

УДК 631.4

DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-3-80-87



## ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ И ВОДОУСТОЙЧИВОСТИ ПОЧВ

Г. Н. Федотов<sup>1\*</sup>, Д. А. Тарасенко<sup>1</sup>, В. В. Демидов<sup>1</sup>,  
И. В. Горепекин<sup>1,2</sup>, М. Н. Егорова<sup>1</sup>, А. И. Сухарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

<sup>2</sup> Евразийский центр по продовольственной безопасности МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

\* E-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

Формула Кузнецова связывает параметры эрозионной стойкости и водоустойчивости почв. Однако механизм возникновения данных свойств различен: водоустойчивость объясняют действием внутриагрегатных гидрофобных связей между гуминовыми веществами, а эрозионную стойкость — размером водопрочных агрегатов и силой их сцепления друг с другом. При этом природа межагрегатных связей, обеспечивающих эрозионную стойкость, остается неясной. Цель работы состояла в уточнении механизма эрозионной стойкости почв путем проверки существования связи между устойчивостью почв к действию воды на гидролотке и водоустойчивостью их агрегатов. В работе использовали образцы гумусово-аккумулятивных горизонтов почв: дерново-подзолистой и чернозема выщелоченного. Для получения образцов с одним агрегатным составом, но отличающихся по эрозионной стойкости в работе использованы почвенные полимерные мелиоранты (ППМ). Эрозионную стойкость почв определяли на гидролотке и рассчитывали критическую скорость смыва. Водоустойчивость почв оценивали методом лезвий. Размер частиц в растворах оценивали методом лазерной дифрактометрии. Установлено, что на почвах, обработанных ППМ, результаты методов лотка и лезвий коррелируют на 99%. Высокая корреляция позволяет предположить единую природу внутри- и межагрегатных связей. Для проверки роли гидрофобных взаимодействий в формировании агрегатов, устойчивых к действию воды, в модельном эксперименте к водным растворам гуматов добавили полимеры разной степени гидрофобности: полиэтиленгликоль (ПЭГ), полиакриламид (ПАА) и поливиниловый спирт (ПВС). Параллельно оценили водоустойчивость почв, обработанных ПЭГ, ПАА и ПВС. Анализ результатов показал, что наибольшая водоустойчивость агрегатов отмечена при добавлении в почвы самого гидрофобного полимера — поливинилового спирта, который формировал наиболее крупные частицы при взаимодействии с гуматом в модельном опыте. Эти результаты подтверждают роль гидрофобных взаимодействий в образовании агрегатов и свидетельствуют, что при подборе полимеров-структуров следует учитывать их взаимодействие не с глинистыми минералами, а почвенными гелями, которые включают в себя глинистые минералы и гуминовые вещества.

*Ключевые слова:* водная эрозия почв, критическая скорость водного потока, гидрофобные связи, воздушно-сухие и влажные почвы, почвенные полимерные мелиоранты.

### Введение

Водной эрозии в России подвержены 17,7% почв сельскохозяйственных угодий, 12% из них занимают пашни. Каждые пять лет доля эродированных земель возрастает на 6–7% или до 1,5 млн га при пересчете на год [Глушко, Фролко, 2012]. Все это обуславливает значимость изучения эрозионных процессов и поиск путей повышения эрозионной стойкости почв.

Существуют агрономический и геоморфологический подходы к концепции эрозии [García-Ruiz et al., 2017]. Первый оценивает потерю плодородия сельскохозяйственных угодий, а второй изучает процессы отделения, переноса и отложения частиц.

Объединяет эти направления то, что почвенные частицы воспринимают как неделимые водоустойчивые образования, перенос которых требует разрыва межагрегатных связей.

Упрощенное понимание строения почвенных агрегатов приводит к тому, что эрозионную стойкость почв характеризуют двумя переменными: размером водопрочных агрегатов и сцеплением их друг с другом [Кузнецов, Глазунов, 2019]. Другие параметры, такие как содержание органического вещества, гранулометрический состав, степень насыщенности основаниями и другие показатели [Tisdall, Oades, 1982; Márquez et al., 2004; Totsche et al., 2018], влияющие на противозерозионную стойкость через размер водопрочных агрегатов и межагрегатное сцепление

[Кузнецов, Глазунов, 2019]. При этом единые представления о механизме устойчивости почв к водной эрозии пока не сформированы.

Сложность исследования механизма эрозионной стойкости заключается в разнообразии почвенных свойств, которые влияют на получаемый результат. Поэтому проблема проведения опытов сводится к получению образцов, которые отличаются только по своей эрозионной стойкости.

