

М. С. Зверьков

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельскохозяйственного водоснабжения «Радуга», Коломна, Российская Федерация

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЯ НА РАЗБРЫЗГИВАНИЕ ПОЧВЫ

Цель исследования заключалась в установлении влияния величины эффективного давления капель искусственного дождя на массу разбрызганной почвы как параметра, характеризующего капельную эрозию. Всего исследовано 40 образцов почвы, которые подвергались разбрызгиванию от капель диаметром 1,73 и 2,73 мм, падавших с высоты 1,0–2,5 м с шагом 0,5 м (повторность пятикратная). В результате удара капли диаметром 1,73 мм при падении с высоты от 1,0 до 2,5 м медианное значение массы m разбрызганных частиц составило соответственно от 0 до $0,014 \pm 0,001$ г, при ударе капли 2,73 мм с высоты от 1,0 до 2,5 м – от $0,006 \pm 0,002$ до $0,021 \pm 0,006$ г соответственно (критическое значение критерия Стьюдента $t_\alpha = 2,776$ в каждой выборке меньше эмпирического t_e критерия Стьюдента 3,464–8,612, уровень значимости $p < 0,05$). Медианное значение эффективного давления p_e единичного удара капли диаметром 1,73 мм при падении с высоты от 1,0 до 2,5 м составило соответственно от $90,95 \pm 4,61$ до $168,60 \pm 3,52$ кПа, при ударе капли 2,73 мм с высоты от 1,0 до 2,5 м p_e составило от $114,92 \pm 1,80$ до $205,09 \pm 10,50$ кПа соответственно ($t_\alpha = 8,610 \ll t_e$ из [20,091; 61,278], $p < 0,001$). Выявлена статистическая значимость зависимости массы разбрызганных частиц от эффективного давления удара капель дождя ($t_\alpha = 5,041 \ll t_e$ из [19,140; 62,572], $p < 0,001$). Получено уравнение регрессии для определения массы m разбрызганных частиц почвы в зависимости от эффективного давления p_e единичного удара. Установлено, что чем большими диаметром d_d , высотой падения h и эффективным давлением p_e обладает капля, тем больше частиц почвы (m) она может разбрызгать. Отмечается важность предупредительных мер для снижения интенсивности капельной эрозии как условия предотвращения развития деградационных процессов почвы.

Ключевые слова: водная эрозия, капельная эрозия, капля, деградация почв, почва, дождь, давление дождя, разбрызгивание почвы, дождевание.

M. S. Zverkov

All Russian Scientific Research Institute “Raduga”, Kolomna, Russian Federation

NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF ARTIFICIAL RAINFALL EFFECTIVE PRESSURE ON SOIL SPLASH

The purpose of the study was to determine the effect of effective pressure magnitude of the artificial rain drops on the mass of splashed soil as a parameter characterizing splash erosion. A total of 40 soil samples were investigated, which were splashed from droplets with a diameter of 1.73 and 2.73 mm, falling from a height of 1.0–2.5 m in increments of 0.5 m (replication fivefold). As a result of the impact of a drop with a diameter of 1.73 mm, when falling from a height of 1.0 to 2.5 m, the median mass value m of the splashed particles was respectively from 0 to 0.014 ± 0.001 g; 0 to 2.5 m – from 0.006 ± 0.002 to 0.021 ± 0.006 g,

respectively (the critical value of the Student's t test $t_\alpha = 2.776$ in each sample is less than the empirical t_e Student's test 3.464–8.612, significance level p is less < 0.05). The median value of the effective pressure p_e of a single impact of a drop with a diameter of 1.73 mm when falling from a height of 1.0 to 2.5 m was respectively from 90.95 ± 4.61 to 168.60 ± 3.52 kPa; impact of a drop with a diameter 2,73 mm falling from a height of 1.0 to 2.5 m p_e was from 114.92 ± 1.80 to 205.09 ± 10.50 kPa, respectively ($t_\alpha = 8.610 \ll t_e$ from [20.091; 61.278], $p < 0,001$). The statistical significance of the dependence of the splashed particles mass on the effective pressure of the raindrops impact ($t_\alpha = 5.041 \ll t_e$ from [19.140; 62.572], $p < 0.001$) was revealed. A regression equation for determining the mass m of splashed soil particles depending on the effective pressure p_e of a single impact is obtained. It is determined that the larger diameter d_d , the fall height h and the effective pressure p_e a drop has, the more soil particles (m) it can spray. The importance of preventive measures to reduce the intensity of splash erosion as a condition to prevent the development of soil degradation processes is noted.

Keywords: water erosion, drip erosion, drop, soil degradation, soil, rain, rain pressure, soil splash, sprinkling.

