

УДК 631.4

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОЧВЫ, СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРЫВУ И ИНФИЛЬТРАЦИИ ВОДЫ НА СКОРОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ МЕЖАГРЕГАТНЫХ СВЯЗЕЙ

© 2017 г. Г. А. Ларионов*, Н. Г. Добровольская, З. П. Кирюхина, С. Ф. Краснов, Л. Ф. Литвин, А. В. Горобец, И. И. Судницын

МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

*e-mail: larionov425@mail.ru

Поступила в редакцию 25.08.2015 г.

Исследовано влияние плотности монофракционных образцов из пахотного горизонта выщелоченного чернозема на скорость разрушения межагрегатных связей в воде. Скорость разрушения связей определяли в гидравлическом лотке путем чередования пассивных фаз длительностью 1–5 мин, в продолжение которых образец находился под слоем неподвижной воды, с активными короткими (15 с) фазами с потоком воды в лотке. Образцы испытывали также на сопротивление разрыву и определяли в них скорость инфильтрации. Исследования показали, что скорость разрушения межагрегатных связей связана с плотностью почвы гиперболической зависимостью, а со скоростью инфильтрации воды в почву степенной зависимостью. Последняя претерпевает изменения в течение года и поэтому может служить надежным показателем для прогноза сезонной динамики эродированности почвы.

Ключевые слова: эрозия почв, эродированность, межагрегатные связи, плотность почвы, сопротивление почвы разрыву, инфильтрация, выщелоченный чернозем (Luvic Chernozem Pachic)

DOI: 10.7868/S0032180X17010099

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для качественной оценки эродированности почв используются отдельные почвенные свойства или их сочетания [2–4, 9, 15–17, 20, 25]. Однако после появления статистических моделей эрозии возникла настоятельная необходимость в ее количественной оценке. Впервые такой подход был предложен в рамках универсального уравнения эрозии почв [26, 27], в котором эродированность почв, численно равная среднемуголетнему смыву почвы с единицы площади склона, находящегося под бессменным паром, отнесенному к среднемуголетней величине эрозионного потенциала дождевых осадков, оценивается по пяти почвенным характеристикам — содержанию в почве гумуса, водопроницаемости и структуре почвы, содержанию фракций диаметром 0.1–0.002 и <0.002 мм.

В физически обоснованных моделях эрозии нередко не один, а два параметра определяются свойствами почвы. Так, в моделях Фостера [19] и Ларионова [13] почвенными свойствами определяются критические значения касательного напряжения и скорости потока, а также эродированность почв. В модели Мирцхулавы [14] для расчета скорости смыва почвы учитываются диаметр

агрегатов, срывааемых потоком, и донная размывающая скорость, которая рассматривается как функция межагрегатного сцепления и массы почвенных агрегатов. Кузнецов [6, 7] предложил рассчитывать размывающую скорость по средневзвешенному диаметру агрегатов, срывааемых потоком.

Поиск почвенных характеристик, пригодных для расчета параметров, необходимых для определения интенсивности смыва почвы по моделям эрозии, стал еще более востребованным, когда было установлено, что эрозионные характеристики почв подвержены сезонным изменениям [17, 18, 21, 22]. Однако в связи с этим обстоятельством процедура поиска параметров, определяющих эрозионные свойства почв, еще более усложнилась.

В предыдущей работе авторов настоящей статьи [11] показано, что в процессе водной эрозии разрушение связей между частицами почвы происходит не за счет гидравлических сил водных потоков, которые на 3 порядка меньше сопротивления почвы разрыву [23], а в результате проникновения молекул воды в область контактов между почвенными частицами и их нарушения. Очевидно, что в этом случае темп нарушения связей между частицами и, соответственно, интенсивность эрозии, зависит от площади контакта между ними и

Таблица 1. Физико-химические свойства пахотного (0–20 см) горизонта выщелоченного чернозема. Физико-химические анализы и гранулометрический состав почвы выполнены в Аналитической инструментальной лаборатории Почвенного института имени В.В. Докучаева