Для изменения эрозионной стойкости образца удобно использовать полимеры-структурообразователи [Кузин и др., 2013]. Они упрочняют агрегаты, улучшая эрозионную стойкость почв [Panova et al., 2021]. При варьировании доз одного полимера или одинаковых дозах разных полимеров из одной почвы получается набор образцов, сходных по своим характеристикам, но в различной мере подверженных водной эрозии.

В модельных опытах устойчивость почв к действию воды часто характеризуют путем определения на гидрлотке критической скорости смыва [Кузнецов, Глазунов, 2019] или расчета донной размывающей скорости потока по формуле Кузнецова [Бабаев, Гурбанов, 2010], которая связывает эрозионную стойкость и водоустойчивость почв. При этом механизм возникновения данных свойств различен: водоустойчивость объясняют действием внутриагрегатных гидрофобных связей между гуминовыми веществами [Шейн, Милановский, 2014; Федотов и др., 2023], а эрозионную стойкость — размером водопрочных агрегатов и их сцеплением друг с другом [Кузнецов, Глазунов, 2019]. Природа межагрегатных связей, обеспечивающих эрозионную стойкость, остается неясной.

Цель работы состояла в уточнении механизма эрозионной стойкости почв путем проверки существования связи между устойчивостью почв к действию воды на гидрлотке и водоустойчивостью их агрегатов.

## Материалы и методы

**Материалы исследования.** В работе использовали образцы почв, отобранных из гумусово-аккумулятивных горизонтов:

- дерново-подзолистой (Московская область),
- чернозема выщелоченного (Орловская область).

При оценке взаимодействия полимеров с гуматами в водных растворах использовали водные препараты, приготовленные из гумата калия (натрия) из бурого угля ООО «Агротехнологии» (Россия).

К исследуемым образцам почв добавляли полимеры:

- ГИПАН (гидролизированный полиакрилонитрил),
- ГИПАН+ПДАДМАХ — смесь ГИПАНа и полидиаллилдиметиламмоний хлорида,
- полиакриламид (ПАА),

- полиэтиленгликоль (ПЭГ),
- поливиниловый спирт (ПВС),
- латекс,
- поливинилпирролидон,  $M = 45000\text{--}58000$  (К 17),
- поливинилпирролидон,  $M = 70000\text{--}90000$  (К 90).

**Методы исследования.** Определение эрозионной стойкости почв. Сопrotивляемость дерново-подзолистой почвы размывающему воздействию водных потоков проводили в модельных экспериментах на эрозионном гидрлотке. Лоток представляет собой устройство с замкнутым циклом водопотребления, предназначенное для определения величины смыва с поверхности почвенного образца при разных значениях характеристик водного потока. Расход воды в лотке может изменяться от 0 до  $5 \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$ . Опыты ведут при постоянной глубине потока в рабочей части лотка, равной 20 мм. Технические характеристики используемого гидравлического лотка обеспечивают следующие условия — входная часть лотка в 9 раз больше его ширины и в 40 раз больше глубины потока. Эти условия обеспечивают не изменяющийся во времени режим течения воды в лотке. Моделирование в лотке ведется в масштабе 1:1, т.е.  $\delta_L = 1$ , поэтому в соответствии с уравнением  $\delta_V = \delta_L^{0,5}$  критическая размывающая скорость водного потока  $\delta_V = 1$ , а коэффициент пересчета получаемой в результате моделирования размывающей скорости на натурные условия равен 1 [Кузнецов, Глазунов, 2019].

Для характеристики устойчивости почвы в интервале скоростей водного потока от  $0,05$  до  $0,40 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  рассчитывали показатель критической скорости смыва [Кузнецов, Глазунов, 2019]. Время проведения эксперимента при одной скорости составляло 6 часов. На основании полученных данных проводится графический анализ в обычных и логарифмических координатах.

Образцы представляли собой дерново-подзолистую почву, не обработанную почвенными полимерными мелиорантами (ППМ) (контроль), а также обработанную растворами ППМ (ГИПАН и ГИПАН+ПДАДМАХ) концентрацией 1% при дозах внесения 0,5%, 0,7%, 1% от веса образца.

**Определение водоустойчивости почвенных агрегатов.** Оценку водоустойчивости агрегатов образцов почвы проводили методом «лезвий», подробно описанным в работах [Ушкова и др., 2023; Федотов и др., 2023].

При подготовке образцов почвы их высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сита, отбирая агрегаты диаметром 4,5–5 мм.