Введение. По данным департамента мелиорации Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, в стране имеется более 385 млн га земель сельскохозяйственного назначения, в т. ч. 196 млн га – сельскохозяйственные угодья, среди которых около 130 млн га подвержены различным процессам деградации почв (т. е. более 60 %). Деградация земель в настоящее время представляет собой одну из важнейших социально-экономических проблем и создает угрозу экологической, экономической и в целом национальной безопасности России. Одним из видов деградации является водная эрозия почв, которой в 2015 г. было затронуто более 17,8 % сельхозугодий, и ветровая (дефляция) (8,4 %).

Так, из-за водной эрозии ежегодно на склоновых землях смывается до 6–10 т/га почвы, а в отдельные годы – 40–50 т/га, что приводит к недопустимым потерям гумуса почвы (до 0,7–1,5 т/га) и непродуктивному расходу воды и питательных элементов. При этом ежегодный недобор сельскохозяйственной продукции в результате эрозии в целом составляет 13,2 млн т [1], что по оценке РАН в денежном эквиваленте может достигать 18–25 млрд руб./год. В условиях набирающей популярность санкционной политики зарубежных стран нет другой альтернативы, кроме проведения мелиоративных мероприятий для обеспечения населения страны требуемыми объемами продукции растениеводства и одновременного

предотвращения выбытия земель из сельскохозяйственного оборота и возвращения их в оборот.

Нужно отметить, что мелиорированные земли, по данным Федеральной службы государственной статистики, на 1 января 2014 г. занимали около 5,6 % от общей площади пахотных угодий. Причем более 70 % всех сельскохозяйственных угодий и около 80 % пашни расположены в зонах недостаточного или неустойчивого увлажнения [2]. Кроме того, в 2016 г. в России фактически орошалось 3,88 млн га земель (не использовалось 16,7 % орошаемых земель). А находящийся на балансе в хозяйствах парк дождевальной техники способен реально обеспечить полив только на площади 0,8–0,9 млн га [3].

Эффективность орошения дождеванием во многом определяется качеством технологических процессов при проведении поливов, повысить которое можно, учитывая те явления, которые происходят при воздействии искусственного дождя на поливаемую площадь.

Дождевание должно обеспечить минимальные разрушение структуры и ухудшение водно-физических свойств орошаемой почвы при оптимальном качестве искусственных осадков. В случае несоблюдения данного требования масса смытой почвы при поливе этим способом может составлять до 20 т/га, причем ежегодная интенсивность восстановления почвенного слоя на мелиорируемых землях составляет не более 1–5 т/га. Иными словами, восстановление смытого почвенного слоя в результате ирригационной эрозии произойдет не ранее чем через 4–20 лет [4].

Согласно общепринятой в мелиорации практике, агротехнические требования к качеству дождя складываются в основном из требований к средней интенсивности дождя, равномерности его распределения и среднему диаметру капель. Однако кроме перечисленных показателей важно знать такие свойства искусственных осадков, как спектр и параметры, характеризующие степень их ударного воздействия на почву. Это позволит

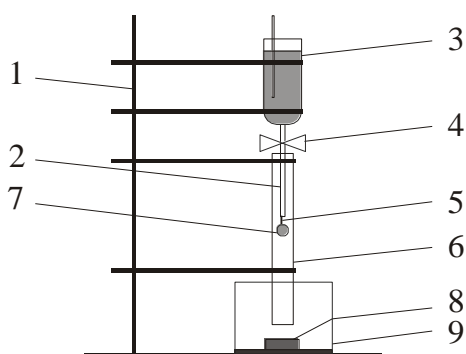
выявить особенности развития основных эрозионных процессов при дождевании, установить допустимые значения ударных характеристик дождя. В особенности это относится к явлению капельной эрозии, для которой в настоящее время не регламентированы допустимые уровни.

Многие ученые [5, 6] отмечают, что масса почвенных частиц, разбрызганных каплями искусственного дождя, является одним из важных параметров качества дождевания. Так, А. И. Рязанцев и А. О. Гаврилица [5] указывают, что эта масса отражает не только разрушение почвенных агрегатов каплями дождя, но и кольматацию почвенных пор, а также перераспределение разбрызганных частиц по орошаемой поверхности.

В научной литературе данные о массе разбрызганной почвы после полива дождеванием встречаются не так часто. Вместе с тем разрушение и разбрызгивание частиц почвы в результате удара капель (капельная эрозия) как искусственного, так и естественного дождя является первой стадией прежде всего водных эрозионных процессов и происходит на землях даже при отсутствии уклона. В профессиональной среде остается распространённым мнение о том, что капельная эрозия не является эрозией в прямом смысле, поскольку, разлетевшись от места удара капли, почвенные частицы остаются на этом же поле, а значит, потеря почвы в результате этого процесса не происходит. Казалось бы, вполне логичное заявление, если не учесть, что за капельной фазой следует эрозия силой поверхностного стока, которая происходит после заполнения влагой порового пространства почвы. «Оторвавшиеся» из-за ударов в основном очень мелкие частицы $< 0,25$ мм [7, 8] осаждаются на поверхности почвы и являются потенциальными компонентами для формирования влекомых дождевым потоком наносов. Кроме того, разбрызганные частицы создают на поверхности «корочку», представляющую собой поверхностный кольматированный слой почвы, впитывающая способность которого намного меньше, чем ненарушенной почвы.