Содержание ОВ*, %	pH		Нг**, смоль(экв)/кг	Ca	Mg	Na	K	Σчастиц <0.01 мм, %
	H ₂ O	KCl		смоль(экв)/кг***				
				% от суммы обменных оснований				
5.79	6.52	5.74	2.51	$\frac{32.6}{83.2}$	$\frac{5.06}{12.9}$	$\frac{0.33}{0.8}$	$\frac{1.20}{3.1}$	59.3

* ОВ — массовая доля органического вещества по Тюрину (%). ** Нг — гидролитическая кислотность по Каппену (смоль(экв)/кг). *** Обменные основания по Шолленбергеру.

температуры, которая определяет кинетическую энергию молекул воды [10]. Площадь контактов между частицами почвы, в свою очередь, находится в линейной зависимости от плотности почвы. Это следует из ориентировочных расчетов, которые были выполнены при следующих допущениях: а) почвенные агрегаты имеют шаровую форму и одинаковый размер, б) почвенная масса пластична и в) упаковка агрегатов гексагональная [12]. Неаринг [23] полагал, что сопротивление почвы разрыву также может служить индикатором скорости разрушения межагрегатных связей и, следовательно, эродруемости.

Целью данной статьи является оценка влияния плотности почвы, ее сопротивления разрыву и инфильтрации на скорость нарушения связей между частицами почвы, от которой зависит эродруемость почв.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили на пахотном горизонте (0–20 см) выщелоченного чернозема (Luvic Chernozem Pachic) из Воловского р-на Тульской обл. [1, 10, 12]. В табл. 1 приведены его физико-химические свойства. Содержание физической глины, то есть частиц с эффективным диаметром <0.01 мм, в почве составляет 59.3%. Следовательно, пахотный горизонт исследуемой почвы — легкоглинистый. В почвенном поглощающем комплексе (ППК) преобладают кальций и магний, их суммарная доля составляет 96.1% от суммы обменных оснований.

Для проведения экспериментов использовали фракции почвенных агрегатов размером 1–2 мм. Накануне экспериментов, в среднем за 18–20 ч, воздушно-сухие навески почвы помещали в алюминевые боксы и добавляли к ним воду в количестве, эквивалентном 24% от массы воздушно-сухой почвы, равномерно распределяя ее по поверхности образца. Ранее было установлено, что наименьшая интенсивность размыва пахотного горизонта данной почвы наблюдалась при исход-

ной влажности 22–24% от массы воздушно-сухой почвы [10].

В серии опытов для определения скорости нарушения межагрегатных связей предварительно увлажненные навески воздушно-сухой почвы в количестве, обеспечивающем заданную плотность от 1.2 до 1.5 г/см³ (с шагом 0.1 г/см³) формовали в кассете с внутренними размерами 3.6 × 1.6 × 7.0 см. В нижнюю часть кассеты вставляли вкладыш высотой 3 см. В день проведения опыта увлажненную навеску почвы высыпали на лист пергамина, перемешивали и небольшими порциями переносили в кассету, где разравнивали ее по дну и уплотняли пестиком, поперечное сечение которого в нижней части было близким к поперечному сечению кассеты. Перед укладкой последней порции почвы на кассету ставили надставку, площадь которой равна площади кассеты, и переносили в нее последнюю порцию почвы. Ее поверхность также выравнивали, а затем в надставку помещали плунжер, высота которого точно равна высоте надставки, и винтовым прессом вдавливали его до упора. В результате этих манипуляций поверхность почвенного образца была на одном уровне с краями кассеты. Кассету с почвой помещали в гнездо гидравлического лотка и закрепляли ее винтом. Размеры лотка приведены в нашей предыдущей работе [11].

В процессе определения скорости размыва почв, а следовательно, и нарушения связей между частицами почвы, активные периоды эксперимента длительностью 15 секунд, в течение которых почвенные частицы, лишившиеся сцепления с нижележащим слоем образца, смывались потоком воды глубиной 1 см, чередовались с паузами, в продолжение которых образец находился под слоем неподвижной воды также глубиной 1 см. Как было показано ранее [1, 11], за 15 с смываются все частицы почвы, дезинтегрированные во время паузы. Продолжительность пауз варьировала: 1, 2, 3 или 5 мин. Каждый эксперимент продолжался до полного размыва образца. При каждой длительности пауз эксперименты проводи-

лись в 4–8-кратной повторности. В качестве контроля служили опыты, проводившиеся без пауз. Всего было испытано 120 образцов. Все опыты проведены при скорости потока 0.95–0.97 м/с. Температуру воды поддерживали на уровне 20°C. Скорость нарушения межагрегатных связей определяли делением массы образца на общую продолжительность эксперимента (сумму длительностей пауз и активных фаз).

Для выявления связи между скоростями нарушения межагрегатных связей образцов почв с их механической прочностью определяли сопротивление разрыву образцов почвы различной плотности от 1.2 до 1.5 г/см³ с шагом 0.1 г/см³ проводили на оригинальном устройстве (рис. 1). Образцы почвы для испытания на разрыв готовили так же как и для определения скорости размыва. Массу навесок почвы рассчитывали, исходя из рабочего объема кассеты и заданной величины плотности почвы.

В процессе измерений образец почвы, находящийся в цилиндрической кассете, состоящей из двух одинаковых трубок (длина трубки – 25 мм, диаметр – 18.7 мм), помещали на двух поплавках, устойчивость которых обеспечивалась стальными грузиками таким образом, чтобы разъем кассеты приходился на промежуток между поплавками.

После фиксации кассеты с почвой на поплавках с помощью капроновых нитей, в пластиковый стакан для балласта маленькими порциями добавляли песок. Последние порции песка перед наступлением разрыва почвы в кассете добавляли очень медленно. После разрыва почвы в кассете стакан с песком взвешивали и путем деления веса песка на поперечное сечение кассеты рассчитывали напряжение разрыва (кПа). Опыты проводили в 15-кратной повторности.

Определение скорости инфильтрации (впитывания) воды в модельные образцы почвы проводили в кассетах в 5-кратной повторности. В кассету с почвой вставляли игольчатую рейку, острие которой располагалось на 5 мм ниже верхнего края кассеты, и заливали воду в количестве, достаточном для заполнения свободного объема кассеты. В момент заполнения кассеты водой включали секундомер.

В момент выхода острия рейки из-под поверхности воды секундомер останавливали. Скорость инфильтрации воды в почву рассчитывали делением толщины слоя (5 мм) впитавшейся воды на время впитывания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты экспериментов по определению сопротивления разрыву образцов почвы различной плотности показали, что между этими свой-

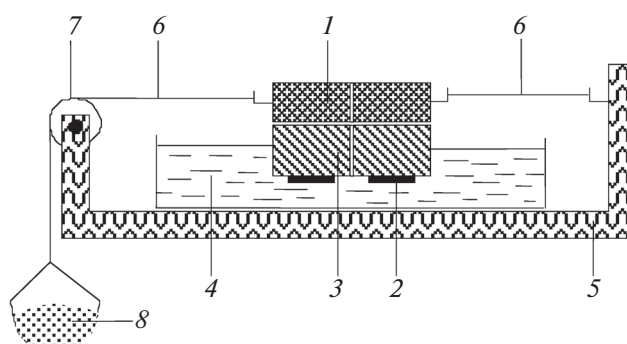


Рис. 1. Схема установки для определения сопротивления разрыву модельной почвы: 1 – цилиндрическая кассета; 2 – металлический груз на поплавке; 3 – пенопластовый поплавок; 4 – емкость с водой; 5 – корпус установки; 6 – капроновая нить; 7 – блок; 8 – пластиковый стакан с балластом (крупный кварцевый песок).

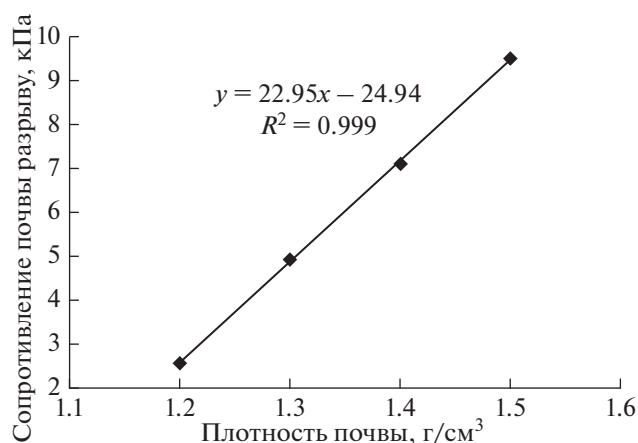


Рис. 2. Зависимость сопротивления разрыву от плотности почвы.

ствами существует прямолинейная зависимость (табл. 2, рис. 2).

Результаты измерений скорости нарушения межагрегатных связей в модельных образцах почвы при ее различной плотности (табл. 3) свидетельствуют о том, что при увеличении суммарной продолжительности активных фаз эксперимента и пауз скорость нарушения межагрегатных связей уменьшается.

Обнаружена тесная обратная степенная зависимость между скоростью нарушения межагрегатных связей и плотностью почв (табл. 4). Линейная зависимость между плотностью почв и расчетным значением суммарной площади межагрегатных контактов была показана нами ранее [12].

Изложенное выше дает основание для предположения, что кроме рассмотренных почвенных свойств, существуют и иные свойства, влияющие на скорость разрушения межагрегатных связей в почве под действием воды. Одним из таких

Таблица 2. Сопротивление разрыву (кПа) образцов почвы при ее различной плотности

Статистические показатели	Плотность почвы, г/см ³			
	1.2	1.3	1.4	1.5
Среднее (<i>M</i>)	2.58	4.94	7.14	9.50
Медиана (<i>Med</i>)	2.72	5.15	7.23	9.50
Стандартное отклонение (<i>s</i>)	0.72	1.14	0.85	1.85
Максимум (<i>max</i>)	3.95	6.96	8.90	13.1
Минимум (<i>min</i>)	1.63	2.47	5.90	6.97
Коэффициент вариации (<i>Cv</i> , %)	27.7	23.1	11.9	19.5
Количество измерений (<i>n</i>)	15	15	15	15

Таблица 3. Скорость нарушения межагрегатных связей в модельных образцах почвы при ее различной плотности

Число опытов	Плотность почвы, г/см ³	Продолжительность, с		Суммарное время размыва и пауз, мин	Средняя интенсивность нарушения связей, г/(м ² с)	Коэффициент вариации, %
		паузы	размыва			
5	1.2	0	—*	1.7	240.8	20.5
5	1.2	60	15	8.0	52.7	27.0
5	1.2	120	15	14.6	27.7	18.1
5	1.2	180	15	16.7	25.2	24.8
6	1.2	300	15	19.1	21.0	20.7
8	1.3	0	—*	9.7	53.9	46.0
4	1.3	60	15	15.0	24.2	9.0
5	1.3	120	15	17.0	25.5	8.2
7	1.3	180	15	26.3	14.5	13.5
7	1.3	300	15	40.1	12.8	40.4
4	1.4	0	—*	26.4	20.1	41.0
4	1.4	60	15	14.5	30.5	18.6
7	1.4	120	15	34.2	12.5	39.8
4	1.4	180	15	41.2	11.5	40.4
4	1.4	300	15	50.2	9.7	25.8
7	1.5	0	—*	65.3	10.0	24.2
5	1.5	60	15	42.9	11.9	19.0
6	1.5	120	15	49.6	11.4	47.1
5	1.5	180	15	72.7	7.0	16.0
8	1.5	300	15	97.0	5.9	39.0

* Размыв образцов без пауз.

свойств может оказаться водопроницаемость почв, поскольку для того, чтобы на некоторой глубине началось нарушение межагрегатных связей, туда должен проникнуть фронт промачивания, а скорость его движения сильно зависит от плотности почвы. Так, например, отмечались 30–40-кратные различия в скорости инфильтрации в сероземе, уплотненном при сооружении террас, и в этой же почве естественного сложения с плотностью 1.17–1.23 г/см³ [8]. По своему масштабу

эти различия близки к различиям в скорости нарушения межагрегатных связей в почве при ее плотности 1.2 и 1.5 г/см³ (табл. 3).

Для верификации этой гипотезы была определена скорость инфильтрации в модельных образцах почвы. Результаты определения скорости инфильтрации 5-миллиметрового слоя воды приведены в табл. 5, а характерный вид связи между скоростью инфильтрации и плотностью почвы показан на рис. 3. Зависимость между скоростью

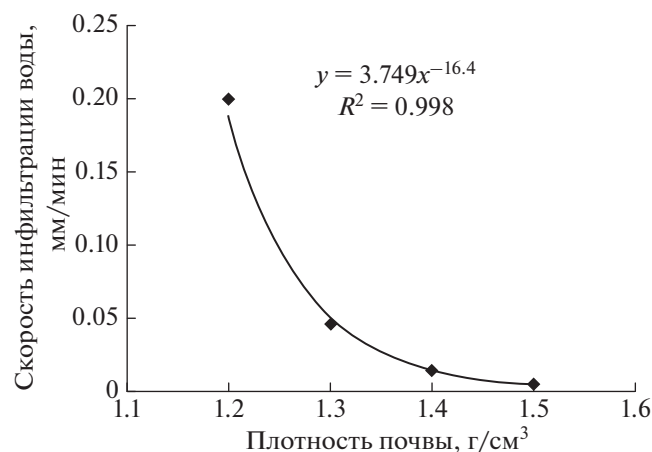
Таблица 4. Зависимости скорости нарушения межагрегатных связей (Y) от плотности почвы (X) и интенсивности инфильтрации воды (Z)

Продолжительность пауз, с	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации, R^2
Плотность – скорость разрушения связей**		
—*	$Y = 2730X^{-14.22}$	0.98
60	$Y = 140X^{-5.66}$	0.78
120	$Y = 68X^{-4.54}$	0.87
180	$Y = 66X^{-5.48}$	0.98
300	$Y = 56X^{-5.46}$	0.98
Инфильтрация – скорость разрушения связей***		
—*	$Y = 1191Z + 2.00$	0.99
60	$Y = 89Z^{0.35}$	0.79
120	$Y = 46Z^{0.27}$	0.85
180	$Y = 42Z^{0.33}$	0.98
300	$Y = 36Z^{0.33}$	0.98

* Опыты без пауз.

** Плотность почвы (X) в диапазоне 1.2–1.5 г/см³.*** Интенсивность инфильтрации воды (Z) в диапазоне 0.2–0.005 мм/мин.**Таблица 5.** Скорость инфильтрации воды в почву при ее различной плотности (исходная влажность почвы – 24% от массы воздушно-сухой почвы)

Плотность почвы, г/см ³	Инфильтрация, мм/мин
1.2	0.200
1.3	0.046
1.4	0.015
1.5	0.005

**Рис. 3.** Зависимость скорости инфильтрации воды от плотности почвы.

нарушения межагрегатных связей и скоростью инфильтрации оказалась хотя и не прямолинейной, а степенной, но с высоким коэффициентом корреляции (табл. 4). Это дает основание рекомендовать инфильтрационную способность почв в качестве одного из индикаторов их противозерозионной устойчивости.

Поскольку важным свойством инфильтрационной способности почв является ее сезонное изменение [5, 8, 16, 17, 20, 24], ее можно использовать для прогноза внутригодовой динамики эрозионных характеристик почвы.

В условиях контрастной влажности почвы такая динамика водопроницаемости почв наблюдается практически повсеместно как под покровом естественной растительности, так и на обрабатываемых почвах [5, 8, 9, 24]. В связи с этим и влажность почвы, и ее смачиваемость также могут служить индикаторами динамики эрозионных характеристик почвы. При этом для использования на практике более перспективным представляется использование влажности почвы, так как определение смачиваемости почвы – задача технически гораздо более сложная, чем измерение влажности.

Следует также учитывать, что скорость разрушения межагрегатных связей в почве определяется не только инфильтрацией воды в почву, но и процессами замерзания, оттаивания, увлажнения и высыхания почвы [7, 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что скорость нарушения межагрегатных связей может быть использована для определения эродированности почв в теоретических моделях, описывающих процессы эрозии. В то же время скорость разрушения межагрегатных связей коррелирует с такими легко определяемыми параметрами, как плотность почв и скорость инфильтрации в них воды, которые также могут служить надежными показателями для оценки эродированности почвы и ее сезонной динамики.

Благодарность. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-05-00474а) и программы Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (проект НШ-1010.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуева О.Г., Горобец А.В., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Ларионов Г.А., Литвин Л.Ф. Разрушение межагрегатных связей между частицами почвы в процессе водной эрозии // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 78. С. 20–30.
2. Вознесенский А.С., Ариуни А.Б. Физико-химические свойства почв как фактор поверхностного смыва // Бюл. Закавказского НИИВХ. Тбилиси, 1936. № 12–13. С. 225–253.

3. Гусак В.Б. Некоторые вопросы методики и техники лабораторных исследований эродированности почв // Почвоведение. 1950. № 5. С. 286–295.
4. Гусак В.Б. Факторы и внутренние последствия поверхностных смылов красноземов в условиях влажных субтропиков // Эрозия почв. М., 1937. С. 103–154.
5. Коновалов Н.Н., Попов А.А. Сравнительная характеристика водопроницаемости почв при различной их влажности // Почвоведение. 1961. № 5. С. 104–105.
6. Кузнецов М.С. О влиянии предварительного увлажнения на противозерозионную стойкость светлокаштановых почв Ергеней (исследование образцов нарушенного строения) // Вестник Моск. ун-та. Сер. VI. Биология, почвоведение. 1967. № 3. С. 91–99.
7. Кузнецов М.С. Противозерозионная стойкость почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 135 с.
8. Ларионов Г.А. Влияние рельефа и сезонной динамики физико-географических условий на водопроницаемость почв среднегогорного пояса Западного Тянь-Шаня. Автореф. дис. ... канд. геогр. н. М., 1973. 27 с.
9. Ларионов Г.А. Сезонная динамика водопроницаемости темных сероземов и коричневых почв Западного Тянь-Шаня // Эрозия почв и русловые процессы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1974. Вып. 4. С. 110–127.
10. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Влияние температуры воды и влажности почвы на эродированность образцов чернозема (модельный опыт) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 890–896. doi: 10.7868/S0032180X14070107
11. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф., Краснов С.Ф. Оценка вклада сил негидравлической природы в нарушение связей между почвенными частицами в процессе водной эрозии // Почвоведение. 2016. № 5. С. 593–598. doi: 10.7868/S0032180X16050117
12. Ларионов Г.А., Бушуева О.Г., Добровольская Н.Г., Кирюхина З.П., Литвин Л.Ф. Эродированность модельной почвы различной плотности // Почвоведение. 2011. № 8. С. 995–999.
13. Ларионов Г.А., Краснов С.Ф. Вероятностная модель размыва почв и связанных грунтов // Почвоведение. 2000. № 2. С. 235–242.
14. Мирицхулава Ц.Е. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос, 1970. 240 с.
15. Соболев С.С., Пономарева С.И. К изучению противозерозионной стойкости почв // Почвоведение. 1945. № 9–10. С. 84–85.
16. Cook H.L. The nature and controlling variables of water erosion process // Proc. Soil Sci. Soc. Am. 1936. V. 15. P. 240–248.
17. Coote D.R., Malcolm-McGovern C.A., Wall G.J., Dickinson W.T., Rudra R.P. Seasonal variation of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario soils // Can. J. Soil Sci. V. 68. P. 405–416.
18. Formanek G.E., McCool D.K., Papendick R.I. