

МИНЕРАЛОГИЯ
И МИКРОМОРФОЛОГИЯ ПОЧВ

УДК 631.4

СРАВНЕНИЕ МИКРОМОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
АГРЕГАТОВ НЕСМЫТОГО И СРЕДНЕСМЫТОГО
ПАХОТНОГО ЧЕРНОЗЕМА ТИПИЧНОГО В ЛАБОРАТОРНОМ
ЭРОЗИОННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

© 2019 г. О. О. Плотникова^{a, b, *}, М. П. Лебедева^{a, b}, В. В. Демидов^b, Д. В. Карпова^b

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., 7/2, Москва, 119017 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119017 Россия

*e-mail: mrs.plotnikova@mail.ru

Поступила в редакцию 31.07.2018 г.

После доработки 13.02.2019 г.

Принята к публикации 25.03.2019 г.

Разработан и опробован подход к оценке воздействия ручейковой эрозии на агрегаты чернозема типичного в ходе лабораторного эксперимента на гидрлотке. Объект исследования: агрегаты поверхностной части пахотных горизонтов чернозема типичного несмытого (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic)) и среднесмытого (Haplic Chernozem (Loamic, Aric)) (Курская область). В эксперименте участвовали отдельно как исходно воздушно-сухие, так и капиллярно-увлажненные насыпные образцы. По снимкам шлифов из агрегатов при помощи программы STaп получили значения количественных микроморфометрических показателей агрегатов: фактора формы (FF) и степени округлости (Rdn), рассчитали коэффициент изрезанности поверхности агрегата (U). Статистически сравнивали морфометрические показатели агрегатов одной размерности из исходного насыпного образца и после воздействия потока с определенной скоростью. В результате выявлено, что агрегаты несмытой почвы под действием модельного мелководного потока изменяются сильнее, если почва перед размывом была сухой, в отличие от исходно капиллярно-увлажненной. Показано, что изменение микроморфометрических показателей агрегатов среднесмытой почвы в большей степени зависит от ее агрегатного состава, нежели от влажности образца до эксперимента. При сравнении агрегатов обеих почв, прошедших обработку мелководным потоком, выявлено, что на их морфометрические характеристики оказывает влияние и исходное увлажнение почвы, и степень ее смытости. Для дальнейшего изучения воздействия ручейковой эрозии на агрегаты почвы наиболее перспективным оказался показатель степени округлости, по которому обнаружилось наибольшее число статистически значимых различий.

Ключевые слова: фактор формы, степень округлости, коэффициент изрезанности, эродированный чернозем, ручейковая эрозия, мелководный поток

DOI: 10.1134/S0032180X19100095

ВВЕДЕНИЕ

Почва является одним из наиболее ценных национальных ресурсов, который может быть полностью потерян в результате эрозии. Во время формирования поверхностного стока и смыва почвы происходит транспорт почвенных агрегатов водными потоками [24]. В результате движения происходит частичное или полное их разрушение, истирание и как следствие образование агрегатов меньшего диаметра по сравнению с исходным состоянием. Это оказывает существенное влияние на транспортирующую способность водных потоков, количество переносимой или откладывающейся почвы. Кроме того, в результате формирования поверхностного стока и смыва

происходит изменение не только химических и физических свойств почвы как единого тела, но и микроморфологических свойств перемещающихся или откладывающихся агрегатов [16].

В современном почвоведении накоплен большой фактический материал как о свойствах черноземов в различных природных зонах при высокой антропогенной нагрузке, связанной с распашкой [7, 8, 14, 17, 18, 32, 34, 35], так и об изменении свойств почв при некоторых модельных воздействиях. В качестве примеров таких воздействий можно назвать дождевание [4, 5], применение полимерных препаратов [1], внесение удобрений [2, 15, 22, 33], экспериментальное загрязнение [28, 31], возвращение соломы [37].

Важную роль при изучении свойств почв играют микроморфометрические исследования [19, 21, 35]. В работах, посвященных моделированию эрозионных процессов, большое внимание традиционно уделяется эрозионным параметрам почвы, таким как эродируемость, сопротивление частиц почвы отрыву [11], физическим параметрам почвы таким, как плотность и влажность [10, 12], а также параметрам самих эродирующих потоков и экспериментальных установок [9, 10, 23]. Множество экспериментальных работ посвящено разработке различных моделей ручейковой эрозии почв [30, 37]. Однако детальным исследованиям микроморфометрических свойств эродированных почв, а особенно переносимых агрегатов, до настоящего времени не уделялось должного внимания. Учитывая, что в результате взаимодействия потока воды с почвой происходят существенные изменения свойств почв, связанные с воздействием сил гидравлического происхождения, которые испытывают частицы почвы, следует ожидать, что в результате такого взаимодействия характер границ и форма переносимых и откладывающихся агрегатов будут изменяться. Это в свою очередь будет оказывать влияние на свойства эродированных почв, находящихся в транзитном положении в рельефе, их противоэрозионную стойкость и количество транспортируемого водным потоком почвенного материала.

Цель работы – разработать и опробовать подход к оценке воздействия ручейковой эрозии на почвенные агрегаты чернозема типичного. Задачи: 1 – изучить основные морфометрические показатели агрегатов чернозема типичного разной степени смывости; 2 – определить при помощи основных морфометрических показателей, как влияет процесс ручейковой эрозии на почвенные агрегаты в зависимости от их исходного состояния и степени смывости почвы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Для отбора образцов на опытном поле ВНИИЗиЗПЭ в районе с. Панино Курской области Медвенского района заложили два разреза:

1) чернозем типичный мощный тяжелосуглинистый на лёссовидных суглинках глубокопахотный несмытый по Классификации и диагностике почв СССР [6] (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic) по WRB [36]). Координаты разреза: 51°32'36.35" N, 36°6'35.54" E. В год отбора образцов поле было засеяно озимой пшеницей. Положение разреза в рельефе: склон южной экспозиции, водораздел, угол наклона земной поверхности 1.1°;

2) чернозем типичный среднемощный легкосуглинистый на лёссовидных суглинках глубокопахотный среднесмытый по Классификации и

диагностике почв СССР [6] (Haplic Chernozem (Loamic, Aric) по WRB [36]). Координаты разреза: 51°32'22.53" N, 36°06'40.76" E. В год отбора образцов поле было засеяно яровым ячменем. Положение разреза в рельефе: средняя часть вогнутого склона угол наклона земной поверхности 3.3°–3.4°.

Для экспериментов на большом эрозионном лотке отбирали насыпные образцы почвы из верхних 10 см профиля, так как именно на них в первую очередь воздействуют мелководные потоки. Для отобранных насыпных образцов были изучены следующие свойства (чернозем несмытый – среднесмытый, соответственно): плотность почвы: 1.30–1.49 г/см³; содержание гумуса: 5.00–5.26%; коэффициент структурности K : 1–0.93; средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов d_{cp} : 0.3–0.4 мм. Первоначально с насыпными образцами почвы провели серию экспериментов по размыву их мелководными потоками на большом эрозионном лотке (факультет почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова). Эти эксперименты проводили с целью выделить фракции почвенных агрегатов, которые преимущественно выносятся модельными потоками. Размыву подвергали только образцы верхней части пахотного горизонта, так как именно эта часть испытывает влияние процессов ручейковой эрозии. Большой эрозионный лоток – устройство для проведения модельных экспериментов в лабораторных условиях с целью изучения и прогнозирования различных процессов водной эрозии почв. В наших экспериментах использовано искусственное русло потока, имеющее длину 5 м, ширину 0.1 м, в которое с помощью электрического насоса с разной интенсивностью подавали воду. Поскольку в условиях лаборатории нет возможности создать искусственное русло длиной несколько десятков или сотен метров, нагружали поток почвой в начале русла длиной 5 м. Понимая определенные ограничения такого подхода, считаем, что моделируем ситуацию, когда дождь кончился, поток прошел уже существенную часть склона и несет собранную с него почву. На дне лотка создана искусственная шероховатость при помощи наждачной бумаги (диаметр зерен $d = 0.5$ мм). Высота выступов шероховатости $0.7d = 0.35$ мм. При помощи дозатора и ленточного транспортера в поток подается почва. Имеется устройство для изменения угла наклона русла. Угол наклона измеряется при помощи нивелира или мерной иглы. В наших экспериментах угол наклона русла изменялся от 0.5° до 1.3°. Работу на лотке проводили так: воздушно-сухую навеску почвы массой 1 кг подавали в русло потока при помощи дозатора и транспортера. Капиллярно-увлажненная почва (исходная масса 1 кг) смывалась в поток из специальной емкости струей воды при небольшом расходе. Продолжительность эксперимента контролировали секундомером. В целом его продолжительность

Таблица 1. Условное обозначение фракций чернозема типичного несмытого и среднесмытого

Код фракции	Размер фракции, мм	Агрегаты участвовали в эксперименте	Исходное состояние образцов
Чернозем типичный несмытый			
1	0.25–0.5	Да	Воздушно-сухое
2	1–2	Да	Капиллярно-увлажненное
3	0.25–0.5	Нет	Воздушно-сухое
4	1–2	Нет	Воздушно-сухое
Чернозем типичный среднесмытый			
5	0.25–0.5	Да	Воздушно-сухое
6	1–2	Да	Капиллярно-увлажненное
7	0.25–0.5	Нет	Воздушно-сухое
8	1–2	Нет	Воздушно-сухое

составляла от 53 до 90 с для воздушно-сухих навесок и от 53 до 71 с – для капиллярно-увлажненных образцов. Глубина потока в экспериментах варьировала от 0.008 до 0.011 м. Когда образец воздушно-сухой или капиллярно-увлажненной почвы весь поступал в поток, подача воды в русло прекращалась. Выносимые потоком агрегаты поступали в набор сит, установленных в баке-отстойнике на выходе из искусственного русла потока. Сита вынимали, почву просеивали в воде [3]. Бюксы с почвенными агрегатами различных размеров (фракций) высушивали до воздушно-сухого состояния. Затем проводили расчет средневзвешенного диаметра вынесенных потоком агрегатов (при этом массу агрегатов диаметром <0.25 мм рассчитывали по разности между исходной массой сухой навески и суммой масс всех фракций влекомых агрегатов диаметром >0.25 мм и массы отложившихся агрегатов).

Скорости потоков в серии экспериментов составляли 0.294, 0.332, 0.412, 0.566, 0.635 м/с для несмытого чернозема и 0.316, 0.362, 0.449, 0.535, 0.648 м/с для среднесмытого чернозема. Для изучения морфометрических параметров агрегатов чернозема типичного по итогам серии экспериментов были выбраны варианты, в которых скорость потока составила 0.412 и 0.449 м/с для несмытой и среднесмытой почвы соответственно, то есть соответствовала средней из диапазона доступных скоростей. При этих скоростях средневзвешенный диаметр влекомых агрегатов исходно воздушно-сухой почвы попал во фракцию 0.25–0.5 мм. Средневзвешенный диаметр агрегатов исходно капиллярно-увлажненной почвы попал во фракцию 1–2 мм.

Для оценки влияния эрозионного процесса на морфометрические показатели агрегатов исследуемых почв из этих фракций и соответствующих им фракций почвы, не участвовавшей в эксперименте, в лаборатории минералогии и микромор-

фологии почв Почвенного института им. В.В. Докучаева изготовили почвенные шлифы. С использованием оптического минералогического микроскопа Olympus BX51 с цифровой фотокамерой Olympus DP26 провели съемку шлифов из исследуемых агрегатов со 100-кратным увеличением для фракций 0.25–0.5 мм и 40-кратным – для фракций 1–2 мм. Перечисленные работы выполнены с привлечением оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием “Функции и свойства почв и почвенного покрова” Почвенного института им. В.В. Докучаева.

Для удобства фракции закодировали следующим образом (табл. 1). Для чернозема типичного несмытого: фракция 1 – агрегаты, участвовавшие в эксперименте, будучи исходно воздушно-сухими; фракция 2 – агрегаты, участвовавшие в эксперименте, будучи исходно капиллярно-увлажненными; фракция 3 – агрегаты размером 0.25–0.5 мм, не участвовавшие в эксперименте; фракция 4 – агрегаты размером 1–2 мм, не участвовавшие в эксперименте. Для чернозема типичного среднесмытого: фракция 5 – агрегаты, участвовавшие в эксперименте, будучи исходно воздушно-сухими; фракция 6 – агрегаты, участвовавшие в эксперименте, будучи исходно капиллярно-увлажненными; фракция 7 – агрегаты размером 0.25–0.5 мм, не участвовавшие в эксперименте; фракция 8 – агрегаты размером 1–2 мм, не участвовавшие в эксперименте.

Количественное определение морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного проводили в несколько этапов:

1. Бинаризация снимков при помощи программы Adobe Photoshop CS5.
2. Автоматическая обработка бинарных изображений (разрешение 72 dpi) в программе Skyscan™ STAnalysier. При этом производили подсчет количества агрегатов и определяли их геометрические характеристики: площадь, периметр, фактор

формы, диаметр круга с эквивалентной площадью, степень округлости, наибольший и наименьший диаметры. В качестве характеристических показателей выбрали фактор формы (FF), степень округлости (Rdn) и коэффициент изрезанности (U). Фактор формы и степень округлости рассчитывали с помощью программы STAnalysер по следующим формулам:

$$FF = \frac{4\pi A}{Pm^2}, \quad (1)$$

где A – площадь объекта, мм², Pm – периметр объекта, мм;

$$Rdn = \frac{4A}{\pi d_{\max}^2}, \quad (2)$$

где A – площадь объекта, мм², d_{\max} – максимальный диаметр объекта, мм.

3. Коэффициент изрезанности рассчитывали отдельно по формуле:

$$U = \frac{L}{\pi D^*}, \quad (3)$$

где L – длина линии, ограничивающей объект, мм; D^* – диаметр круга с площадью, эквивалентной площади объекта, мм [25].

4. В сводные таблицы Excel собирали информацию со всех снимков по каждому шлифу. Данные, полученные после обработки снимков в STAnalysер, пересчитывали для удобства из пикселей в миллиметры. Это необходимо для того, чтобы до проведения статистического анализа отбросить значения FF , Rdn , U , которые соответствуют диаметрам агрегатов меньшим, чем границы диапазона диаметров исследуемых фракций. Такие агрегаты могли случайно попасть в общее число в результате их разрушения в процессе транспортировки.