Цель настоящей работы заключалась в установлении влияния величины эффективного давления каплей искусственного дождя на массу разбрызганной почвы как параметра, характеризующего капельную эрозию.

Материалы и методы. Масса разбрызганной почвы определялась в эксперименте моделирования капельной эрозии почв на установке (рисунок 1), подробно описанной в работе автора 2014 г. [7], с помощью специальных стаканов-собирателей. В разных модификациях этот способ применяли W. D. Ellison [9], Г. К. Горничко [10], R. P. C. Morgan [11] и др.



1 – штатив; 2 – трубка; 3 – сосуд Мариотта; 4 – вентиль; 5 – иголка; 6 – защитный кожух; 7 – капля; 8 – почвенный образец в кювете; 9 – стакан-собиратель

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В данной работе приняты следующие допущения. Удар и перемещение капли регистрировались по передней ее кромке в направлении движения. Эта особенность, как отмечают некоторые авторы [12, 13], может давать различные результаты аппроксимации при сравнении с полученными данными при изучении перемещения капли относительно центра массы. Для образования капель использовалась дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72, температура 20 °С, коэффициент поверхностного натяжения 0,07286 Н/м, плотность 998,203 кг/м³) и иглы (инъекторы) с внутренним диаметром 0,060 (34 G) и 0,603 (20 G) мм, которые позволяют получить капли диаметром 1,73 и 2,73 мм соответственно (в целях упрощения расчетов принято, что капли имели форму шара с диаметром d_d). Капли падали с высоты h 1,0–2,5 м с шагом 0,5 м. Температура лабораторного помещения 21 °С, относительная влажность воздуха 53 %.

Нужно отметить, что дождевальные насадки образуют капли диаметром 1–5 мм, причем считается, что капли 1,5–2,0 мм не вызывают существенного разрушения структуры почвы, а наиболее ценным является дождь со средним диаметром капель 1,0 мм [14]. В структуре искусственного дождя присутствует также мелкокапельная фракция 0,3–1,0 мм, которая составляет примерно 10 % объема всей оросительной воды, содержащейся в факеле распыла, а их общее количество составляет около 70 % всех капель [14, 15]. Если учесть, что абсолютно полного отсутствия ветра в реальных условиях не бывает, эта фракция или испаряется, или не долетает до почвы. Поэтому применение насадков, которые позволяют получить средний диаметр капель 1,0 мм, на широкозахватных дождевальных машинах, высота водопроводящего пояса которых может находиться в диапазоне $\approx 1,5$ –2,5 м, по мнению автора статьи, не имеет смысла. Исключение составляет только использование оборудования приземного орошения, которым могут комплектоваться современные дождевальные машины. В то же время даже изначально мелкие капли (в т. ч. $< 1,0$ мм), попадая на листья растений, стекают с них уже с большим диаметром. Поэтому характеризовать структуру дождя и судить о его влиянии на почву можно только по всему спектру. Важно знать влияние каждой капли на почву.

Разбрызгиванию подвергались образцы почвы из орошаемого фермерского хозяйства «ИП глава КФХ Бабунов Ю. А.», расположенного в Коломенском городском округе Московской области. Это аллювиальная агротемногумусовая глееватая супесчаная почва (наименование по методике почвенного института им. В. В. Докучаева [16]).

Почвенные образцы 8 помещались в кювету, капиллярно увлажнялись до наименьшей влагоемкости (ранее установлено, что разбрызгивание почвы при этой влажности наиболее интенсивно [17]) и вносились в стакан-собиратель 9 (рисунок 1). После однократного удара капли происходит разлет частиц. Из стакана-собирателя удаляется кювета, и с помощью про-

мывалки с дистиллированной водой разбрызганные частицы переносятся с внутренней поверхности стакана-собирателя на предварительно высушенный до постоянной массы и взвешенный обеззоленный фильтр. Фильтр высушивается, по разности определяется масса m разбрызганных частиц почвы.

В качестве измерительной аппаратуры для определения диаметра капли d_d использовалось устройство для измерения динамического действия дождя [18], интерпретация показаний устройства проводилась с помощью разработанной компьютерной программы [19].

