

УДК 502/504:631.459.22

М. С. ЗВЕРЬКОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## КАПЕЛЬНАЯ ЭРОЗИЯ КАК ФАКТОР НАРУШЕНИЯ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ ОРОШАЕМЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ

*Изложены элементы лабораторной методики исследования капельной эрозии почв. Представлен анализ результатов опытов с аллювиальными почвами орошаемых агроландшафтов.*

*Деградация почв, эрозия, почва, капельная эрозия, крупность дождя.*

*The elements of the laboratorial method of raindrop erosion researching are stated. There is given an analysis of the research results of alluvial soils of irrigated lands.*

*Soil degeneration, erosion, soil, raindrop erosion, raindrop size.*

В рамках федеральной целевой программы «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы» к первому уровню приоритетов относится мелиорация земель сельскохозяйственного назначения и повышение плодородия почв [1]. При этом одной из важнейших задач является охрана сельскохозяйственных угодий от водной эрозии. В мелиорации ведущая роль принадлежит ирригационной форме эрозии поверхностным стоком. Ранее было показано, что такая форма представляет собой следующую после капельной стадию эрозии, при которой происходит разрушение структурных агрегатов, их разбрызгивание, кольятация, снижение водопроницаемости и стимулирование других видов деградации почв [2, 3]. Однако капельная эрозия при дождевании недостаточно изучена [4]. Поэтому актуальными являются дополнительные исследования этого вида деградации почв.

Автор исследовал явление капельной эрозии на установке, показанной на рисунке 1. Сосуд Мариотта позволяет обеспечить постоянную скорость истечения капель, несмотря на понижение уровня воды. Для образования капель использовались иглы (инъекторы) с внутренними диаметрами 0,060 (34G), 0,110 (32G), 0,365 (23G) и 0,410 (22G) мм, с помощью которых получены капли диаметром 1,73, 1,96, 2,32 и 2,73 мм соответственно. Капли падали с высоты 1,0; 1,5; 2,0 и 2,5 м. Эрозии подвергались образцы модельных почвогрунтов с содержанием гумуса 0%, по гранулометрическому составу супеси и легкие суглинки. Исследовались образцы следующего фракционного состава:

3,0...1,0; 1,0...0,5; 0,5...0,25; 0,25...0 мм. Контроль – образец, состоящий из смеси равных долей анализируемых фракций. Для исключения влияния химического состава капель использовалась дистиллированная вода, подготовленная по ГОСТ 6709–72. Образцы увлажнялись до уровней 0,4 НВ (наименьшей влагоемкости), 0,7 НВ, НВ и полной влагоемкости (ПВ). В качестве параметра, характеризующего интенсивность капельной эрозии, в опыте принято максимальное расстояние разлета  $s$  почвенных частиц, которое регистрировалось от одиночного воздействия капли на почву данного уровня влажности. Повторность опыта пятикратная.

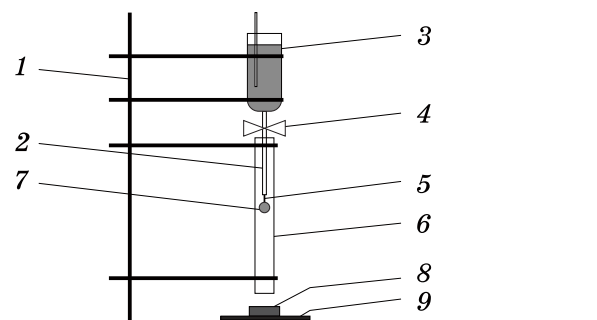


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – штатив; 2 – трубка; 3 – сосуд Мариотта; 4 – вентиль; 5 – инъектор; 6 – защитный кожух; 7 – капля; 8 – почвенный образец; 9 – мишень

Размеры капель дождя были выбраны исходя из следующих соображений. Установлено, что средний диаметр капель искусственного дождя не должен превышать 1,5...2,0 мм. По сложившемуся мнению, орошение в этом случае не вызывает разрушения структуры почвы. Однако современ-

ные дождевые капли образуют капли размером 1...5 мм [5]. Причем на границах контура факела распыла фиксируют крупные капли, оказывающие повышенное гидродинамическое воздействие на почву и растения. Но даже капли 1,2...1,64 мм могут оказать существенное влияние на процесс эрозии [6].