В ходе измерения воздушно-сухие агрегаты помещали в кассету, представляющую собой три пары алюминиевых уголков, в нижних частях которых размещены фитили из хлопчатобумажной ткани. В алюминиевые уголки на фитили укладывали по

14 почвенных агрегатов так, чтобы они касались друг друга. Посредством вакуумирования удаляли из агрегатов воздух в течение 15 минут при разрежении 15 кПа.

После увлажнения агрегатов в вакууме кассету извлекали из эксикатора и помещали в расположенную на весах емкость с водой таким образом, чтобы фитили агрегатов обеспечивали сохранение насыщения агрегатов водой, достигнутое на этапе вакуумирования. Затем на линейно расположенные агрегаты помещали устройство, представляющее собой два параллельно расположенных лезвия, закрепленные на площадке, на которую устанавливали стаканчик с мерной шкалой. Добавляя песок в стаканчик, повышали нагрузку на агрегаты, которую фиксировали при помощи весов. Луч лазера, закрепленный на другом штативе, направленный на мерную шкалу стаканчика, позволял хорошо контролировать процесс разрушения агрегатов.

С целью стандартизации получаемых данных рассчитывали предельное сопротивление разрушения агрегатов. Экспериментально определяемую нагрузку в граммах выражали в миллиньютонах (мН). Для получения удельной характеристики нагрузку делили на общее количество агрегатов в повторности — 28 штук.

Эксперименты проводили в шестикратной повторности с последующим расчетом доверительных интервалов при 95% доверительной вероятности.

Для дополнительной проверки роли гидрофобных взаимодействий в формировании устойчивости почв к действию воды чернозем выщелоченный,

не подвергавшийся высушиванию, обработали полимерами разной степени гидрофобности: ПЭГ, ПАА, ПВС. Для этого на каждый агрегат наносили по 10 мкл полимера с концентрацией  $0,02 \text{ г} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$  раствора. Далее образцы в чашках Петри помещали в эксикатор, выдерживали в течение недели, а затем оценивали их водоустойчивость методом «лезвий».

*Определение размера частиц в растворах гумата с полимерами.* Метод лазерной дифрактометрии использовали для изучения размера частиц в растворах гуматов с полимерами.

Процедура подготовки образца включала приготовление раствора смеси гумата из бурого угля и полимера с соотношением по концентрациям 5:1 соответственно ( $0,1 \text{ г} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$  гумата и  $0,02 \text{ г} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$  полимера).

Размеры частиц в суспензиях определяли при помощи лазерного дифрактометра.

*Оценка эффективности полимеров при их внесении во влажные и воздушно-сухие почвы.* Исследования проводили на черноземе выщелоченном.

Для влажных образцов на каждый агрегат чернозема влажностью 31% из пипетки наносили по 10 мкл полимерного состава с концентрацией  $0,02 \text{ г} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$  раствора. Затем образцы помещали в эксикатор и выдерживали неделю над насыщенными парами воды.

Для воздушно-сухих образцов на каждый агрегат чернозема из пипетки наносили по 10 мкл полимерного состава с концентрацией  $0,02 \text{ г} \cdot 100 \text{ г}^{-1}$  раствора. Затем образцы помещали в эксикатор и выдерживали неделю над насыщенными парами

Таблица 1

Изменение интенсивности смыва дерново-подзолистой почвы ( $q, \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ) от величины размывающей скорости потока ( $V, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ), а также дозы и вида почвенного полимерного мелиоранта

$V, \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	$q, \text{ г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$						
	К	ГИПАН			ГИПАН + ПДАДМАХ		
		0,5%	0,7%	1,0%	0,5%	0,7%	1,0%
0,05	0,37	0,25	0,11	0,04	0,16	0,10	0,05
0,10	1,61	0,99	0,73	0,16	0,70	0,44	0,22
0,15	3,53	2,58	0,60	0,19	0,73	0,49	0,23
0,20	68,86	14,20	5,07	2,79	1,00	0,86	0,65
0,25	202,82	60,21	27,43	13,13	2,25	2,40	1,63
0,30	260,11	206,07	86,36	36,95	6,32	6,06	4,85
0,40	337,84	330,66	118,60	62,75	39,97	19,05	11,72
Критическая размывающая скорость ( $V_{кр}$ ), $\text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$	0,11	0,13	0,15	0,19	0,20	0,21	0,35
Водоустойчивость, мН/агрегат	20,72±0,43	22,88±0,44	24,69±0,31	26,21±0,28	26,33±0,49	26,97±0,81	29,70±0,55

Примечание:  $V$  — скорость потока;  $q$  — интенсивность смыва почвы; К — контроль; доза внесения почвенного полимерного мелиоранта: 0,5%; 0,7%; 1,0% от объема почвы в лотке.

воды. Перед определением водоустойчивости эти образцы высушивали.

Оценку водоустойчивости образцов проводили методом «лезвий».

### Результаты

*Влияние почвенных полимерных мелиорантов на эрозионную стойкость почв.* Для получения образцов с разной эрозионной стойкостью изучено влияние дозы внесения почвенных полимерных мелиорантов (ППМ) на интенсивность смыва и критическую размывающую скорость водного потока. Результаты опытов представлены в таблице (табл. 1). Для примера расчета интенсивности смыва и критической размывающей скорости приведены графики для контроля — дерново-подзолистой почвы, не обработанной полимерами (рис. 1, 2).

Среди изученных полимеров и доз их внесения наименьшая величина интенсивности смыва получена при обработке почвы препаратом ГИПАН + ПДАДМАХ в дозе 1% —  $11,72 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . Наибольшая величина интенсивности смыва отмечена при внесении 0,5% дозы ГИПАНа —  $330,66 \text{ г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ . В результате внесения полимеров

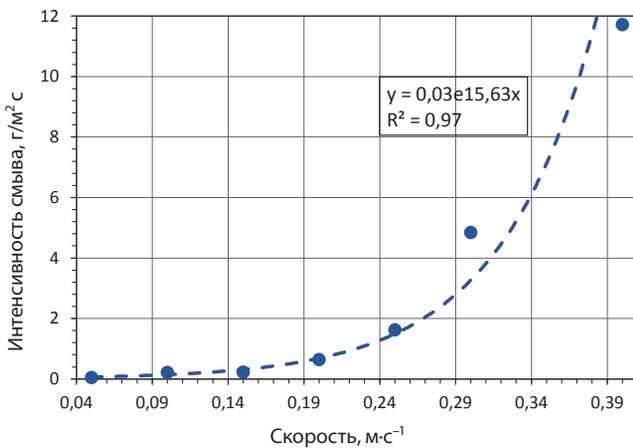


Рис. 1. Зависимость интенсивности смыва дерново-подзолистой почвы от скорости водного потока

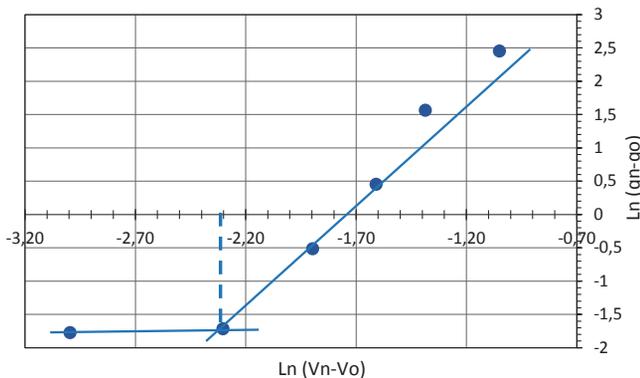


Рис. 2. Зависимость интенсивности смыва дерново-подзолистой почвы от скорости водного потока в логарифмических координатах

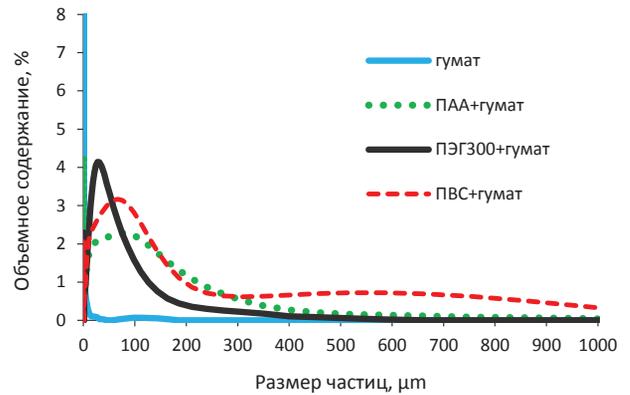


Рис. 3. Распределение частиц по размеру в растворах гуматов с полимерами

получен набор образцов с разной эрозионной стойкостью (табл. 1).

*Влияние почвенных полимерных мелиорантов на водоустойчивость почв.* С помощью метода «лезвий» была оценена водоустойчивость тех же образцов, обработанных полимерами и их составами (см. табл. 1).