При ударе капли о почву возникает напряжение, которое определяется нормальным давлением в твердой фазе и давлением влаги в порах почвы [20, 21]. Это давление называется вертикальным эффективным давлением p_e (Па) и может быть рассчитано по следующей зависимости:

$$p_e = \sigma - \psi, \quad (1)$$

где σ – полное давление, оказываемое каплей на почвенный скелет (в твердой фазе), Па;

ψ – нейтральное давление влаги в порах почвы (в жидкой фазе), которое может быть задано (для предварительных расчетов), определено с помощью основной гидрофизической характеристики (ОГХ) или приблизительно найдено по формуле:

$$\psi = \sigma_{гр} + \sigma_c - \tau_{пр} \operatorname{ctg} \varphi,$$

$$\sigma_c = c \cdot \operatorname{ctg} \varphi,$$

где $\sigma_{гр}$ – значение давления, определяемое с помощью графика $\tau_{пр} = f(p_e)$;

σ_c – давление связности почвы, суммарно заменяющее действие всех сил сцепления, кПа;

$\tau_{пр}$ – напряжение сдвига почвы в момент удара капли, кПа;

φ – угол внутреннего трения, градус;

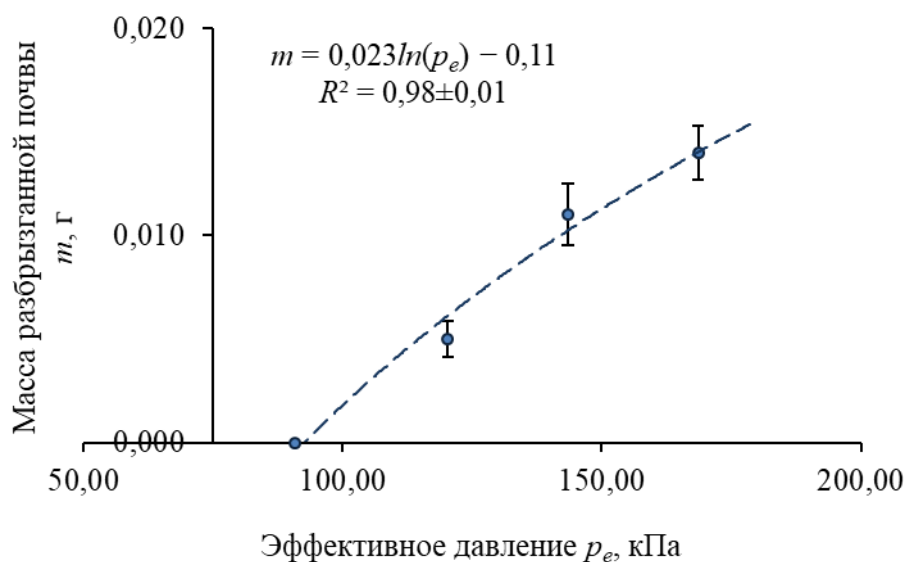
c – сцепление почвы, кПа.

Значения удельного сцепления $c = 14$ кПа, угла внутреннего трения $\varphi = 23^\circ$ частиц почвы приняты по справочным данным, значения нейтрального давления влаги определены экспериментально.

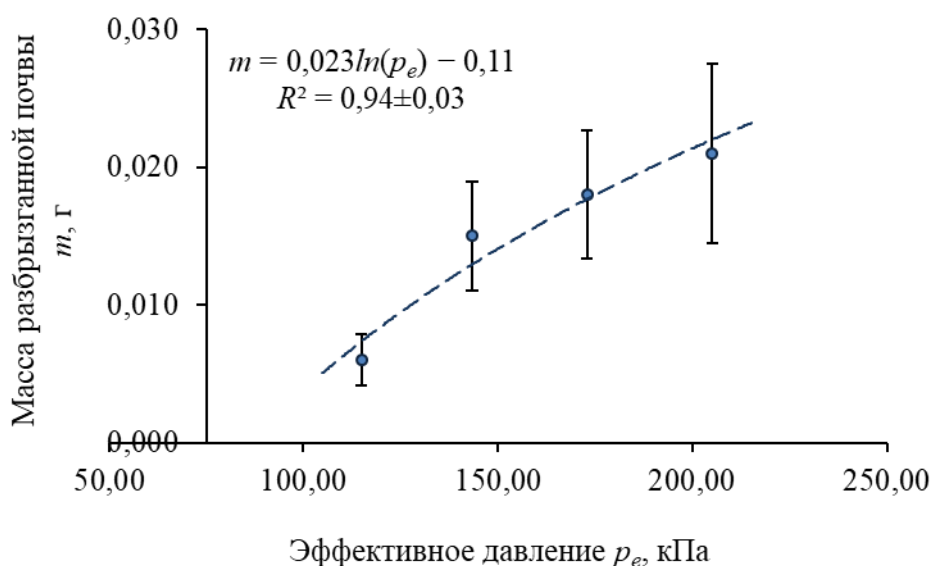
Обработка данных велась по стандартным методам математической статистики, достоверность которой оценивалась по критерию Стьюдента (t -тест) при принятом уровне значимости $p = 0,05$, повторность пятикратная. Анализ выполнялся в среде программы MS Office Excel 16.10 Build 180124.

Результаты и обсуждение. Всего исследовано 40 образцов почвы. В результате удара капли диаметром 1,73 мм при падении с высоты от 1,0 до 2,5 м медианное значение массы m разбрызганных частиц составило соответственно от 0 до $0,014 \pm 0,001$ г, при ударе капли 2,73 мм с высоты от 1,0 до 2,5 м – от $0,006 \pm 0,002$ до $0,021 \pm 0,006$ г соответственно. Анализ по критерию Стьюдента выявил статистическую значимость между высотой падения капель и разбрызганной массой (критическое значение критерия Стьюдента $t_\alpha = 2,776$ в каждой выборке меньше эмпирического t_e критерия Стьюдента 3,464–8,612, в результате t -теста установленный уровень значимости результатов $p < 0,05$).

