Sutyagin V.M., Bogdaletova L.I. *Khimiya i fizika polimerov: Uchebnoye posobiye* [Chemistry and physics of polymers: Textbook]. Tomsk, TPU, 2003, 208 p.

Uspenskaya M.V. Akrilovyye gidrogeli v kachestve polimernykh svyazuyushchikh: Avtoref. … diss. dokt. tekh. nauk [Acrylic hydrogels as polymer binders: Dr. tec. sci. abs. diss.]. SPb., 2009, 39 p.

Chelovechkova A.V. Osnovnaya gidrofizicheskaya kharakteristika pochv [Basic hydrophysical characteristics of soils] // *Vestnik Kurganskoy GSKhA*, 2012, no. 2, pp. 41–44.

Sherkuziyev D.Sh., Aripov Kh.Sh., Askarova O.K., Makhmudova M. Tekhnologiya polucheniya novykh gidrogeley kompleksnogo deystviya dlya sel'skogo khozyaystva [Technology of obtaining new hydroelements of complex action for rural economy] // Universum: Tekhnicheskiye nauki, 2020, no. 4 (73), pp. 39–43.
URL: http://7universum.com/ru/tech/archive/item/9244

Barvenik F.W. Polyacrylamide characteristics related to soil applications // Soil Science. 1994. 158 (4): 235–243.

Bowman D.C., Evans R.Y., Paul J.L. Fertilizer salts reduce hydration of polyacryamide gels and affect physical properties of gel-amended container media // Journal of American Society for Horticultural Science. 1990. 115. pp. 382–386.

Brax M., Buchmann C., Schaumann G.E. Biohydrogel induced soil-water interactions: how to untangle the gel effect? A review // Plant Nutrition and Soil Science. 2017. https://doi.org/10.1002/jpln.201600453

Cechmankova J., Skala J., Sedlarik V., Durpekova S., Drbohlav J., Salakova A., Vacha R. The Synergic Effect of Whey-Based Hydrogel Amendment on Soil Water Holding Capacity and Availability of Nutrients for More Efficient Valorization of Dairy By-Products // Sustainability. 2021. 13 (19). 10701. https://doi.org/10.3390/su131910701

Liao R., Wu W., Ren S., Yang R. Effects of superabsorbent polymers on the hydraulic parameter and water retention properties of soil // Journal of Nanomaterials. 2016. Article ID 5403976. 11 p.

Taban M., Movahedi Naeini S.A.R. Effect of Aquasorb and organic compost amendment on soil water retention and evaporation with different evaporation potentials and soil textures // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2006. 37: 2031–2055.

Tariq Z., Iqbal D.N., Rizwan M., Ahmad M., Faheem M., Ahmed M. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. (Review Article) RSC Adv. 2023. 13. 24731-24754. DOI: 10.1039/D3RA03472K

Salem M., Guidi G.V., Pini R., Khater A. The use of a polyacrylamide hydrogel to improve the water-holding capacity of a sandy soil under different saline conditions. Agr. mediterr. 1991. Vol. 121. № 2. pp. 160–165.

Puspita I., Kurniati M., Winarti C., Maddu A. Superabsorbent Hydrogel from Cassava Waste Pulp – Acrylamide – Acrylic Acid to Increase Water Holding Capacity in Sandy Soils // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1267. pp. 1-7. DOI 10.1088/1755-1315/1267/1/012088

УДК 631.459.21 DOI: 10.25695/AGRPH.2024.03.03

РАЗМЫВАЮЩАЯ СКОРОСТЬ ВОДНОГО ПОТОКА ДЛЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВ НА РАЗНЫХ АГРОФОНАХ

Н. Н. Цыбулько[1], В. Б. Цырибко[2], А. В. Юхновец[2], И. И. Жукова[3], И. А. Логачев[2]

[1]Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета, 220070, Беларусь, г. Минск, ул. Долгобродская, д. 23/1, E-mail: nik.nik1966@tut.by;
[2]Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, 220108, Беларусь, г. Минск, ул. Казинца, д. 90;
[3]Белорусский государственный педагогический институт им. Максима Танка, 220030, Беларусь, г. Минск, ул. Советская, д. 18

Поступила в редакцию 03.05.2024, принята в печать 13.09.2024

Дерново-подзолистые почвы непосредственно после механической обработки характеризуются очень низкой противоэрозионной стойкостью. Величина размывающей скорости водного потока не превышает 11,1 см $с^{-1}$. Устойчивость почв к размыву снижается с повышением степени их эрозионной деградации. Использование эродированных почв в почвозащитных травянозерновых севооборотах способствует повышению их устойчивости к эрозии. Средне- и сильноэродированные почвы на лессовидных суглинках в зерновом севообороте отличались низкими показателями размывающей скорости водного потока – 16,5–18,5 см $с^{-1}$, а в травянозерновом севообороте – высоким и средним (33,1 и 29,8 см $с^{-1}$). При органоминеральной системе удобрения наблюдалось повышение противоэрозионной стойкости почв по сравнению с минеральной системой удобрения. Размывающая скорость водного потока составила в среднем на неэродированной почве 25,7 см $с^{-1}$, на среднеэродированной почве – 21,8 см·$с^{-1}$, на сильноэродированной почве – 18,5 см·$с^{-1}$. Внесение известковых мелиорантов на фоне органоминеральной системы удобрения не привело к ее повышению. Установлена тесная корреляционная связь (r=0,76) между размывающей скоростью водного потока и показателем средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов в почве.