Показатель фактора формы выбрали для изучения в связи с предположением, что под действием мелководного потока почвенные агрегаты могут изменить свою форму – стать более или же менее вытянутыми, продолговатыми. Относительные придержки по фактору формы приняли такими же, как для почвенных пор в классификации, разработанной Скворцовой и Морозовым [20], то есть показатель FF варьирует от 0 до 1, и чем он больше – тем ближе к округлости форма агрегата. Показатель степени округлости рассчитывали в качестве дополнения к фактору формы. Коэффициент изрезанности поверхности агрегата ранее для почвы не применяли, однако мы предположили, что он может использоваться в качестве характеристического показателя при почвенно-эрозионных лабораторных исследованиях.

Далее для рассчитанных морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного до и после эксперимента при помощи программы Sta-

tistica 12 проводили непараметрическое сравнение независимых выборок по критерию Манна–Уитни, а затем уровни значимости p скорректировали по методу Бенджамини–Хохберга для контроля ошибки первого рода [26]. Сравнение производили по парам фракций со следующими кодами: 1) 1–3, 2) 2–4, 3) 5–7, 4) 6–8, 5) 1–5, 6) 2–6, 7) 3–7, 8) 4–8. Пары выбраны таким образом, чтобы, во-первых, отдельно в каждой исследуемой почве проверить, есть ли систематические различия между нативными агрегатами и агрегатами, прошедшими размыв на лотке в разных исходных состояниях (пары с первой по четвертую включительно). Во-вторых, необходимо было сравнить между собой фракции чернозема типичного несмытого и среднесмытого, прошедшие размыв на лотке, чтобы понять, есть ли между ними отличия, которые могут быть обусловлены влиянием степени смытости при разных исходных состояниях образцов исследуемых почв (пары пятая и шестая). И наконец, мы попытались узнать, влияет ли степень смытости на морфометрические характеристики агрегатов исследуемых почв в их исходном состоянии (пары седьмая и восьмая).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические параметры варьирования фактора формы, степени округлости и коэффициента изрезанности приведены в табл. 2. Диаграммы размаха морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного несмытого и среднесмытого позволяют понять, что большая часть данных по исследуемым выборкам имеет распределение, отличное от нормального (рис. 1). Наиболее широкий размах варьирования по фактору формы имеют выборки по фракциям 1, 5 и 6 (рис. 1, А), по степени округлости – выборки по фракциям 1, 3 и 5 (рис. 1, Б), а по коэффициенту изрезанности – снова выборки по фракциям 1, 5 и 6 (рис. 1, В). Наибольшее количество выбросов в исследуемых выборках обнаружено по коэффициенту изрезанности, наименьшее количество выбросов – по степени округлости, при этом среди всех выборок по указанным параметрам максимальное число выбросов имеет выборка по фракции 5. В ней есть экстремально большие значения коэффициента изрезанности (рис. 1, В).

Эта неоднородность характеристических показателей послужила основанием для выбора непараметрического сравнения независимых выборок в качестве основного метода статистической оценки различий между фракциями.

Результаты коррекции непараметрического сравнения независимых выборок по методу Бенджамини–Хохберга продемонстрированы в табл. 3. В методе Бенджамини–Хохберга критический уровень значимости p принят равным 0.05. Значимые систематические различия между

Таблица 2. Статистики варьирования фактора формы, степени округлости и коэффициента изрезанности агрегатов чернозема типичного

Код фракции	<i>M</i>	<i>S</i>	<i>N</i>	–95%	95%
Фактор формы <i>FF</i>					
1	0.560	0.094	151	0.545	0.575
2	0.612	0.071	39	0.589	0.635
3	0.589	0.094	85	0.569	0.610
4	0.565	0.091	22	0.525	0.605
5	0.573	0.113	155	0.555	0.591
6	0.547	0.116	23	0.497	0.597
7	0.584	0.073	44	0.562	0.606
8	0.623	0.062	12	0.583	0.662
Степень округлости <i>Rdn</i>					
1	0.566	0.113	151	0.548	0.584
2	0.569	0.081	39	0.543	0.596
3	0.605	0.116	85	0.580	0.629
4	0.565	0.119	22	0.512	0.618
5	0.531	0.127	155	0.511	0.551
6	0.518	0.121	23	0.466	0.570
7	0.620	0.106	44	0.588	0.652
8	0.639	0.085	12	0.585	0.693
Коэффициент изрезанности <i>U</i>					
1	1.351	0.123	151	1.332	1.371
2	1.284	0.078	39	1.259	1.310
3	1.316	0.117	85	1.291	1.341
4	1.344	0.116	22	1.292	1.395
5	1.347	0.174	155	1.320	1.375
6	1.378	0.166	23	1.306	1.450
7	1.317	0.089	44	1.290	1.344
8	1.272	0.063	12	1.232	1.312

Примечание. *M* – среднее, *S* – стандартное отклонение, *N* – объем выборки, –95 и 95% – границы доверительного интервала.