Медианное значение эффективного давления p_e единичного удара капли диаметром 1,73 мм при падении с высоты от 1,0 до 2,5 м по формуле (2) составило соответственно от $90,95 \pm 4,61$ до $168,60 \pm 3,52$ кПа, при ударе капли 2,73 мм с высоты от 1,0 до 2,5 м p_e составило от $114,92 \pm 1,80$ до $205,09 \pm 10,50$ кПа соответственно. Установлена в результате t -теста статистическая значимость между значениями давления и высотой падения капель ($t_\alpha = 8,610 \ll t_e \in [20,091; 61,278]$, $p < 0,001$). На рисунке 2 показаны результаты определения зависимости массы разбрызганной почвы от эффективного давления.



а



б

а – удар капли диаметром 1,73 мм; б – удар капли диаметром 2,73 мм

Рисунок 2 – Зависимость массы разбрызганной почвы m от эффективного давления капель дождя p_e

Исследования показали статистическую значимость зависимости массы разбрызганных частиц от эффективного давления удара капель дождя ($t_\alpha = 5,041 \ll t_e \in [19,140; 62,572]$, $p < 0,001$). Из приведенных на рисунке 2 данных можно заключить, что чем большими диаметром d_d , высотой падения h и эффективным давлением p_e обладает капля, тем большее количество частиц почвы (m) она может разбрызгать. Получено уравнение

регрессии для определения массы m разбрызганных частиц почвы в зависимости от эффективного давления p_e единичного удара капли:

$$m = A \ln(p_e) - B,$$

где A и B – параметры регрессии, в условиях эксперимента составили 0,023 и 0,11 соответственно.

Проведенные исследования позволяют сформулировать гипотезу, что при известном спектре дождя (отражающем количественное соотношение капель той или иной крупности) в зависимости от оказываемого ими эффективного давления можно спрогнозировать общую массу разбрызганных при дождевании частиц почвы. Так или иначе, на сегодняшний момент это является наиболее трудно прогнозируемой величиной [22, 23].

Однако значение эффективного давления искусственного дождя в зависимости от спектральных характеристик осадков прогнозируется достаточно хорошо. Известен ряд формул для расчета эффективного давления дождя [5, 15, 24]. Автором [15] предложена зависимость, связывающая различные характеристики спектра и параметры орошаемой почвы:

$$p_{e,\Sigma} = \sum_{j=1}^n \sigma_j - f(\psi, d_d) = \frac{1}{s} \sum_{j=1}^n n_j N_j - f(\psi, d_d), \quad (2)$$

где $p_{e,\Sigma}$ – суммарное эффективное давление всех капель, оказываемое искусственным дождем на почву, Па;

σ_j – давление, оказываемое j -й каплей диаметром $d_{d,j}$ на почвенный скелет, Па;

$f(\psi, d_d)$ – функция нейтрального давления влаги в порах почвы в результате изменения ее влажности от предполивной до наименьшей влагоемкости в зависимости от диаметра капель d_d , Па;

s – площадь покрытия дождем, м²;

n_j – число капель данного диаметра, шт.;

N_j – сила удара j -й капли, Н.

С помощью зависимости (2) удалось установить, что дождь, создаваемый аппаратами машины «Фрегат», оказывает на почву давление 1,4 Па, причем дождь вызывал разбрызгивание почвы [15]. То есть значения суммарного (интегрального) эффективного давления дождя намного меньше значений p_e от единичных ударов капель (что объясняется очень маленькой площадью контакта капли с поверхностью почвы). По данным А. О. Гаврилицы [4], масса разбрызганной почвы при поливе дождеваль-ной машиной «Фрегат» может составлять за вегетационный период 60 т/га.

Наибольшее распространение в мелиоративной практике получила зависимость Б. М. Лебедева для расчета давления искусственного дождя на почву. Однако, как показали последние исследования [15], эта формула не учитывает влияние структуры дождя (спектра) и свойств почвы на величину давления, а следовательно, с учетом зависимостей (1) и (2) не является формулой для расчета эффективного давления. Нужно отметить, что к подобным выводам приходили и другие исследователи, например, А. И. Рязанцев и А. О. Гаврилица [5] предлагают известную формулу дополнять параметром, характеризующим площадь покрытия почвы каплями дождя, и диаметром капли.

Выводы. Выявлена статистическая значимость зависимости массы разбрызганных частиц от эффективного давления удара капель дождя ($t_\alpha = 5,041 \ll t_e \in [19,140; 62,572]$, установленный уровень значимости $p < 0,001$). Получено уравнение регрессии для определения массы m разбрызганных частиц почвы в зависимости от эффективного давления p_e единичного удара. Установлено, что чем большими диаметром d_d , высотой падения h и эффективным давлением p_e обладает капля, тем больше частиц почвы (m) она может разбрызгать. Выдвинуто предположение о возможности оценки суммарной массы разбрызганных частиц почвы в зависимости от спектральных характеристик дождя. Этот вопрос является предметом дальнейших исследований автора.

Как и любое природное явление, капельная эрозия нуждается в интерпретации. В настоящее время в Российской Федерации действует межгосударственный стандарт, посвященный методу определения потенциальной опасности эрозии (в фазе стока) под воздействием дождей (ГОСТ 17.4.4.03-86). Этот нормативный документ устанавливает пять классов интенсивности потенциальной эрозии, например, для составления карт эрозионной опасности при воздействии на почву естественных дождей. При необходимости эта классификация, по-видимому, при предварительных оценках может распространяться и на осадки дождевальными машинами и ирригационного оборудования. Существуют и другие классификации [25], позволяющие установить допустимые уровни ирригационной эрозии почв (в фазе стока).

Однако смыв почвы – это следствие, для снижения его интенсивности или предотвращения необходимы предупредительные меры. Поэтому первичной должна быть оценка величины разбрызганной почвы (капельной эрозии) в зависимости от тех или иных определяющих этот процесс факторов, например структуры дождя (спектра), интенсивности осадков, давления дождя на почву и др. Проводить такую оценку разрушения поверхностного слоя почвы надо на этапе выбора дождевальной техники при строительстве новых и реконструкции существующих оросительных систем.

Список использованных источников

1 Отчет о реализации I этапа (2014–2016 годы) федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России на 2014–2020 годы» / Г. С. Горнов, Л. П. Кочеткова, Г. В. Ольгаренко, З. А. Старцев. – М.: Росинформагротех, 2017. – 88 с.

2 Турапин, С. С. Современные задачи и перспективные пути повышения эффективности и надежности широкозахватных дождевальных машин / С. С. Турапин, И. А. Костоварова // Экология и строительство. – 2018. – № 3. – С. 17–26. – DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10011.

3 Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России: информ. изд. / А. В. Колганов, Н. А. Сухой, В. Н. Шкура, В. Н. Щедрин; под ред. В. Н. Щедрина. – М.: Росинформагротех, 2016. – 220 с.

4 Гаврилица, А. О. Эрозионные процессы при поливе дождеванием и пути их минимизации / А. О. Гаврилица // Почвоведение. – 1993. – № 1. – С. 77–84.

5 Рязанцев, А. И. Оптимизация широкозахватных дождевальных машин круго-

вого действия для сложных почвенно-рельефных условий: монография / А. И. Рязанцев, А. О. Гаврилица. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 208 с.

6 Швевс, Г. И. Формирование водной эрозии, стока и наносов и их оценка / Г. И. Швевс. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 182 с.

7 Зверьков, М. С. Масса и дальность разбрызгивания почвы в эксперименте капельной эрозии / М. С. Зверьков // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2014. – № 3(15). – С. 27–37. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec276-field6.pdf.

8 Impact of raindrop characteristics on the selective detachment and transport of aggregate fragments in the Loess plateau of China / Y. Fu [et al.] // Soil Science Society of America Journal. – Vol. 80. – P. 1071–1077. – DOI: 10.2136/sssaj2016.03.0084.

9 Ellison, W. D. Two devices for measuring soil erosion / W. D. Ellison // Agricultural Engineering. – 1944. – Vol. 25. – P. 53–55.

10 Gorchichko, G. K. Device for determining the amount of soil splashed by raindrops / G. K. Gorchichko // Eurasian Soil Science. – 1976. – Vol. 9. – P. 121–124.

11 Morgan, R. P. C. Field measurement of splash erosion / R. P. C. Morgan // International Association of Scientific Hydrology Publication. – 1981. – Vol. 133. – P. 372–382.

12 Бойко, В. М. Особенности динамики капли воды в потоке за ударной волной / В. М. Бойко, С. В. Поплавский // Известия РАН. Физика жидкости и газа. – 2007. – № 3. – С. 110–120.

13 Зверьков, М. С. Численные исследования удара капли о твердую поверхность / М. С. Зверьков // Природообустройство. – 2015. – № 2. – С. 17–20.

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

15 Зверьков, М. С. Исследование давления капель искусственного дождя, создаваемого дождевальными аппаратами, на почву / М. С. Зверьков // Достижения науки и техники АПК. – 2018. – Т. 32, № 8. – С. 73–77. – DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10820.

16 Полевой определитель почв. – М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2008. – 182 с.

17 Зверьков, М. С. Капельная эрозия как фактор нарушения плодородия почв орошаемых агроландшафтов / М. С. Зверьков // Природообустройство. – 2013. – № 5. – С. 31–34.