Ключевые слова: эродированные почвы, севообороты, система удобрения, противоэрозионная стойкость, размывающая скорость водного потока.

EROSIVE VELOCITY OF WATER FLOW FOR SODD-PODZOL SOILS WITH DIFFERENT AGRICULTURAL BACKGROUND

M. M. Tsybulka[1], V. B. Tsyribko[2], A. V. Yukhnovets[2], I. I. Zhukova[3], I. A. Logachov[2]

[1]International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, 23/1 Dolgobrodskaya str., Minsk, 220070, Belarus, E-mail: nik.nik1966@tut.byЭ
[2]Institute of Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, 90 Kazinets str., Minsk, 220108, Belarus
[3]Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank, 18 Soviet str., Minsk, 220030, Belarus

Soddy-podzolic soils immediately after mechanical treatment are characterized by very low erosion resistance. The erosive velocity of the water flow does not exceed 11.1 cm·s^{-1}. Soil resistance to erosion decreases with increasing degree of erosion degradation. The use of eroded soils in soil-protective grass-grain crop rotations helps improve their resistance to erosion. Medium and highly eroded soils on loess-like loams in the grain crop rotation were characterized by low values of the eroding velocity of the water flow – 16.5–18.5 cm s^{-1}, and in the grass-grain crop rotation – by high and average – 33.1 and 29.8 cm s^{-1}. With the organomineral fertilizer system, an increase in the anti-erosion resistance of the soils was observed compared to the mineral fertilizer system. The eroding velocity of water flow averaged 25.7 cm·s^{-1} on non-eroded soil, 21.8 cm·s^{-1} on moderately eroded soil, and 18.5 cm·s^{-1} on highly eroded soil. Application of lime ameliorants to the soils with the organomineral fertilizer system did not result in any increase in the soil resistance. A close correlation has been found (r=0.76) between the erosive velocity of water flow and the weighted average diameter of water-resistant aggregates in the soil.

Key words: eroded soils, crop rotation, fertilization system, erosion resistance, erosion speed of water flow.

ВВЕДЕНИЕ

В Беларуси выявлено более 20 видов и форм деградации почв и земель. Основными из них являются: водная и ветровая эрозия почв сельскохозяйственных земель, радиоактивное загрязнение земель, минерализация органического вещества торфяно-болотных почв (Почвы Республики Беларусь…, 2019). Водной эрозии подвержено 473,3 тыс. га сельскохозяйственных земель. Из общей площади почв, подверженных водной эрозии, 268,3 тыс. га (57%) занимают слабосмытые почвы, 120,0 тыс. га (25%) – среднесмытые почвы, 20,2 тыс. га (4%) – сильносмытые почвы и 64,7 тыс. га (14%) – намытые почвы (Цыбулько, 2022).

Эродируемость (смываемость) почвы – один из основных факторов водной эрозии. Противоэрозионная стойкость почвы является интегральным показателем и определяется комплексом ее свойств, таких как минералогический состав, физические и агрохимические свойства. Основными физическими свойствами почв, влияющими на их устойчивость к эрозии, являются гранулометрический, микроагрегатный и структурно-агрегатный состав, плотность, пористость и сцепление.

В мировой практике эрозионных исследований известно множество подходов и методов определения эродируемости почвы – как прямых, так и косвенных. Для количественной оценки данного параметра, используемого как в статистических, так и в физически обоснованных моделях смыва почв, предложено более десятка различных подходов и способов (Лисецкий, 2012). В качестве определяющих параметров, помимо свойств самой почвы, предлагаются кинетические характеристики склоновых потоков – неразмывающая скорость (Кузнецов, 1981), критическое касательное напряжение (Foster, 1982). Для оценки эродируемости применяется также показатель в виде частного от деления интенсивности смыва на куб скорости потока, который для водных потоков численно равен половине удельной мощности потока (Ларионов, 2010; Nearing, 1991).

В США и странах Западной Европы для оценки податливости почвы эрозии используется предложенное В. Х. Уишмейером и Д. Д. Смитом определение ее эродируемости – количество почвы, смытой с эталонной площадки бессменного пара, на единицу эрозионного потенциала осадков (Wischmeier, 1978).

М. С. Кузнецовым установлена зависимость между средневзвешенным диаметром водопрочных агрегатов, сцеплением и плотностью почвы, содержанием корней растений диаметром <1 мм и так называемой донной размывающей скоростью водного потока. Автором предложено уравнение, позволяющее определить донную размывающую скорость водного потока для почв по вышеперечисленным показателям (Кузнецов, 1993). Установлено, что противоэрозионная стойкость почв количественно выражается величиной размывающей скорости потока, которая непосредственно определяется двумя показателями почвы: размером водопрочных агрегатов и их сцеплением друг с другом. Остальные свойства почв влияют на противоэрозионную стойкость косвенно, через данные показатели.