выборками обнаружены по степени округлости в парах сравнения 1–3, 5–7, 6–8 и 1–5. Уровни значимости, очень близкие по значению к критическому 0.05, по степени округлости показаны в парах 2–6 и 4–8, по фактору формы – в парах 1–3 и 2–6, по коэффициенту изрезанности – во всех парах, кроме 5–7, 1–5 и 3–7. В паре 3–7 значимых систематических различий нет ни по одному показателю. В паре 1–3 по всем показателям различия либо значимы, либо близки к значимым. В паре 2–6 все уровни значимости близки к критическому. Наибольшее количество значимых различий обнаружено по фактору формы. В то же время наибольшее количество близких к критическим различий обнаружено по коэффициенту изрезанности. Ни для одной пары сравнения не получено критических уровней значимости различий по всем показателям.

Таблица 3. Уровни значимости систематических различий морфометрических показателей между фракциями агрегатов чернозема типичного несмытого и среднесмытого

Пара сравнения	<i>FF</i>	<i>Rdn</i>	<i>U</i>
1–3	0.067	0.026	0.064
2–4	0.085	0.639	0.076
5–7	0.816	0.000	0.800
6–8	0.085	0.018	0.076
1–5	0.128	0.018	0.132
2–6	0.067	0.054	0.064
3–7	0.656	0.441	0.666
4–8	0.085	0.054	0.076

ОБСУЖДЕНИЕ

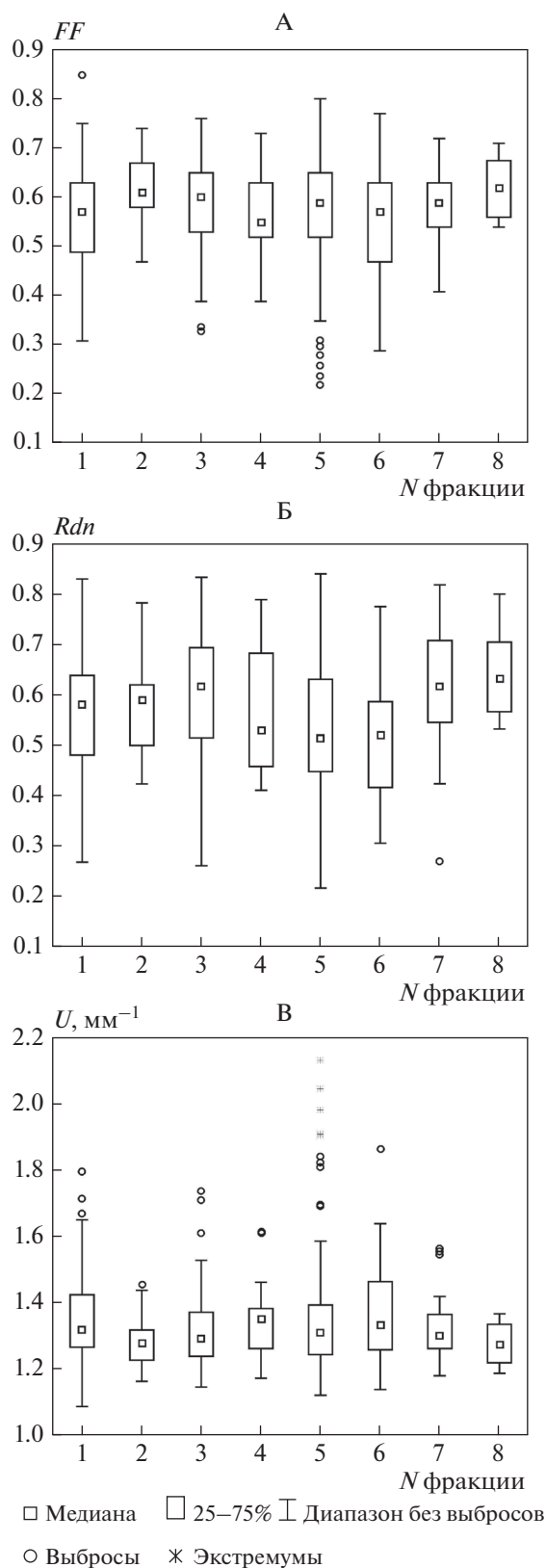


Рис. 1. Статистики варьирования значений фактора формы (А), степени округлости (Б) и коэффициента изрезанности (В) агрегатов пахотного горизонта чернозема типичного.

Специфика нашего подхода позволяет не учитывать площади контактов агрегатов в образцах [13], поскольку мы используем насыпные образцы. Это позволило оценивать воздействие потока непосредственно на почвенные агрегаты. Кроме того, некоторые ученые обнаружили, что угол наклона русла от 3° до 25° вносит существенный вклад в транспорт наносов [23, 27]. В наших экспериментах угол наклона искусственного русла не более 2° (то есть не более 3.5%), поэтому предполагаем, что в данном случае эта переменная не оказывает серьезного влияния на результаты размыва насыпных образцов.