Общее число исследованных образцов составило 4000. Использование модельных почвогрунтов позволило рассмотреть процесс разбрызгивания без учета влияния содержания питательных веществ. В результате регрессионного анализа получены выражения:

$$s = - 4,8 + \exp(- 0,08 + 0,55 h + 0,64 d_d + 0,88 w), R^2 = 0,93 \pm 0,05; \quad (1)$$

$$s = - 5,23 + \exp(- 0,13 + 0,5 h + 0,62 d_d + 0,87 w), R^2 = 0,97 \pm 0,02, \quad (2)$$

где  $s$  – расстояние разлета частиц, см;  $h$  – высота падения капель, м;  $d_d$  – диаметр капель, мм;  $w$  – влажность образца, в долях НВ.

Коэффициент детерминации  $R^2$  свидетельствует о высокой точности подбора уравнений множественной регрессии. Выражение (1) соответствует разлету частиц супеси, (2) – суглинка. Коэффициент корреляции  $r$  между расстоянием  $s$  и величинами  $h$ ,  $d_d$  и  $w$  составляет соответственно:  $0,53 \pm 0,11$ ;  $0,49 \pm 0,12$ ;  $0,6 \pm 0,1$ ; связь прямая. Корреляция между регрессорами  $h$ ,  $d_d$  и  $w$  отсутствует. Установлено достоверное влияние  $h$ ,  $d_d$  и  $w$  на величину  $s$  (уровень значимости  $p < 0,0001$ ).

При регрессионном анализе из выборки исключены показатели разлета при полной влагоемкости, так как в практике орошаемого земледелия для недопущения появления поверхностного стока поливные нормы рассчитываются с учетом достижения почвой наименьшей влагоемкости. Величина  $w$  в выражениях (1) и (2) изменяется от 0 до наименьшей влагоемкости.

Исследования показали, что максимальный разлет частиц наблюдается при достижении модельными образцами наименьшей влагоемкости. Наиболее уязвима к капельной эрозии фракция 0,25...0 мм, наиболее устойчива – фракция 3,0...1,0 мм. Максимальное расстояние разлета частиц  $s = 59,3 \pm 0,6$  см (при  $h = 2,5$  м,  $d_d = 2,73$  мм и  $w = НВ$ ) отмечено у фракции 0,25...0 мм. У контрольных образцов при тех же условиях  $s = 46,4 \pm 0,4$  см. Затем при возрастании влажности до полной влагоемкости величина  $s$  снижается (на всех вариантах  $s d_d = 1,73$  мм при полной влагоемкости разлет не регистрировался). Вероятно, это связано с тем, что при заполнении пор водой механизм эрозии постепенно меняется. Полученные расстояния разлета согласуются с данными Г. В. Добровольского и Л. А. Гришиной, установивших, что капли дождя способны разрушить и разбрызгать почвенные частицы до 50...60 см [7]. Р. С. Ekern и R. J. Muckenhirn отмечают, что от воздействия капель частицы песка разбрызгивались в высоту до 60 см и на расстояние до 1,5 м и более [8].

Такой процесс был характерен и для образцов почв из орошаемых хозяйств Коломенского района Московской области. Это аллювиальная агротемногумусовая глееватая супесчаная почва (PU–AUg–Cg<sup>-</sup>–Cca) фермерского хозяйства «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.» и аллювиальная агрогумусовая (дерновая) легкосуглинистая почва (P–AY–C<sup>-</sup>) ЗАО «Акатьевский». Наименование горизонтов давалось по методике Почвенного института имени В. В. Докучаева. Точечные пробы отбирались в трехкратной повторности в трех местах по периферии орошаемых участков из агротемногумусового (PU) и агрогумусового (P) горизонтов по ГОСТ 28168–89 с глубины 5...10 см. Физические и химические свойства образцов почв приведены в таблице.