Среди изученных полимеров и доз их внесения наибольшая величина водоустойчивости получена при обработке почвы ГИПАН+ПДАДМАХ в дозе 1% — 29,7 мН/агрегат. Наименьшая величина водоустойчивости отмечена при внесении 0,5% дозы ГИПАНа — 22,88 мН/агрегат.

*Оценка размеров частиц в растворах гуматов с полимерами различной гидрофобности.* При оценке размеров частиц в растворах гумата с полимерами разной степени гидрофобности (ПЭГ, ПАА, ПВС) получили график распределения частиц по размеру (рис. 3).

Наибольший размер частиц характерен при взаимодействии гумата с самым гидрофобным среди изученных полимеров — ПВС.

*Оценка водоустойчивости почв, обработанных полимерами различной гидрофобности.* При изучении водоустойчивости почв, обработанных полимерами различной гидрофобности, установлено, что наиболее устойчивые агрегаты формируются в варианте с обработкой ПВС — 34,38 мН/агрегат, а наименее устойчивые в варианте с ПЭГ — 23,87 мН/агрегат (табл. 2).

Таблица 2

#### Влияние внесения полимеров на водоустойчивость почвенных агрегатов чернозема влажностью 31%

Полимер	Водоустойчивость, мН/агрегат
Контроль	24,11±0,54
ПЭГ 300 0,02 г·100 г <sup>-1</sup>	23,87±0,59
ПАА 0,02 г·100 г <sup>-1</sup>	28,60±1,03
ПВС 0,02 г·100 г <sup>-1</sup>	34,38±1,19

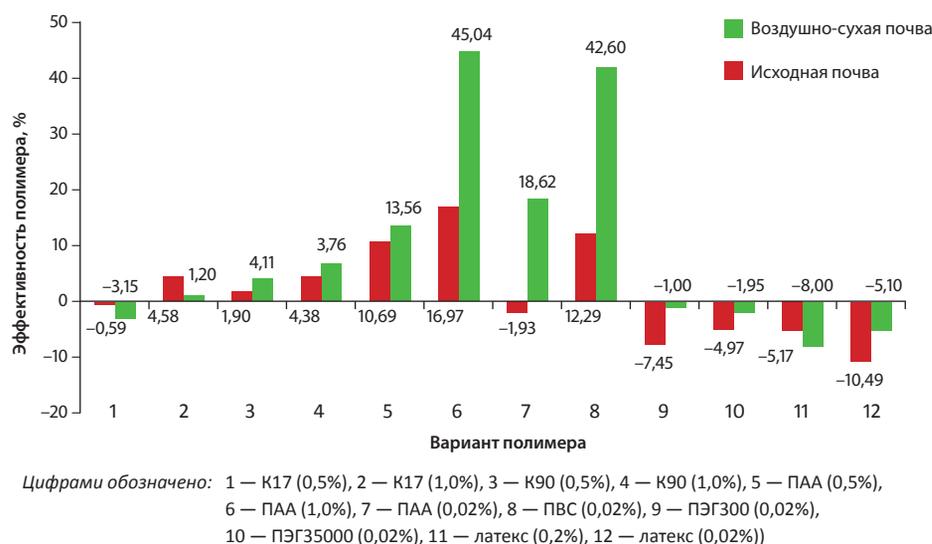


Рис. 4. Влияние внесения полимеров на водоустойчивость чернозема: исходного с влажностью 31% и воздушно-сухого

Оценка водоустойчивости сухих и влажных почв, обработанных полимерами. Оценили влияние на водоустойчивость внесения полимеров в чернозем: воздушно-сухой и не подвергавшийся высушиванию. Результаты представлены на гистограмме (рис. 4).

Наибольшее увеличение водоустойчивости отмечено для вариантов ПАА (1,0%) и ПВС (0,02%). Водоустойчивость почв, обработанных этими полимерами, возросла на 45,04 и 42,60% соответственно. Однако такая величина эффектов отмечена только для влажных почв. На воздушно-сухих образцах почв эффективность использования этих полимеров снижается более чем в два раза.

