальное отличие, что дает право рассматривать предложенный метод как новый способ получения информации о почвенной структуре, в ходе которого выделяется обогащенная С орг фракция водопрочных агрегатов.

Анализируя концепцию иерархии почвенных агрегатов (the aggregate hierarchy concept) [18, 24, 26] можно попытаться выяснить место выделяемых структурных отдельностей в организации почвенной структуры.

Одним из принципиальных подходов в концепции иерархии почвенных агрегатов является рассмотрение их как динамических образований [24]. Как уже упоминалось выше, время их существования в почве оценивается в среднем в 27 дней [22], в связи с этим, можно предположить, что при просеивании на воздухе и в воде в одну размерную фракцию попадают свежесформированные, зрелые и старые, готовые распасться,

агрегаты. Как было показано, получаемые изложенной методикой водопрочные агрегаты содержат гораздо больше С орг по сравнению с водопрочными, получаемыми просеиванием в воде. Многочисленные данные свидетельствуют о прямой взаимосвязи содержания органического вещества с размерами агрегатов и их водопрочностью [7, 14, 24, 25].

Все вышеизложенное, а также сам предложенный способ выделения — по сути фракционирующий частицы, способные к самоорганизации — дает возможность предположить, что данным методом выделяются свежесформированные агрегаты. Вероятно, это обуславливает их способность к самоорганизации.

В концепции иерархии агрегатов принят принцип исключения пористости (porosity exclusion principle) [20, 24], согласно которому, эффективность связывающих агентов зависит от их размеров. Эффективно действуют агенты с размерами, сопоставимыми с порами, которые надо преодолеть, чтобы соединить связываемые субъекты вместе. Органические и неорганические вещества способны связывать частицы в микроагрегаты, а корни растений и гифы грибов способствуют соединению микроагрегатов в (макро)агрегаты.

Полученные данные о возможности частиц, составляющие агрегаты, после физического измельчения до размеров микроагрегатов (<0.25 мм) вновь самостоятельно связываться, вероятно, указывают на то, что некоторые микроагрегаты способны сами выступать в качестве связывающих агентов для формирования макроагрегатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен простой, экспрессный и в то же время информативный метод изучения почвенной структуры. Основой метода является способность частиц, составляющих почвенный агрегат, после его разрушения вновь самоорганизовываться в агрегаты после цикла увлажнения—высушивания.

Метод позволяет сравнительно оценивать потенциальную способность почвы к структурообразованию. Если в почве отсутствуют процессы механического разрушения агрегатов, у частиц естественного сложения <0.25 мм способность к самоорганизации в агрегаты, после цикла увлажнения—высушивания, будет практически отсутствовать. Напротив, наличие такой способности у этих частиц является индикатором процессов механического разрушения агрегатов, например, вспашки.

Большее содержание частиц, способных к самосборке в агрегатах пахотной почвы по сравнению с необрабатываемым аналогом, указывает на наличие обратной связи в системе: разрушение

агрегатов — потеря углерода. Она выражается в относительном накоплении частиц, способных самостоятельно формировать агрегаты после разрушения, и, соответственно, препятствовать потерям углерода.

Водопрочные агрегаты, выделяемые из самособравшихся структурных отдельностей, содержат значительно больше С орг по сравнению с водопрочными агрегатами, выделяемыми традиционными методами.

Вероятно, некоторые почвенные микроагрегаты могут сами являться связывающими агентами для формирования макроагрегатов. Для их выделения можно использовать разработанный метод получения структурных отдельностей, способный к самосборке после увлажнения—высушивания.

Следует предположить, что агрегаты, получаемые этим методом, являются недавно сформированными, способными к участию в создании почвенной структуры, их можно назвать активными почвенными агрегатами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аринушкина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 488 с.
2. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
3. *Вильямс В.Р.* Почвоведение. Земледелие с основами почвоведения. Собр. соч. М.: Государственное изд-во с.-х. лит-ры, 1951. Т. 6. 576 с.
4. *Качинский Н.А.* О структуре почвы // Тр. советской секции международной ассоциации почвоведов. 1933. Т. 1. Комиссия первая (физика почв). Мат-лы к выяснению вопроса о структуре почвы.
5. *Качинский Н.А.* О структуре почвы, некоторых водных ее свойствах и дифференциальной порозности // Почвоведение. 1947. № 6. С. 336–348.
6. *Кёршенс М.* Значение содержания гумуса для плодородия почв и круговорота азота // Почвоведение. 1992. № 10. С. 122–131.
7. *Козут Б.М., Сысуев С.А., Холодов В.А.* Водопрочность и лабильные гумусовые вещества типичного чернозема при разном землепользовании // Почвоведение. 2012. № 5. С. 555–561.
8. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 272 с.
9. Почвоведение. Почвы и почвообразование / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. М.: Высшая школа, 1988. Ч. 1. 400 с.
10. Почвоведение. Типы почв, их география и использование / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. М.: Высшая школа, 1988. Ч. 2. 368 с.
11. *Розанов Б.Г.* Морфология почв. М.: Академический проект, 2004. 432 с.
12. *Саввиннов Н.И.* Структура почвы и ее прочность на целине, перелог и старопахотных участках. М.: Сельколхозгиз, 1931. 46 с.

13. Фрид А.С., Кузнецова И.В., Королева И.Е., Бондарев А.Г., Когут Б.М., Уткаева В.Ф., Азовцева Н.А. Зонально-провинциальные нормативы изменений агрохимических, физико-химических и физических показателей основных пахотных почв европейской территории России при антропогенных воздействиях. Метод. рекомендации. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2010. 176 с.
14. Хан Д.В. Органо-минеральные соединения и структура почвы. М.: Наука, 1969. 140 с.
15. Шейн Е.В. Курс физики почв. М.: Изд-во Моск. унта, 2005. 432 с.
16. Шейн Е.В., Милановский Е.Ю. Роль и значение органического вещества в образовании и устойчивости почвенных агрегатов // Почвоведение. 2003. № 1. С. 53–61.
17. Ashman M.R., Hallett P.D., Brookes P.C. Are the links between soil aggregate size class, soil organic matter and respiration rate artefacts of the fractionation procedure? // Soil Biol. and Bioch. 2003. V. 35(3). P. 435–444.
18. Elliott E.T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1986. V. 50. P. 627–633.
19. Garcna-Oliva F., Oliva M., Sveshtarova B. Effect of soil macroaggregates crushing on C mineralization in a tropical deciduous forest ecosystem // Plant and Soil. 2004. V. 259(1–2). P. 297–305.
20. Kay B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems // Adv. Soil Sci. 1990. V. 12. P. 1–52.
21. Mendes I.C., Bandick A.K., Dick R.P., Bottomley P.J. Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops // Soil Sci. Soc. Am. J. 1999. V. 63. P. 873–881.
22. Plante A.F., Feng Y., McGill W.B. A modeling approach to quantifying soil macroaggregate dynamics // Can. J. Soil Sci. 2002. V. 82. P. 181–190.
23. Rawson A., Murphy B. The greenhouse effect, climate change and native vegetation. Background paper № 7. Native vegetation Advisory Council NSW Department of Land and Water Conservation. 2000.
24. Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // Soil and Tillage Research. 2004. V. 79. P. 7–31.
25. 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. P. 681–689.
26. Tisdall J.M., Oades J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils // J. Soil Sci. 1982. V. 62. P. 141–163.