18 Пат. 155056 Российская Федерация, МПК G 01 N 33/24, A 01 G 25/00. Устройство для измерения динамического действия дождя на почву / Касьянов А. Е., Зверьков М. С.; заявители и патентообладатели Касьянов А. Е., Зверьков М. С. – № 2015107899; заявл. 05.03.15; опубл. 20.09.15, Бюл. № 26. – 1 с.

19 Анализ сигнала капли: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015614657 / Зверьков М. С.; правообладатель Зверьков М. С. – № 2015614657. – Заявка № 2015612150; заявл. 05.03.15; опубл. 20.05.15, Бюл. № 5. – 1 с.

20 Nearing, M. A. The mechanics of soil detachment by raindrops and runoff / M. A. Nearing // Eurasian Soil Science. – 1997. – Vol. 30, № 5. – P. 552–556.

21 Ольгаренко, Г. В. Касательные напряжения в почве при ударе о нее капли искусственного дождя / Г. В. Ольгаренко, С. В. Брыль, М. С. Зверьков // Экология и строительство. – 2017. – № 4. – С. 27–36. – DOI: 10.24411/2413-8452-2017-00018.

22 Modelling raindrop impact and splash erosion processes within a spatial cell: a stochastic approach / T. Ma, C. Zhou, T. Zhu, Q. Cai // Earth Surface Processes and Landforms. – 2008. – Vol. 33. – P. 712–723.

23 Splash erosion: A review with unanswered questions / M. Fernandez-Raga, C. Palencia, S. Keesstra, A. Jordan, R. Fraile, M. Angulo-Martinez, A. Cerda // Earth-Science Reviews. – 2017. – № 171. – P. 463–477. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.06.009.

24 Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения: справочник / Г. В. Ольгаренко [и др.]; под ред. Г. В. Ольгаренко. – М.: Росинформагротех, 2015. – 264 с.

25 Полуэктов, Е. В. Эрозия и дефляция агроландшафтов Северного Кавказа: монография / Е. В. Полуэктов. – Новочеркасск: НГМА, 2003. – 298 с.

References

1 Gornov G.S., Kochetkova L.P., Ol'garenko G.V., Startsev Z.A., 2017. *Otchet o realizatsii I etapa (2014–2016 gody) federal'noy tselevoy programmy «Razvitie melioratsii zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya v Rossii na 2014–2020 gody»* [Report on the implementation of stage I (2014–2016) of the federal targeted program “Developing Agricultural Land Reclamation in Russia for 2014–2020”]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 88 p. (In Russian).

2 Turapin S.S., Kostovarova I.A., 2018. *Sovremennyye zadachi i perspektivnye puti povysheniya effektivnosti i nadezhnosti shirokzakhvatnykh dozhdeval'nykh mashin* [Current challenges and promising ways to improve the efficiency and reliability of wide-span sprinkler machines]. *Ekologiya i stroitel'stvo* [Ecology and Construction], no. 3, pp. 17-26. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10011. (In Russian).

3 Kolganov A.V., Sukhoy N.A., Shkura V.N., Shchedrin V.N., 2016. *Razvitie melioratsii zemel' sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya v Rossii: inform. izd.* [Development of agricultural land reclamation in Russia: inform. ed.]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 220 p. (In Russian).

4 Gavrilitsa A. O., 1993. *Erozionnye protsessy pri polive dozhdevaniem i puti ikh minimizatsii* [Erosion processes during sprinkling irrigation and ways to minimize them]. *Pochvovedenie* [Soil Science], no. 1, pp. 77-84. (In Russian).

5 Ryazantsev A.I., Gavrilitsa A.O., 1991. *Optimizatsiya shirokzakhvatnykh dozhdeval'nykh mashin krugovogo deystviya dlya slozhnykh pochvenno-rel'efnykh usloviy: monografiya* [Optimization of wide-cut circular-action sprinkler machines for difficult soil-relief conditions: monograph]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 208 p. (In Russian).

6 Schwebs G.I., 1974. *Formirovanie vodnoy erozii, stoka i nanosov i ikh otsenka* [Formation of water erosion, runoff and sediment and their assessment]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 182 p. (In Russian).

7 Zver'kov M.S., 2014. *Massa i dal'nost' razbryzgvaniya pochvy v eksperimente kapel'noy erozii* [Soil splash mass and distance in the experiment of drip erosion]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii* [Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems], no. 3(15), pp. 27-37, available: http://rosnii-pm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec276-field6.pdf. (In Russian).

8 Fu Y. [et al.]. Analogous fragments on the Loess plateau of China. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 80, pp. 1071-1077. DOI: 10.2136/sssaj2016.03.0084. (In English).

9 Ellison W.D., 1944. Two devices for soil erosion. *Agricultural Engineering*, vol. 25, pp. 53-55. (In English).

10 Gorchichko G.K., 1976. Device for raindrops. *Eurasian Soil Science*, vol. 9, pp. 121-124. (In English).

11 Morgan R.P.C., 1981. Field measurement of splash erosion. *International Association of Scientific Hydrology Publication*, vol. 133, pp. 372-382. (In English).