Цель исследования – определение размывающей скорости водного потока для дерново-подзолистых почв, в разной степени подверженных эрозионной деградации, в зависимости от их использования в разных севооборотах, приемов обработки почвы и системы удобрения.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились в 2018–2021 гг. в условиях центральной и северной почвенно-экологических провинций Беларуси на полевых опытных стационарах «Стоковые площадки»

(Минский район) и «Браслав» (Браславский район) Института почвоведения и агрохимии НАН Беларуси.

Объекты исследований:

– дерново-подзолистая почва, сформированная на легких лессовидных суглинках, расположенная на склоне южной экспозиции крутизной 6–7°. На водораздельной равнине находятся неэродированные почвы, в верхней части склона – среднеэродированные, в средней части склона – сильноэродированные (стационар «Стоковые площадки» в центральной почвенно-экологической провинции);

– дерново-подзолистая почва, сформированная на моренных суглинках, расположенная на склоне северо-восточной экспозиции крутизной 5–7°. На водораздельной равнине находится неэродированная почва, в верхней части склона – слабо- и среднеэродированная, в средней части склона – сильноэродированная (стационар «Браслав» в северной почвенно-экологической провинции).

На дерново-подзолистых эродированных почвах на лессовидных суглинках исследования проводились в зерновом и травяном севооборотах, на дерново-подзолистых эродированных почвах на моренных суглинках – в зернотравяном и травянозерновом севооборотах.

На дерново-подзолистых неэродированных, слабо- и сильноэродированных почвах в звене зернотравяного севооборота (яровая пшеница – озимая рожь – бобово-злаковые травы) изучено влияние на размывающую скорость водного потока способов основной обработки почв – отвальной вспашки на 20–22 см, безотвальной чизельной обработки на 20–22 см и мелкой дисковой обработки на 10–12 см. Обработки почвы проводились поперек склона.

На дерново-подзолистых неэродированных, средне- и сильноэродированных почвах на лессовидных суглинках изучено влияние разных систем удобрения сельскохозяйственных культур на показатель размывающей скорости водного потока. Схема опыта и дозы применения известкового мелиоранта, органических и минеральных удобрений в зерновом севообороте представлены в табл. 1. Агрохимические показатели почв следующие ($А_п$): неэродированная почва: pH_{KCl} – 5,74; гумус – 2,24%; содержание P_2O_5 и K_2O – 282 и 230 мг кг$^{-1}$ почвы соответственно; среднеэродированная почва: pH_{KCl} – 5,66; гумус – 1,73%; содержание P_2O_5 и K_2O (по Кирсанову) – 270 и 212 мг кг$^{-1}$ почвы соответственно; сильноэродированная почва: pH_{KCl} – 5,41; гумус – 1,33%; содержание P_2O_5 и K_2O – 270 и 139 мг кг$^{-1}$ почвы соответственно.

Таблица 1. Схема опыта и дозы применения известкового мелиоранта, органических и минеральных удобрений при разных системах удобрения в севообороте

Система удобрения	Культуры севооборота			
	*овес	яровой рапс	яровая пшеница	озимая рожь
Неэродированная почва				
Минеральная	$N_{90}P_{60}K_{80}$	$N_{130}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$	$N_{130}P_{60}K_{90}$
Минеральная + известкование почвы	$N_{90}P_{60}K_{80}$ + ДМ6,5	$N_{130}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$	$N_{130}P_{60}K_{90}$
Органоминеральная	$N_{90}P_{60}K_{80}$ + ОУ40	$N_{130}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$ + ОУ40	$N_{130}P_{60}K_{90}$
Органоминеральная + известкование почвы	$N_{90}P_{60}K_{80}$ + ОУ40 + ДМ6,5	$N_{130}P_{60}K_{90}$	$N_{120}P_{60}K_{90}$ + ОУ40	$N_{130}P_{60}K_{90}$

***Примечание:** ДМ – доломитовая мука в т·га$^{-1}$; ОУ – органические удобрения (подстилочный навоз) в т·га$^{-1}$.

Структурно-агрегатный анализ почв для определения средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов при водном просеивании выполнялся по методу Саввинова (Теория и методы…, 2007). Размывающая скорость водного потока для почв рассчитывалась по модифицированному уравнению М. С. Кузнецова (Кузнецов, Глазунов, 2024), которое имеет следующий вид (м с$^{-1}$):

$$V_{\Delta p} = 0{,}556\sqrt{\frac{2g\,(p-p_w)\,dK}{3{,}5p_w}},$$

где $V_{\Delta p}$ – размывающая скорость водного потока, м с$^{-1}$; g – ускорение силы тяжести (9,81 м с$^{-2}$); p – плотность твердой фазы почвы, кг м$^{-3}$; p_w – плотность воды, кг м$^{-3}$; d – средневзвешенный диаметр водопрочных агрегатов при водном просеивании, мм; K – коэффициент защиты (для зерновых и зернобобовых смесей – 4,8; для трав – 14).

Противоэрозионная стойкость почв оценивалась по шкале (табл. 2). Статистическая обработка (определение доверительного интервала) проведена в программном пакете MS Excel.

Таблица 2. Классификация почв по противоэрозионной стойкости (Кузнецов, Глазунов, 2024)

Противоэрозионная стойкость почвы	Размывающая скорость водного потока, см $с^{-1}$*	Почвы, горизонты
Очень низкая	< 15	рыхлые пахотные горизонты, без растительности
Низкая	15–20	пахотные горизонты под зерновыми культурами (плотность почвы < 1,2 г $см^{-3}$)
Средняя	20–30	пахотные горизонты под зерновыми культурами (плотность почвы > 1,2 г $см^{-3}$)
Высокая	30–50	пахотные горизонты под травами и зернобобовыми смесями и подпахотные горизонты почв
Очень высокая	> 50	пахотные горизонты под хорошо развитыми многолетними травами и луговой растительностью

Примечание: для потока глубиной 1 см, см $с^{-1}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В научной литературе встречаются противоречивые результаты исследований влияния механических обработок почв на их устойчивость к смыву. Отмечается, что безотвальные приемы обработки способствуют повышению содержания в почве эрозионно устойчивых агрегатов по сравнению с традиционной отвальной вспашкой (Дрогозов, 1993). В некоторых научных публикациях указано, что показатели устойчивости к эрозии зависят от обработки до определенного предела, а также что механические обработки не оказывают на них прямого воздействия (Булыгин, 1990).

В рамках настоящего исследования определение донной размывающей скорости водного потока ($V_{\Delta p}$) позволило установить, что рыхлый пахотный горизонт почвы непосредственно после проведения механической обработки характеризуется очень низкой устойчивостью к смыву и размыву (менее 15 см $с^{-1}$). Величина $V_{\Delta p}$ колебалась по вариантам с отвальной и безотвальными чизельной и дисковой обработками в пределах 9,4–11,1 см $с^{-1}$. Незначительно выше данный показатель был в вариантах с безотвальными обработками, что обусловлено защитным влиянием послеуборочных растительных остатков на скорость водного потока (табл. 3).

Таблица 3. Влияние обработок почвы в звене севооборота яровая пшеница – озимая рожь – бобово-злаковые травы на размывающую скорость водного потока, см $с^{-1}$.

Основная обработка почвы	Эродированность почвы		
	неэродированная	слабоэродированная	сильноэродированная
Отвальная вспашка на 20–22 см	10,4 ± 0,2	10,1 ± 0,2	9,4 ± 0,1
Безотвальная чизельная на 20–22 см	11,1 ± 0,3	10,4 ± 0,2	9,9 ± 0,2
Поверхностная дисковая на 10–12 см	11,1 ± 0,3	10,3 ± 0,2	9,7 ± 0,1

Результаты исследований показали, что устойчивость почв к смыву и размыву существенно зависит от степени их эрозионной деградации и использования. Так, дерново-подзолистые почвы на лессовидных суглинках, не подверженные эрозии, в зерновом севообороте отличались средней противоэрозионной стойкостью по шкале М. С. Кузнецова. Донная размывающая скорость водного потока для них колебалась в пределах 20,3–26,5 см·$с^{-1}$ (в среднем – 23,4 см·$с^{-1}$). Средне- и сильноэродированные почвы имели низкую устойчивость с $V_{\Delta p}$ 18,5 и 16,5 см·$с^{-1}$ соответственно.

Неэродированная и среднеэродированная почвы при трехлетнем возделывании люцерны посевной в травяном севообороте характеризовались высокой устойчивостью к смыву, сильноэродированная почва – средней устойчивостью. Размывающие скорости составляли соответственно 40,1, 33,1 и 29,8 см·$с^{-1}$ (табл. 4).

Дерново-подзолистые почвы на моренных суглинках имели более высокие значения размывающей скорости водного потока, то есть отличались лучшей противоэрозионной стойкостью по сравнению с почвами на лессовидных суглинках. В зернотравяном севообороте при возделывании зерновых культур и однолетних бобово-злаковых трав $V_{\Delta p}$ для неэродированной почвы изменялась по годам от 26,2 до 29,0 см·$с^{-1}$, слабо- и среднеэродированной почв – от 23,3 до 26,5, сильноэродированной почвы – от 20,5 до 23,7 см·$с^{-1}$, а в среднем она составила 27,0 см·$с^{-1}$, 24,2 см·$с^{-1}$ и 22,1 см·$с^{-1}$ соответственно. Следовательно, в соответствии с величиной размывающей скорости водного потока по приведенной в табл. 1 шкале почвы характеризовались средней противоэрозионной стойкостью.

В травянозерновом севообороте при трехлетнем возделывании люцерны посевной наблюдалось существенное повышение устойчивости почв к смыву. Для всех почв различной степени эродированности значения размывающей скорости водного потока были высокими (>30 см $с^{-1}$), а под люцерной второго и третьего годов пользования они достигали 60 см $с^{-1}$ и выше, что соответствует очень высокой противоэрозионной стойкости почвы.

Таблица 4. Размывающая скорость водного потока (см $с^{-1}$) для дерново-подзолистых почв в разных севооборотах

Севооборот	Культуры севооборота	Степень эродированности почвы			
		неэродированная	слабо эродированная	средне эродированная	сильно эродированная
Дерново-подзолистая почва, сформированная на легких лессовидных суглинках					
Зерновой севооборот	овес	23,0 ± 3,3	–	16,5 ± 1,8	16,4 ± 2,0
	яровой рапс	20,3 ± 0,5	–	16,4 ± 0,3	16,2 ± 0,2
	яровая пшеница	23,7 ± 3,7	–	20,5 ± 3,6	16,7 ± 6,8
	озимая рожь	26,5 ± 2,7	–	20,5 ± 0,1	16,7 ± 6,5
	среднее за севооборот	**23,4**	–	**18,5**	**16,5**
Травяной севооборот	однолетние травы + люцерна	39,9 ± 5,8	–	28,1 ± 3,4	27,7 ± 4,9
	люцерна 1-го года пользования	39,9 ± 6,1	–	34,4 ± 0,6	27,7 ± 5,2
	люцерна 2-го года пользования	40,4 ± 0,1	–	35,0 ± 5,3	28,6 ± 6,3
	люцерна 3-го года пользования	40,4 ± 5,3	–	35,0 ± 0,2	35,0 ± 6,3
	среднее за севооборот	**40,1**	–	**33,1**	**29,8**
Дерново-подзолистая почва, сформированная на моренных суглинках					
Зернотравяной севооборот	однолетние травы	26,2 ± 3,2	23,4 ± 3,8	23,3 ± 2,5	23,7 ± 3,3
	озимая тритикале	26,2 ± 5,6	23,4 ± 5,5	23,3 ± 8,9	20,5 ± 3,1
	однолетние травы	26,5 ± 2,5	26,5 ± 2,7	26,5 ± 2,7	23,7 ± 3,1
	озимая пшеница	29,0 ± 8,3	23,7 ± 3,1	23,7 ± 3,2	20,5 ± 3,7
	среднее за севооборот	**27,0**	**24,2**	**24,2**	**22,1**
Травянозерновой севооборот	яровая пшеница + люцерна	30,7 ± 5,4	29,0 ± 3,9	26,1 ± 5,1	23,5 ± 3,3
	люцерна 1-го года пользования	44,4 ± 9,1	44,9 ± 8,4	45,2 ± 0,8	39,9 ± 9,9
	люцерна 2-го года пользования	63,9 ± 16,4	57,2 ± 13,1	60,6 ± 4,7	45,2 ± 9,8
	люцерна 3-го года пользования	60,6 ± 10,9	57,2 ± 15,4	45,2 ± 11,5	45,2 ± 13,6
	среднее за севооборот	**49,9**	**47,1**	**44,3**	**38,4**

Изучено влияние известкового мелиоранта (доломитовая мука), органических (подстилочный навоз) и минеральных (азотных, фосфорных, калийных) удобрений на показатель размывающей скорости водного потока для дерново-подзолистых почв на лессовидных суглинках, в разной степени подверженных водной эрозии. В среднем за севооборот при минеральной системе удобрения размывающая скорость водного потока для неэродированной почвы была на уровне 23,4 см·$с^{-1}$, среднеэродированной почвы – 18,5 см·$с^{-1}$, сильноэродированной почвы – 16,5 см·$с^{-1}$. Данный показатель колебался по годам. Известкование почв на фоне минеральной системы удобрения привело к незначительному повышению противоэрозионной устойчивости почв (табл. 5).

Применение органоминеральной системы удобрения способствовало некоторому повышению устойчивости почв к смыву. Размывающая скорость водного потока составила в среднем за севооборот на неэродированной почве 25,7 см·$с^{-1}$, на среднеэродированной – 21,8, на сильноэродированной – 18,5 см·$с^{-1}$. Внесение известковых мелиорантов на фоне органоминеральной системы удобрения не привело к повышению $V_{\Delta p}$.

Ранее авторами были представлены результаты изучения влияния разных культур севооборотов и систем удобрения на водоустойчивость макроструктуры (соотношение агрегатов диаметром ≥0,25 мм при водном и сухом просеивании) дерново-подзолистых почв, в разной степени подверженных эрозионной деградации (Цыбулько, 2024). Выполненный корреляционно-регрессионный анализ сопряженных данных показал, что между величинами водоустойчивости почвенной макроструктуры и размывающей скоростью водного потока для дерново-подзолистых почв существует корреляционная связь средней силы (r=0,52), которая описывается уравнением y=0,4728x+17,17 (рис. 1).

Таблица 5. Размывающая скорость водного потока (см $с^{-1}$) для дерново-подзолистых почв при разных системах удобрения в севооборотах

Система удобрения	Культуры севооборота				Среднее за севооборот
	овес	яровой рапс	яровая пшеница	озимая рожь	
Неэродированная почва					
Минеральная	23,0 ± 3,3	20,3 ± 0,5	23,7 ± 3,7	26,5 ± 2,7	**23,4**
Минеральная + известкование почвы	25,7 ± 3,1	19,9 ± 3,1	23,7 ± 0,1	26,5 ± 0,1	**24,0**
Органоминеральная	30,4 ± 2,4	19,9 ± 0,6	23,5 ± 0,1	29,0 ± 3,0	**25,7**
Органоминеральная + известкование почвы	34,4 ± 3,2	23,0 ± 2,4	23,7 ± 1,3	23,7 ± 3,1	**26,2**
Среднеэродированная почва					
Минеральная	16,5 ± 1,8	16,4 ± 0,3	20,5 ± 3,6	20,5 ± 0,1	**18,5**
Минеральная + известкование почвы	16,5 ± 2,7	16,5 ± 0,3	20,5 ± 3,1	20,5 ± 3,1	**18,5**
Органоминеральная	20,1 ± 2,0	20,1 ± 0,4	20,5 ± 3,7	26,5 ± 8,3	**21,8**
Органоминеральная + известкование почвы	20,3 ± 2,6	20,1 ± 3,3	20,5 ± 1,1	26,5 ± 3,6	**21,9**
Сильноэродированная почва					
Минеральная	16,4 ± 2,0	16,2 ± 0,2	16,7 ± 6,8	16,7 ± 6,5	**16,5**
Минеральная + известкование почвы	16,4 ± 1,8	16,4 ± 0,2	20,5 ± 3,7	16,7 ± 0,2	**17,5**
Органоминеральная	16,5 ± 2,6	16,5 ± 3,9	20,5 ± 3,6	23,7 ± 5,8	**19,3**
Органоминеральная + известкование почвы	16,4 ± 1,4	16,5 ± 0,2	20,5 ± 2,1	20,5 ± 3,7	**18,5**

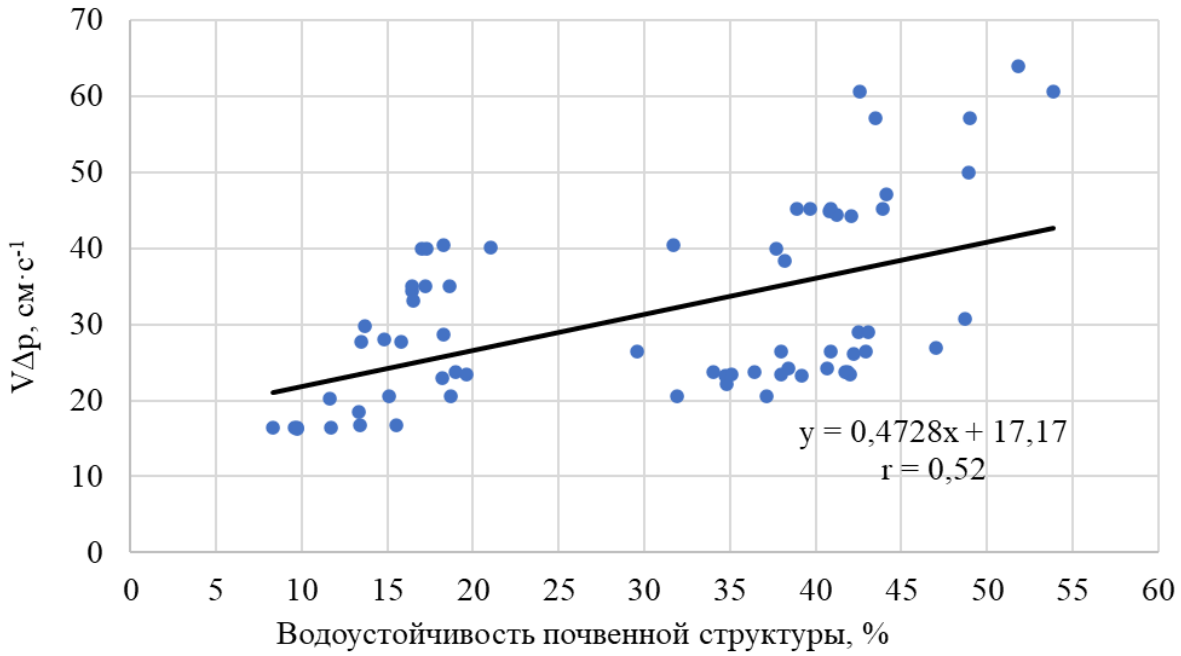

Рис. 1. Зависимость размывающей скорости водного потока ($V_{\Delta p}$) от водоустойчивости макроструктуры почвы

Для дерново-подзолистых почв установлена тесная корреляционная взаимосвязь (r=0,76) между размывающей скоростью водного потока и показателем средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов (рис. 2). При средневзвешенном диаметре водопрочных агрегатов 0,2–0,4 мм размывающая скорость водного потока может изменяться от 15 до 30 см·$с^{-1}$, что соответствует по шкале М. С. Кузнецова низкой и средней противоэрозионной стойкости почвы. При диаметре агрегатов от 0,5 до 0,8 мм величина размывающей скорости водного потока (30–50 см·$с^{-1}$) соответствует высокой противоэрозионной стойкости почвы. Очень высокой противоэрозионной стойкостью обладают почвы со средневзвешенным диаметром водопрочных агрегатов >0,8 мм и $V_{\Delta p}$>50 см·$с^{-1}$.