В случае чернозема несмытого между исходно воздушно-сухими агрегатами, прошедшими обработку водным потоком, систематические различия наблюдаются по всем показателям (пара 1–3). А между исходно капиллярно-увлажненными агрегатами различие есть только по коэффициенту изрезанности (пара 2–4). То есть для несмытого чернозема типичного, регулярно распаиваемого, при воздействии эрозионного потока прежде всего имеет значение то, была ли почва предварительно увлажнена, или же поток застиг ее в сухом состоянии. Возможно, это происходит за счет того, что при поступлении в поток сухих агрегатов воздух, содержащийся в их порах, резко вытесняется водой и оказывает разрывающее действие на агрегаты. В экспериментах по дождеванию суглинистой почвы, проведенных бельгийскими учеными, отмечена та же закономерность [29]. В черноземе среднесмытом систематических различий меньше, а картина наблюдается обратная — между исходно капиллярно-увлажненными агрегатами до и после эксперимента различия есть по *Rdn* и *U*, а между исходно воздушно-сухими — только по *Rdn*. То есть для среднесмытого чернозема типичного в условиях постоянно антропогенной нагрузки (распашка) и транзитного положения на склоне при воздействии эродирующего потока, по-видимому, большее влияние на изменение микроморфометрических свойств агрегатов оказывает не предварительное увлажнение, а агрегатный состав почвы, зависящий от степени смывности почвы и выражающийся в средневзвешенном диаметре агрегатов.

Вызывает интерес тот факт, что при сравнении агрегатов почв разной степени смывности фракции 0.25–0.5 мм, не участвовавших в эксперименте (пара 3–7), значимых систематических различий не обнаружено ни по одному показателю. В паре 1–5, где сравнивали агрегаты обеих исследуемых почв, участвовавших в эксперименте, будучи исходно воздушно-сухими, значимое различие нашлось только одно — по степени округлости. Возможно, оба этих факта говорят о том, что при таком мелком размере агрегатов степень

смытости почвы в целом не влияет на их морфометрические показатели, если они не испытали на себе непосредственное воздействие эродирующего потока.

При сравнении агрегатов обеих почв фракции 1–2 мм, не участвовавших в эксперименте (пара 4–8), обнаружены только уровни значимости различий, близкие к критическим, по двум показателям из трех (по степени округлости и коэффициенту изрезанности). По-видимому, в совокупности с предыдущим умозаключением это указывает на то, что морфометрические показатели агрегатов зависят от их размеров, а, возможно, и от свойств агрегатов, связанных с их размерами, например, плотности и пористости. Однако в данном исследовании эти характеристики агрегатов не определяли.

В случае сравнения между собой агрегатов обеих почв, прошедших обработку мелководным потоком, будучи исходно капиллярно-увлажненными (пара 2–6), по всем трем морфометрическим показателям обнаруживаются уровни значимости систематических различий, близкие к критическим. Это дает возможность судить о том, что при этом размере агрегатов (а они оказались в обоих случаях соответствующими фракции 1–2 мм) также проявляется влияние степени смытости почвы: в случае капиллярно-увлажненных агрегатов фактор формы и степень округлости у агрегатов чернозема типичного среднесмытого систематически меньше, а коэффициент изрезанности поверхности – больше.

Обращает на себя внимание тот факт, что критические уровни значимости систематических различий между выборками обнаружены только по показателю степени округлости. Возможно, за счет простоты расчета этот показатель оказался самым представительным и обнаруживает серьезные различия в разных фракциях и при разных условиях обработки агрегатов. В трех случаях из четырех при сравнении пар до–после эксперимента показатель степени округлости систематически больше у агрегатов, не участвовавших в эксперименте, что можно проследить на диаграммах размаха (рис. 1). Теоретически, за счет прокатывания по дну русла с выступами шероховатости степень округлости агрегатов должна увеличиваться. А она, по-видимому, в результате экспериментов уменьшается. Чтобы ответить на вопрос, как меняется степень округлости агрегатов, выносимых модельными склоновыми потоками, необходимо провести дополнительно анализ, описанный для серии экспериментов с различными скоростями потоков и разными степенями смытости почвы. Кроме того, расширение диапазона изучаемых скоростей даст возможность определить, имеют ли значение такие показатели, как фактор формы и коэффициент изрезанности

поверхности агрегатов для количественного описания их морфометрических свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первые результаты изучения морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного несмытого и среднесмытого при помощи разработанного подхода позволили выявить следующие закономерности. Агрегаты неэродированной почвы под действием модельного мелководного потока изменяются сильнее, если почва перед размывом была сухой. Изменение морфометрических показателей агрегатов чернозема типичного среднесмытого в большей степени зависит от его агрегатного состава, нежели от влажности образца до эксперимента.

При сравнении агрегатов обеих почв, прошедших обработку мелководным потоком, показано, что на их морфометрические характеристики оказывает влияние и исходное состояние почвы, и степень ее смытости.