**Физические и химические свойства почв**

Горизонт, гранулометрический состав	№ образца	НВ, %	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/100 г почвы	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/100 г почвы	N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/100 г почвы	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г почвы	K <sub>2</sub> O, мг/100 г почвы	pH <sub>H2O</sub>	Eh, мВ
Супесь, PU	1	8,03 ± 0,20	14,14 ± 0,13	1,82 ± 0,02	0,08 ± 0,01	7,38 ± 0,03	8,18 ± 0,06	6,77 ± 0,03	139 ± 1
	2	9,60 ± 0,27	12,25 ± 0,13	2,10 ± 0,01	0,07 ± 0,01	8,23 ± 0,05	5,40 ± 0,02	7,12 ± 0,05	158 ± 1
	3	11,61 ± 0,27	24,96 ± 0,08	2,35 ± 0,03	0,14 ± 0,02	4,24 ± 0,05	4,28 ± 0,03	6,92 ± 0,01	140 ± 3
Легкий суглинок, P	1	18,09 ± 0,23	25,76 ± 0,15	0,87 ± 0,01	0,22 ± 0,01	6,67 ± 0,07	5,20 ± 0,11	6,97 ± 0,02	144 ± 2
	2	15,34 ± 0,16	32,34 ± 0,09	2,03 ± 0,01	0,18 ± 0,01	6,10 ± 0,03	4,13 ± 0,16	7,10 ± 0,03	170 ± 3
	3	19,78 ± 0,12	41,83 ± 0,07	1,14 ± 0,03	0,11 ± 0,01	5,27 ± 0,09	4,55 ± 0,07	7,25 ± 0,02	158 ± 1

Примечания: гранулометрический состав определен по Н. А. Качинскому; НВ – по В. Е. Кабаеву; обменные N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и N-NO<sub>2</sub><sup>-</sup> – колориметрически; подвижные соединения P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O – по А. Т. Кирсанову; pH<sub>H2O</sub> – по ГОСТ 26483–85; Eh – потенциметрически.

В рассматриваемых почвах, согласно значениям Eh, наблюдались резко-восстановительные условия. При Eh < 200 мВ в почве повысилась концентрация закисных соединений железа и марганца в количествах, токсичных для растений [9]. Проведенные в 2012 году исследования на других участках в «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.» также указали на резко восстановительные условия [10]. Обеспеченность подвижными формами фосфора (4,24...8,23 мг/100 г почвы) и калия (4,13...8,18 мг/100 г почвы) была низкая и средняя [11]. Обеспеченность почвы минеральными формами азота (сумма NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) характеризовалась как высокая и очень высокая. Наиболее повышенное содержание отмечено в образцах из ЗАО «Акатьевский» (26,85...43,07 мг/100 г почвы), а в образцах из «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.» сумма минеральных форм азота составила 14,42...27,44 мг/100 г почвы. Реакция водной суспензии почв – нейтральная (6,77...6,97) и слабощелочная (7,10...7,25).

В хозяйствах реализована технология орошения дождеванием картофеля сорта «ред скарлетт». В «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.» для этих целей используют машины фронтального действия Т-Л (производства США), в ЗАО «Акатьевский» – ДДА-100МА.

Для мелиоративных машин была определена крупность дождя как медианный диаметр капель  $d_m$  по отпечаткам на обеззоленной фильтровальной бумаге у границы факела распыла по методике В. Д. Воркова [12, 13]. Медианный диаметр капель как характеристика искусственного дождя предложен В. И. Городничевым. В оригинальной методике при госиспытаниях дождевальной техники  $d_m$  определяют по 8000 каплям [14]. Поскольку необходимая для измерений электронная аппаратура отсутствовала, в данном исследовании медианный диаметр определен по существенно упрощенной методике. Для дождеобразующего устройства у концевой тележки Т-Л  $d_m$  составляет 1,7 мм, для участка консоли у периферии поля ДДА-100МА – 2,3 мм. У машины Т-Л дождеобразующие устройства расположены над почвой на высоте 1,5 м от

поверхности почвы, у ДДА-100МА – на высоте 2,0 м в точках отбора проб.