### Обсуждение

Механизм эрозионной стойкости почв. При оценке корреляции между методом гидрлотка и методом «лезвий» (см. табл. 1) была обнаружена экс-

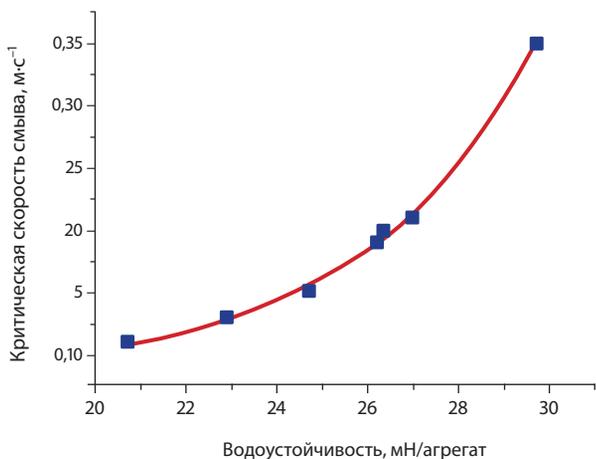


Рис. 5. Взаимосвязь критической скорости смыва для дерново-подзолистой почвы с ее водоустойчивостью

поненциальная зависимость (рис. 5), коэффициент корреляции которой равен 99 %.

С позиции существующих представлений водоустойчивость и эрозионная стойкость почв связаны между собой [Кузнецов, Глазунов, 2019], но имеют разные механизмы.

Водоустойчивость почв определяется внутри-агрегатными связями между гуминовыми веществами, формирующими органоминеральные гели [Шейн, Милановский, 2014; Федотов и др., 2023], а эрозионная устойчивость — размером агрегатов и межагрегатными связями [Кузнецов, Глазунов, 2019]. Использование одной почвы, обработанной разными полимерами, сохраняет единый агрегатный состав и позволяет оценивать роль межагрегатных связей в формировании эрозионной стойкости.

Наличие коэффициента корреляции 99% дает возможность предположить единство природы агрегатных связей, формирующих эти свойства. Эта гипотеза находит подтверждение в литературе [Холодов, 2013]: в циклах увлажнения–высушивания агрегаты демонстрировали способность к формированию более крупных водоустойчивых отдельных. Возможность самоорганизации агрегатов свидетельствует об идентичности внутри- и межагрегатных связей.

Подбор ППМ как способ уточнения типа агрегатных связей. Построение графика корреляции между методом гидрлотка и методом «лезвий» (см. рис. 5) в полулогарифмических координатах позволяет получить удобную для практической работы линейную зависимость калибровочной кривой (рис. 6). В результате время оценки эрозионной стойкости почв с помощью метода «лезвий» сокращается примерно в 20–30 раз по сравнению с определением критической скорости смыва. Исходя из этого для

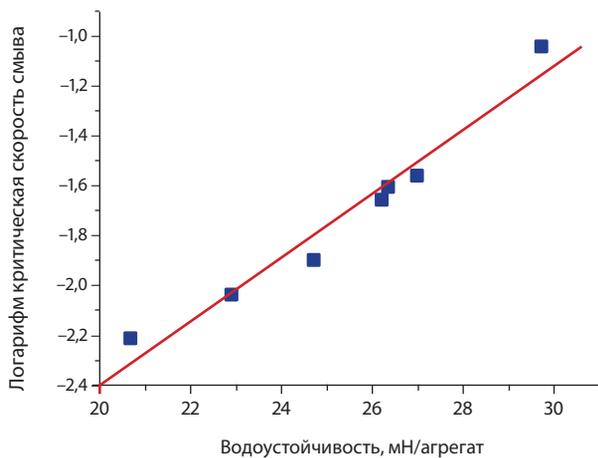


Рис. 6. Калибровочная кривая для выбора полимеров, повышающих критическую скорость эрозионного смыва дерново-подзолистой почвы

повышения производительности труда при подборе полимерных композиций для выбранной почвы можно предложить двухэтапную схему экспериментов:

1. Проведение экспериментов на эрозионном гидрлотке и параллельное определение водоустойчивости на тех же почвенных образцах для получения калибровочной кривой.
2. Подбор ППМ путем определения водоустойчивости обработанных образцов и анализ результатов с помощью калибровочной кривой.

Текущие представления о водоустойчивости отводят ведущую роль в формировании этого свойства гидрофобным связям, источником которых выступает органическое вещество почв [Шейн, Милановский, 2014; Федотов и др., 2023; Piccolo, Mbagwu, 1999].

Согласно работам ряда исследователей [Senesi, Wilkinson, 2008; Angelico et al., 2023], органическое вещество в почвах имеет многоуровневую организацию: частицы-молекулы гуминовых веществ объединяются во фрактальные кластеры, которые формируют надмолекулярные образования. Взаимодействие надмолекулярных образований между собой и глинистыми минералами формирует органо-минеральные почвенные гели.

Повсеместное распространение почвенных гелей, показанное в 50-х годах XX в. [Тюлин, 1958], не нашло применения в практических исследованиях по повышению эрозионной стойкости почв. На протяжении десятилетий в качестве «мишени» — объекта в почве, с которым взаимодействует структурообразователь, — при подборе почвенных полимерных мелиорантов используют глинистые минералы [Ревут и др., 1973; Кульман, 1982; Кузин и др., 2013; Panova et al., 2021].