Из трех количественных морфометрических показателей агрегатов, выбранных для изучения, наиболее представительным оказался показатель степени округлости Rdn . В то же время закономерности изменения фактора формы FF и коэффициента изрезанности U пока недостаточно изучены. Исследование этих показателей на базе более широкого спектра скоростей модельных потоков и степеней смытости, а также при наличии или отсутствии сельскохозяйственной обработки почвы позволят уточнить, насколько фактор формы и коэффициент изрезанности поверхности агрегатов применимы для характеристики изменений морфометрических свойств агрегатов в результате воздействия мелководного потока.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность И.А. Фастовцу и Е.Б. Скворцовой за консультации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке гранта Президиума РАН “Теоретические и экспериментальные исследования для эффективного научно-технического развития агропромышленного комплекса Российской Федерации”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бганцов В.В., Мосолова А.Н., Санжарова С.И., Челобяниц С.А. Микроморфологические исследования влияния полимерных препаратов на структурное состояние типичного чернозема // Микроморфология антропогенно измененных почв. М.: Наука, 1988. С. 36–46.

2. *Белюченко И.С., Антоненко Д.А.* Влияние сложного компоста на агрегатный состав и водно-воздушные свойства чернозема обыкновенного // Почвоведение. 2015. № 7. С. 858–864. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15070035>
3. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
4. *Дубовик Е.В.* Изменение структурно-агрегатного состояния чернозема типичного при дождевании // Достижения науки и техники АПК. 2010. № 1. С. 39–41.
5. *Дубовик Е.В.* Влияние дождевания на макроструктуру чернозема типичного // Почвоведение. 2012. № 3. С. 350–355.
6. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
7. *Королев В.А., Громовик А.И., Боронтов О.К.* Изменение основных показателей плодородия чернозема выщелоченного при разных способах основной обработки // Почвоведение. 2016. № 1. С. 107–114. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16010093>
8. *Кухарук Н.С., Чендев Ю.Г., Петин А.Н.* Микроморфологические особенности органического вещества при агрогенной трансформации почв лесостепной зоны // Научные ведомости. Сер. Естественные науки. 2011. № 15 (110). Вып. 16. С. 168–179.
9. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф.* Влияние силы тяжести на размыв модельных образцов почвы // Почвоведение. 2015. № 7. С. 872–876. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15070072>
10. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф.* Влияние температуры воды и влажности почвы на эродируемость образцов чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 890–896. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14070107>
11. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф., Муракаев Р.Р.* Определение гидрофизических параметров почвы в модели эрозии // Почвоведение. 2010. № 4. С. 488–494.
12. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф.* Эродируемость модельной почвы различной плотности // Почвоведение. 2011. № 8. С. 995–999.
13. *Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф.* Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. 2016. № 5. С. 593–598. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16050117>
14. *Масютенко Н.П., Глазунов Г.П., Санжаров А.И., Кузнецов А.В., Афонченко Н.В., Олещицкий В.В.* Влияние степени эродированности на показатели экологического состояния черноземных почв // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 8. С. 19–23.
15. *Никитин В.В., Соловichenко В.Д., Навальнев В.В., Карабутов А.П.* Влияние севооборотов, способов обработки почвы и удобрений на изменение органического вещества в черноземе типичном // Агротехника. 2017. № 2. С. 3–10.
16. *Плотникова О.О., Демидов В.В., Лебедева-Верба М.П.* Действие мелководных потоков на поверхностные горизонты чернозема типичного различной степени смывости // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Вып. 91. С. 85–109. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2018-91-85-109>
17. *Середина В.П., Кулижский С.П., Афанасьева Н.Н.* Агрогенная трансформация черноземов Койбальской степи (Хакасия) // Почвоведение. 2003. № 2. С. 220–227.
18. *Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р.* Варьирование микроморфометрических показателей порового пространства в пахотном типичном черноземе // Почвоведение. 1995. № 12. С. 1469–1478.
19. *Скворцова Е.Б., Морозов Д.Р.* Микроморфометрическая классификация и диагностика строения порового пространства почвы // Почвоведение. 1993. № 6. С. 49–56.
20. *Скворцова Е.Б., Санжарова С.И.* Микроморфометрические особенности порового пространства в пахотных горизонтах суглинистых почв // Почвоведение. 2007. № 4. С. 487–497.
21. *Шейн Е.В., Лазарев В.И., Айдиев А.Ю., Сакункончак Т., Кузнецов М.Я., Милановский Е.Ю., Хайдапова Д.Д.* Изменение физических свойств черноземов типичных (Курская область) в условиях длительного стационарного опыта // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1201–1208.
22. Экология эрозионно-русловых систем России / Под ред. Чалова Р.С. М.: Географический ф-т МГУ, 2002. 163 с.
23. *Aksoy H., Eris E., Tayfur G.* Empirical sediment transport models based on indoor rainfall simulator and erosion flume experimental data // Land Degradation and Development. 2016. <https://doi.org/10.1002/ldr.2555>
24. *Amada S., Imagawa K., Aoki S.* Splat profile of impinging droplets on rough substrates: influence of surface roughness // Surface and Coatings Technology. 2002. V. 154. P. 27–33.
25. *Benjamini Y., Hochberg Y.* Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing // J. Royal Statistical Soc. 1995. Series B. V. 57. P. 289–300.
26. *Burachevskaya M., Minkina T., Mandzhieva S., Bauer T., Chaplygin V., Sushkova S., Orlović-Leko P., Mashtykova L., Rajput V.* Comparing two methods of sequential fractionation in the study of copper compounds in Harpic chernozem under model experimental conditions // J. Soils Sediments. 2018. V. 18. № 6. P. 2379–2386. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1711-7>
27. *Chen X., Zhao Y., Mi H., Mo B.* Estimating rill erosion process from eroded morphology in flume experiments by volume replacement method // Catena. 2016. V. 136. P. 135–140.
28. *Gargiulo L., Mele G., Terribile F.* Effects of iron-based amendments on soil structure: a lab experiment using soil micromorphology and image analysis of pores // J. Soils Sediments. 2014. V. 14. № 8. P. 1370–1377. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0894-4>