Почвенные образцы (150 шт.) также подвергались капельной эрозии с помощью установки (см. рис. 1). Повторность пятикратная. В результате получены уравнения регрессии для отдельных точек поля, определены коэффициенты регрессии с учетом содержания минеральных элементов:

$$s = - 3,6 + \exp(1,46 + 1,16 w),$$

$$R^2 = 0,97 \pm 0,02; \quad (3)$$

$$s = - 6,65 + \exp(2,21 + 0,98 w),$$

$$R^2 = 0,96 \pm 0,03. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации  $R^2$  свидетельствует о высокой точности подбора уравнений регрессии. Выражение (3) соответствует разлету частиц аллювиальной агротемногумусовой глееватой супесчаной почвы, (4) – разлету частиц аллювиальной агрогумусовой (дерновой) легкосуглинистой почвы. Коэффициент корреляции  $r$  между расстоянием  $s$  и  $w$  составляет  $0,96 \pm 0,04$  и  $0,98 \pm 0,01$  соответственно для супесчаной и легкосуглинистой почвы, связь тесная, прямая. Установлено достоверное влияние влажности на расстояние разлета (уровень значимости  $p = 0,001$ ). Однако расстояние  $s$  и наименьшая влагоемкость слабо коррелируют ( $r < - 0,1$ ). Поскольку корреляционная связь между расстоянием разлета и наименьшей влагоемкостью отрицательная, можно предположить, что с увеличением наименьшей влагоемкости разлет уменьшается, но статистически достоверного влияния наименьшей влагоемкости на  $s$  не установлено ( $p > 0,7$ ), вероятно, из-за рассмотрения узкого диапазона НВ. На рис. 2 приведены экспериментальные кривые разброса частиц почвы, построенные по выражениям (1)...(4).

Между параметрами разлета частиц модельных почвогрунтов и образцов почв из хозяйств существует тесная прямая корреляционная связь вероятно из-за исследования одного диапазона фракций (3,0...0 мм). Коэффициент корреляции  $r$  для супеси равен  $0,94 \pm 0,02$  ( $p = 0,03$ ), для суглинка –  $0,96 \pm 0,03$  ( $p = 0,02$ ). Однако образцы почв более устойчивы к капельной эрозии, что объясняется влиянием их органоминерального состава на процесс разрушения агрегатов (см. таблицу).