Однако проведенные эксперименты по взаимодействию гуматов с полимерами показывают

(см. рис. 3), что увеличение гидрофобности полимера приводит к укрупнению частиц в растворах с гуматами. При этом водоустойчивость почв с увеличением гидрофобности полимеров также возрастает. Полученные результаты подтверждают роль гидрофобных взаимодействий при образовании агрегатов и свидетельствуют, что полимеры в почве взаимодействуют не просто с глинистыми минералами, а с почвенными гелями, которые включают в себя глинистые минералы и гуминовые вещества.

Использование почвенных гелей в качестве «мишени» подводит к вопросу о влажности почвенных образцов при внесении в них полимерных композиций. Ведь с изменением влажности почв происходят изменения в свойствах гелей [Федотов и др., 2023а]. Это отражается на гидрофильно-гидрофобных свойствах почв [Потапов, 2022] и может влиять на закрепление полимерных композиций.

Для ответа на этот вопрос решили оценить влияние на водоустойчивость внесения полимеров в чернозем: воздушно-сухой и не подвергавшийся высушиванию. На полученных гистограммах видны отличия в значениях водоустойчивостей между воздушно-сухими образцами и образцами естественной влажности, обработанными одними и теми же полимерными составами (см. рис. 4). Наибольшие отличия — до 30% — между эффективностью внесения полимеров в сухие и влажные почвы наблюдаются для вариантов ПАА 1,0% и ПВС 0,02%. Разница в эффективности полимеров при их внесении в сухие и влажные почвы говорит о том, что при подборе ППМ следует использовать образцы почв, не подвергавшиеся высушиванию.

## Заключение

Корреляция результатов между определением водоустойчивости методом «лезвий» и эрозионной стойкости почвы методом критической скорости смыва находится на уровне 99%.

Водоустойчивость и эрозионная стойкость почв определяются гидрофобными взаимодействиями в органическом веществе почв.

Наибольшее увеличение водоустойчивости — на 45,04 и 42,60% — отмечено при обработке влажных почв ПАА 1,0% и ПВС 0,02% соответственно. Величина эффектов для воздушно-сухих почв для этих вариантов снижалась до 30%.

## Информация о финансировании работы

Работа выполнена за счет финансирования, выделенного на цели функционирования Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ имени М.В. Ломоносова (распоряжение Правительства РФ № 1736-р от 26.06.2021).

## СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабаев М.П., Гурбанов Э.А. Противозероизионная стойкость орошаемых почв Азербайджанской Республики // Почвоведение. 2010. № 12.
2. Глушко А.Я., Фролко Д.С. Особенности управления эродированными земельными ресурсами Юга России // Terra economica. 2012. Т. 10, № 3–2.
3. Кузин Е.Н., Арефьев А.Н., Кузина Е.Е. Изменение плодородия почв. Пенза, 2013.
4. Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв: Учебник для вузов, 3-изд., испр. и доп. М., 2019.
5. Кульман А. Искусственные структурообразователи почвы. М., 1982.
6. Потапов Д.И. Влияние влажности на гидрофильно-гидрофобные свойства почв различных типов // Экологический вестник Северного Кавказа. 2022. Т. 18, № 1.
7. Ревут И.Б., Масленкова Г.Л., Романов И.А. Химические способы воздействия на испарение и эрозию почвы. Л., 1973.
8. Тюлин А.Ф. Органо-минеральные коллоиды в почве, их генезис и значение для корневого питания высших растений. М., 1958.
9. Ушкова Д.А., Конкина У.А., Горепекин И.В. и др. Устойчивость агрегатов пахотных почв: экспериментальное определение и нормативная характеристика // Почвоведение. 2023. № 2.
10. Федотов Г.Н., Шеин Е.В., Ушкова Д.А. и др. Надмолекулярные образования из молекул гуминовых веществ и их фрактальная организация // Почвоведение. 2023а. № 8.

11. Федотов Г.Н., Шоба С.А., Ушкова Д.А. и др. Природа связей в формировании водоустойчивости почвенных агрегатов // Доклады РАН. Науки о земле. 2023б. Т. 513, № 2.

12. Холодов В.А. Способность почвенных частиц самопроизвольно образовывать макроагрегаты после цикла увлажнения и высушивания // Почвоведение. 2013. № 6.