12 Boyko V.M., Poplavskiy S.V., 2007. *Osobennosti dinamiki kapli vody v potoke za udarnoy volnoy* [Peculiarities of water drop dynamics in the flow behind shock wave]. *Izvestiya RAN. Fizika zhidkosti i gaza* [News of the Russian Academy of Sciences. Physics of Liquid and Gas], no. 3, pp. 110-120. (In Russian).

13 Zver'kov M.S., 2015. *Chislennyye issledovaniya udara kapli o tverduyu poverkhnost'* [Numerical studies of the impact of a drop falling on solid surface]. *Prirodooobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 17-20. (In Russian).

14 Gorodnichev V.I., 2002. *Metodika otsenki i tekhnicheskie sredstva kontrolya pokazateley rezhima i kachestva poliva pri gosispytaniyakh dozhdeval'noy tekhniki* [Assessment methods and technical means of monitoring indicators of the regime and quality of irrigation during state tests of sprinkler technology]. *Resursosberegayushchie ekologicheski bezopasnye sistemy orosheniya i sel'khozvodostabzheniya: sb. tr. FGNU VNII «Raduga»* [Resource-saving environmentally safe irrigation systems and agricultural water supply: Proceed. FGNU VNII "Rainbow"]. Kolomna, Rainbow Publ., pp. 78-83. (In Russian).

15 Zver'kov M.S., 2018. *Issledovanie davleniya kapel' iskusstvennogo dozhdya, sozdavaemogo dozhdval'nymi apparatami, na pochvu* [Study of the pressure of artificial rain drops created by sprinklers on the ground]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of Science and Technology of the Agro-Industrial Complex], vol. 32, no. 8, pp. 73-77. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10820. (In Russian).

16 *Polevoy opredelitel' pochv* [Field Guide of Soils], 2008. Moscow, Soil Institute named after V.V. Dokuchaev, 182 p. (In Russian).

17 Zver'kov M.S., 2013. *Kapel'naya eroziya kak faktor narusheniya plodorodiya pochv oroshaemykh agrolandshaftov* [Raindrop erosion as a factor of soil fertility breakage of irrigated landscapes]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 5, pp. 31-34. (In Russian).

18 Kas'yanov A.E., Zver'kov M.S., 2015. *Ustroystvo dlya izmereniya dinamicheskogo deystviya dozhdya na pochvu* [Device for measuring the dynamic effect of rain on soil]. Patent RF, no. 155056. (In Russian).

19 Zver'kov M.S. 2015. *Analiz signala kapli* [Analysis of the drop signal]. Certificate of state registration of the computer program, no. 2015614657. (In Russian).

20 Nearing M.A., 1997. The mechanics of soil and raindrops runoff. *Eurasian Soil Science*, vol. 30, no. 5, pp. 552-556. (In English).

21 Ol'garenko G.V., Bryl' S.V., Zver'kov M.S., 2017. *Kasatel'nye napryazheniya v pochve pri udare o nee kapli iskusstvennogo dozhdya* [Shear stress caused by artificial raindrop impact at the soil surface]. *Ekologiya i Stroitel'stvo* [Ecology and Construction], no. 4, pp. 27-36. DOI: 10.24411/2413-8452-2017-00018. (In Russian).

22 Ma T., Zhou C., Zhu T., Cai Q., 2008. Modelling raindrop impact and splash erosion processes within a spatial cell: a stochastic approach. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 33, pp. 712-723. (In English).

23 Fernandez-Raga M., Palencia C., Keesstra S., Jordan A., Fraile R., Angulo-Martinez M., Cerda A. 2017. Splash erosion: A review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews*, no. 171, pp. 463-477. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.06.009. (In English).

24 Ol'garenko G.V. [and others], 2015. *Resursosberegayushchie energoeffektivnye ekologicheski bezopasnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva orosheniya: spravochnik* [Resource-saving, energy-efficient, environmentally friendly technologies and technical means of irrigation: a reference book]. Moscow, Rosinformagrotekh Publ., 264 p. (In Russian).

25 Poluektov E.V., 2003. *Eroziya i deflyatsiya agrolandshaftov Severnogo Kavkaza: monografiya* [Erosion and Deflation of Agricultural Landscapes of the North Caucasus: monograph]. Novocheboksarsk, NGMA Publ., 298 p. (In Russian).

Зверьков Михаил Сергеевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: старший научный сотрудник, ученый секретарь

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельскохозяйственно-го водоснабжения «Радуга»

Адрес организации: п. Радужный, 38, Коломенский городской округ, Московская область, Российская Федерация, 140483

E-mail: rad_sc@bk.ru

Zverkov Mikhail Sergeevich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Senior Researcher, Academic Secretary

Affiliation: All Russian Scientific Research Institute “Raduga”

Affiliation address: Raduzhnyi, 38, Kolomenskii gorodskoi okrug, Moscow region, Russian Federation, 140483

E-mail: rad_sc@bk.ru