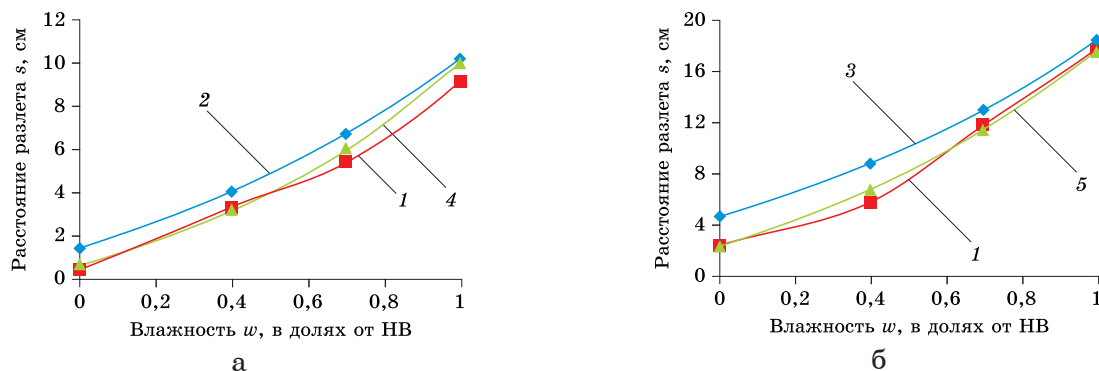


Рис. 2. Кривые разброса частиц почвы: а – образец 1, «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.»; б – образец 1, ЗАО «Акатъевский»; 1 – экспериментальная кривая; 2 – кривая разброса по выражению (1); 3 – кривая разброса по выражению (2); 4 – кривая разброса по выражению (3); 5 – кривая разброса по выражению (4)

### Выводы

Разлет частиц почвы при капельной эрозии зависит от гранулометрического состава почв, диаметра капель дождя и высоты их падения.

Расстояние разлета частиц возрастает с увеличением уровня влажности почвы до наименьшей влагоемкости, после чего происходит постепенное снижение разлета до полной влагоемкости.

Полученные зависимости расстояния разлета частиц могут быть использованы для расчета капельной эрозии, но с учетом органоминерального состава почв.

Результаты исследования капельной эрозии могут быть использованы хозяйствами при проектировании противоэрозионных мероприятий.

1. Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 – 2020 годы: Федеральная целевая программа. – URL: <http://mex.ru/navigation/docfeeder/show/342.htm> (дата обращения 21. 11. 13).

2. Зверьков М. С. Контроль устойчивости почв к капельной эрозии / Наука, инновации и международное сотрудничество молодых ученых-аграриев: материалы Международного научного форума. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2012. – С. 84–90.

3. Мапштаков Д. А. Теоретическое и экспериментальное обоснование комплексной мелиорации эродированных земель степной и сухостепной зон нижнего Поволжья: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. – Волгоград: ФГОУ ВПО «Волгоградская ГСХА», 2010. – 45 с.

4. Зверьков М. С. Исследование капельной эрозии почв / Инновационные технологии и экологическая безопасность в мелиорации: сб. науч. докладов Международной научной конференции молодых ученых и специалистов. – Коломна: ФГНУ ВНИИ

«Радуга», 2013. – С.75–76.

5. Городничев В. И. Методика оценки и технические средства контроля показателей режима и качества полива при госиспытаниях дождевальной техники / Ресурсосберегающие экологически безопасные системы орошения и сельхозводоснабжения: сб. трудов. – Коломна: ФГНУ ВНИИ «Радуга», 2002. – С. 78–83.

6. Алеев А. В., Шевцов Н. М., Соколова С. И., Чикирева Л. И. Агротехническо-эксплуатационная характеристика передвижного дождевального трубопровода «Хаски»: сб. науч. трудов ВНИИМ и ТП. – Коломна: ВНИИМ и ТП, 1973. – Ч. 4. – С. 114–128.

7. Добровольский Г. В., Гришина Л. А. Охрана почв. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 225 с.

8. Ekern P. C., Muckenhirn R. J. Water drop impact as a force in transporting sand // Soil science society proceedings. – 1947. – Vol. 12. – P. 441–44.

9. Ковда В. А. Основы учения о почвах. – М.: Наука, 1973. – 448 с.

10. Зверьков М. С. Капельное орошение на пойменных землях. // Приодообустройство. – 2012. – № 4. – С. 23–26.

11. Практикум по агрохимическому анализу почв: учеб. пособие / Под ред. К. Г. Крейера. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 2005. – 88 с.

12. Лебедев Б. М. Дождевальные машины. – М.: Машиностроение, 1977. – 222 с.

13. Снопич Ю. Ф. Совершенствование технических средств орошения дождеванием. – Новочеркасск: ООО «Геликон», 2007. – 110 с.

14. Городничев В. И. Методы и средства измерения характеристик дождя. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 150 с.

Материал поступил в редакцию 21.11.13.

Зверьков Михаил Сергеевич, аспирант  
E-mail: [mzverkov@bk.ru](mailto:mzverkov@bk.ru)