29. *Govers G., Everaert W., Poesen J., Rauws G., De Ploey J., Lantier J.P.* A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion // *Earth Surface Processes and Landforms*. 1990. V. 15. P. 313–328.
30. *Guo M., Shi H., Zhao J., Liu P., Welbourn D., Lin Q.* Digital close-range photogrammetry for the study of rill development at flume scale // *Catena*. 2016. V. 143. P. 265–274.
31. *Hammerová A., Jandák J., Brtnický M., Hladký J., Hrabovská B.* Physical parameters of chernozem lands affected by water erosion // *Proc. 20th International PhD Students Conference* Местоположение: Mendel Univ, Fac Agron, Brno, Czech Republic. MENDELNET. 2013. P. 296–300.
32. *Kar G., Schoenau J.J., Hilger D., Peak D.* Direct chemical speciation of soil phosphorus in a Saskatchewan Chernozem after long- and short-term manure amendments // *Can. J. Soil Sci.* 2017. V. 00, 0000. P. 1–11. <https://doi.org/10.1139/cjss-2017-0016>
33. *Khokhlova O., Chendev Yu., Myakshina T., Alexandrovskiy A., Khokhlov A.* Evolution of Chernozems in the southern forest-steppe of the Central Russian upland under long-term cultivation examined in the agro-chronosequences // *Quaternary Int.* 2015. V. 365. P. 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.10.012>
34. *Lisetskii F., Stolba V., Marinina O.* Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use, Steppe Crimea // *Geoderma*. 2015. V. 239–240. P. 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.006>
35. *Sauzet O., Cammas C., Gilliot J.M., Bajard M., Montagne D.* Development of a novel image analysis procedure to quantify biological porosity and illuvial clay in large soil thin sections // *Geoderma*. 2017. V. 292. P. 135–148.
36. Working Group WRB, I. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome, 2015.
37. *Wu B., Wang Z., Zhang Q., Shen N., Liu J., Wang S.* Evaluation of shear stress and unit stream power to determine the sediment transport capacity of loess materials on different slopes // *J. Soils Sediments*. 2018. V. 18. P. 116–127.
38. *Zhao X.M., He L., Zhang Z.D., Wang H.B., Zhao L.P.* Simulation of accumulation and mineralization (CO₂ release) of organic carbon in chernozem under different straw return ways after corn harvesting // *Soil Tillage Res.* 2016. V. 156. P. 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.11.001>

Comparison of Micromorphometric Characteristics of Aggregates from Noneroded and Moderately Eroded Typical Chernozem in a Laboratory Experiment

O. O. Plotnikova^{1,2,#}, M. P. Lebedeva^{1,2}, V. V. Demidov², and D. V. Karpova²

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

[#]*e-mail: mrs.plotnikova@mail.ru*

The aim of this study was to develop an approach to assessing the impact of rill erosion on aggregates of typical chernozem aggregates in a laboratory experiment with flume. Aggregates from the plow horizons of noneroded and moderately eroded typical chernozem (Haplic Chernozem (Loamic, Aric, Pachic) and Haplic Chernozem (Loamic, Aric)) of Kursk region (Russia) were analyzed. Micromorphometric parameters of the aggregates of the same sizes untreated by water and transported by water flow were statistically compared. These aggregates were initially air-dry or capillary-wetted. Photos of thin sections were processed in the CTan program to obtain quantitative micromorphometric parameters: form factor (*FF*) and roundness (*Rdn*). Then, the coefficient of aggregate surface unevenness (*U*) was calculated. As a result, it was found that aggregates from the noneroded soil changed stronger under the influence of a shallow-water flow, if the soil before the experiment was dry. This was confirmed by significant statistical differences in all the studied parameters. The change in parameters of aggregates from the moderately eroded typical chernozem depended on the soil structure rather than on the sample moistening before the experiment. A comparison of aggregates treated with shallow-water flow showed that their characteristics are affected both by the initial state of the soil and by the degree of its erosion. The degree of roundness was the most representative parameter, as the largest number of statistically significant differences was found.

Keywords: form factor, roundness, unevenness, eroded chernozem, rill erosion, shallow-water flow