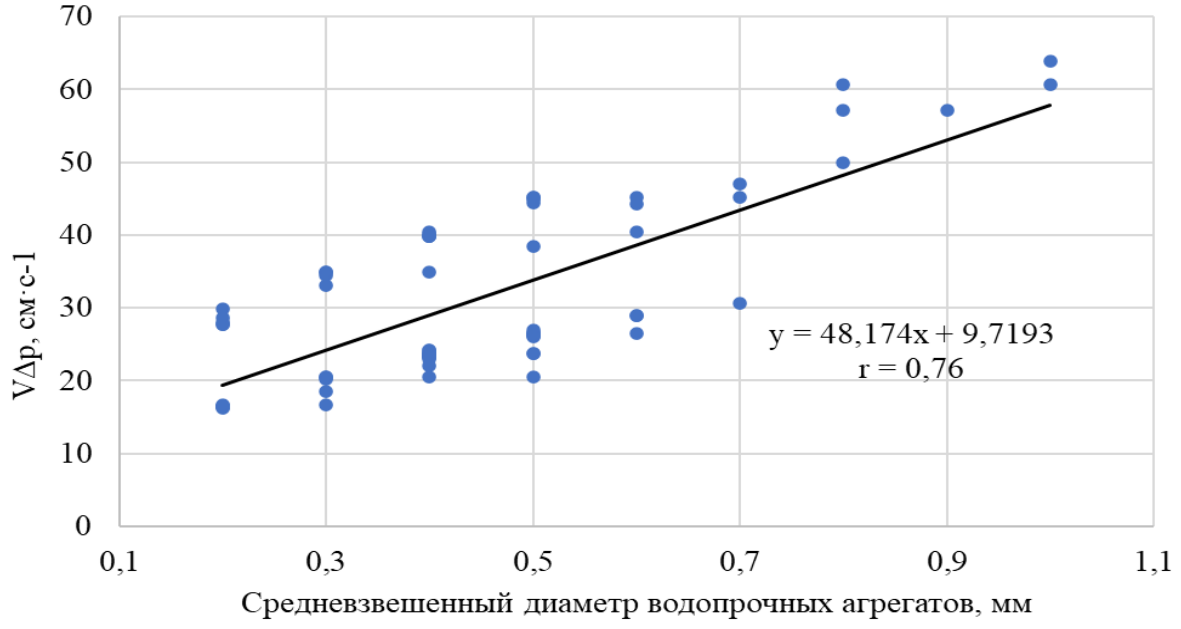

Рис. 2. Зависимость размывающей скорости водного потока ($V_{\Delta p}$) от средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов в почве

ВЫВОДЫ

1. Дерново-подзолистые почвы непосредственно после проведения их механической обработки характеризуются очень низкой устойчивостью к смыву и размыву. Величина размывающей скорости водного потока составляет 9,4–11,1 см·с$^{-1}$ при отвальной и безотвальных чизельной и дисковой обработках. Незначительно выше данный показатель в вариантах с безотвальными обработками, что обусловлено защитным влиянием послеуборочных растительных остатков. Устойчивость почв к размыву снижается с повышением степени их эродированности.

2. Использование эродированных почв в почвозащитных травяных и травянозерновых севооборотах способствует повышению их противоэрозионной стойкости. В зерновом севообороте средне- и сильноэродированные почвы, сформированные на лессовидных суглинках, отличались низкими $V_{\Delta p}$ (16,5–18,5 см·с$^{-1}$), а в травянозерновом севообороте, в котором в течение трех лет возделывалась люцерна посевная, – высокой и средней $V_{\Delta p}$ (33,1 и 29,8 см·с$^{-1}$).

3. На фоне применения органоминеральной системы удобрения в севообороте наблюдалось незначительное повышение противоэрозионной стойкости почв по сравнению с минеральной системой удобрения. Размывающая скорость водного потока составила в среднем на неэродированной почве 25,7 см·с$^{-1}$, на среднеэродированной – 21,8, на сильноэродированной – 18,5 см·с$^{-1}$. Внесение известковых мелиорантов на фоне органоминеральной системы удобрения не привело к повышению $V_{\Delta p}$.

4. Установлена тесная корреляция (r=0,76) между размывающей скоростью водного потока для дерново-подзолистых почв и показателем средневзвешенного диаметра водопрочных агрегатов. При средневзвешенном диаметре водопрочных агрегатов 0,2–0,4 мм размывающая скорость водного потока может изменяться от 15 до 30 см·с$^{-1}$, что соответствует низкой и средней противоэрозионной стойкости почвы. При диаметре агрегатов от 0,5 до 0,8 мм величина $V_{\Delta p}$. соответствует высокой противоэрозионной стойкости почвы. Очень высокой противоэрозионной стойкостью обладают почвы со средневзвешенным диаметром водопрочных агрегатов >0,8 мм и $V_{\Delta p}$>50 см·с$^{-1}$.

Список литературы

Булыгин С.Ю., Комарова Т.Д. К оценке влияния механической обработки на почву // Почвоведение. 1990. №6. С. 135–138.

Дрогозов С.Е. Восстановление структуры эродированных почв // Почвоведение. 1993. №6. С. 45–51.