13. Шеин Е.В., Милановский Е.Ю. Органическое вещество и структура почвы: учение В.Р. Вильямса и современность // Известия ТСХА. 2014. № 1.

14. Angelico R., Colombo C., Di Iorio E. et al. Humic substances: from supramolecular aggregation to fractal conformation – Is there time for a new paradigm? // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, № 4.

15. García-Ruiz J.M., Beguería S., Lana-Renault N. et al. Ongoing and emerging questions in water erosion studies // Land Degradation & Development. 2017. Vol. 28, № 1.

16. Márquez C.O., García V.J., Cambardella C.A. et al. Aggregate-Size Stability Distribution and Soil Stability // Soil Sci. Soc. of Am. J. 2004. Vol. 68, № 3.

17. Panova I.G., Demidov V.V., Shulga P.S. et al. Interpolyelectrolyte complexes as effective structure-forming agents for Chernozem // Land Degradation & Development. 2021. Vol. 2, № 2.

18. Piccolo A., Mbagwu J.S. C. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability // Soil Sci. Soc. of Am. J. 1999. Vol. 63, № 6.

19. Senesi N., Wilkinson K.J. Biophysical chemistry of fractal structures and processes in environmental systems. John Wiley & Sons. 2008.

20. Tisdall J.M., Oades J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils // J. Soil Sci. 1982. № 33.

21. Totsche K.U., Amelung W., Gerzaber M.H. et al. Microaggregates in soils // J. of Plant Nutr. and Soil Sci. 2018. Vol. 181, № 1.

Поступила в редакцию 05.02.2024

После доработки 24.04.2024

Принята к публикации 06.05.2024

## THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MECHANISMS OF FORMATION OF EROSION RESISTANCE AND SOIL WATER STABILITY

**G. N. Fedotov, D. A. Tarasenko, V. V. Demidov, I. V. Gorepekin,  
M. N. Egorova, A. I. Sukharev**

Kuznetsov's formula relates the parameters of erosion resistance and soil water stability. However, the mechanism of occurrence of these properties is different: water stability is explained by the action of intra-aggregate hydrophobic bonds in organomineral soil gels, and erosion resistance is explained by water stable aggregates and their adhesion to each other. At the same time, the nature of the interaggregate bonds that ensure erosion resistance remains unclear. The purpose of the work was to clarify the mechanism of erosion resistance of soils and compare it with the mechanism of formation of water stability. The work used samples of humus-accumulative soil horizons: sod-podzolic and leached chernozem. To obtain samples with the same aggregate composition, but differing in erosion resistance, it is proposed to use soil polymer ameliorants (SPM). The erosion resistance of soils was determined on a hydroplotter and the critical rate of flushing was calculated. The water stability of the soils was assessed by the blade method. The particle size in the solutions was estimated by laser diffractometry. It was found that on soils treated with SPM, the results of the tray and blade methods correlate by 99%. The high correlation suggests a common nature of intra- and interaggregate bonds. To test the role of hydrophobic interactions in the formation of aggregates resistant to water, polymers of varying degrees of hydrophobicity were added to aqueous humate solutions in a model experiment: polyethylene glycol (PEG), polyacrylamide (PAA) and polyvinyl alcohol (PVA). In parallel, the water stability of soils treated with PEG, PAA and PVA was evaluated. The analysis of the results showed that the greatest water stability of the aggregates was noted when the most hydrophobic polymer, polyvinyl alcohol, was added to the soil, which formed the largest particles when interacting with humate in the model experiment. These results confirm the role of hydrophobic interactions in the formation of aggregates and indicate that when selecting polymer structures, their interaction should be taken into account not with clay minerals, but with soil gels, which include clay minerals and humic substances.

*Keywords:* water erosion of soils, critical velocity of water flow, hydrophobic bonds, air-dry and wet soils, soil polymer ameliorants.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Федотов Геннадий Николаевич**, докт. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: gennadiy.fedotov@gmail.com

**Тарасенко Дарья Александровна**, инженер кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: ushkova\_dasha@mail.ru

**Демидов Валерий Витальевич**, докт. биол. наук, профессор кафедры эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: demidov951@yandex.ru

**Горепекин Иван Владимирович**, науч. сотр. Евразийского центра по продовольственной безопасности МГУ имени М.В. Ломоносова, инженер факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: decembrist96@yandex.ru

**Егорова Маргарита Николаевна**, студентка кафедры эрозии и охраны почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: emn1003@yandex.ru

**Сухарев Алексей Игоревич**, студент кафедры географии почв факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова,  
e-mail: suharevai@my.msu.ru