Кузнецов М.С. Противоэрозионная стойкость почв. М.: Изд-во МГУ, 1981. 135 с.

Кузнецов М.С., Базаров О.А. Противоэрозионная стойкость некоторых почв Таджикистана // Почвоведение. 1993. № 4. С. 96–103.

Кузнецов М.С., Глазунов Г.П. Эрозия и охрана почв: Учебник для вузов. М.: Изд-во Юрайт, 2024. 387 с.

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.

Лисецкий Ф.Н., Светличный А.А., Черный С.Г. Современные проблемы эрозиоведения. Белгород: Константа, 2012. 456 с.

Почвы Республики Беларусь / Под ред. В. В. Лапы. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 632 с.

Теория и методы физики почв: Коллективная монография / Под ред. Е. В. Шеина и Л. О. Карпачевского. М.: «Гриф и К», 2007. 616 с.

Цыбулько Н.Н. Водная эрозия почв сельскохозяйственных земель Беларуси // Журнал Белорусского государственного университета. Экология. 2022. № 3. С. 102–109.

Цыбулько Н.Н., Цырибко В.Б., Жукова И.И., Логачев И.А. Водоустойчивость структуры дерново-подзолистых почв, подверженных водной эрозии, на разных агрофонах // Научно-агрономический журнал. 2024. № 1(124). С. 40–47.

Foster G.R. Modeling the Erosion Process / C.T. Haan, H.P. Johnson, D.L. Brakensiek (eds.) Hydrologic Modeling of Small Watersheds. ASAE Monograph No. 5. ASAE, St. Joseph, MI. 1982. pp. 297–380.

Nearing M.A., Bradford J.M., Parker S.C. Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. Vol. 55. no 2. pp. 339-344.

Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agricultural handbook. 1978. No 537. 65 p.

Reference

Bulygin S.Yu., Komarova T.D. *K otsenke vliyaniya mekhanicheskoy obrabotki na pochvu* [On the assessment of the impact of mechanical treatment on the soil] *// Pochvovedeniye*, 1990. no. 6, pp. 135–138.

Drogozov S.Ye. *Vosstanovleniye struktury erodirovannykh poch*v [Restoration of the structure of eroded soils] // *Pochvovedeniye*, 1993, no. 6, pp. 45–51.

Kuznetsov M.S. *Protivoerozionnaya stoykost' pochv* [Erosion resistance of soils]. M.: Publishing House of Moscow State University, 1981, 135 p.

Kuznetsov M.S., Bazarov O.A. *Protivoerozionnaya stoykost' nekotorykh pochv Tadzhikistana* [Erosion resistance of some soils of Tajikistan] // *Pochvovedeniye*, 1993, no. 4, pp. 96–103.

Kuznetsov M.S., Glazunov G.P. *Eroziya i okhrana pochv* [Erosion and soil protection]. M.: Yurayt Publishing House, 2024, 387 p.

Larionov G.A., Bushuyeva O.G., Dobrovol'skaya N.G., Kiryukhina Z.P., Krasnov S.F., Litvin L.F., Murakayev R.R. *Opredeleniye gidrofizicheskikh parametrov pochvy v modeli erozii* [Determination of hydrophysical parameters of soil in the erosion model] // *Pochvovedeniye*, 2010, no. 4, pp. 488–494.

Lisetskiy F.N., Svetlichnyy A.A., Chernyy S.G. *Sovremennyye problemy eroziovedeniya* [Modern problems of erosion studies]. Belgorod: Constant, 2012, 456 p.

Pochvy Respubliki Belarus' [Soils of the Republic of Belarus] / Ed. V. V. Lapa. Minsk: IVC of the Ministry of Finance, 2019, 632 p.

Teoriya i metody fiziki pochv: Kollektivnaya monografiya [Theory and methods of soil physics: Collective monograph] / Ed. Ye. V. Shein, L. O. Karpachevskiy. M.: «Grif and K», 2007, 616 p.

Tsybul'ko N.N. *Vodnaya eroziya pochv sel'skokhozyaystvennykh zemel' Belarusi* [Water erosion of soils of agricultural lands of Belarus] // *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya*, 2022, no. 3, pp. 102–109.

Tsybul'ko N.N., Tsyribko V.B., Zhukova I.I., Logachev I.A. *Vodoustoychivost' struktury dernovo-podzolistykh pochv, podverzhennykh vodnoy erozii, na raznykh agrofonakh* [Waterproofness of the structure of sod-podzolic soils subject to water erosion on different agrophones] // *Nauchno-agronomicheskiy zhurnal,* 2024, no. 1(124), pp. 40–47.

Foster G.R. Modeling the Erosion Process / C.T. Haan, H.P. Johnson, D.L. Brakensiek (eds.) Hydrologic Modeling of Small Watersheds. ASAE Monograph No. 5. ASAE, St. Joseph, MI. 1982. pp. 297–380.

Nearing M.A., Bradford J.M., Parker S.C. Soil Detachment by Shallow Flow at Low Slopes // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. Vol. 55. no 2. pp. 339-344.

Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses // Agricultural handbook. 1978. No 537. 65 p.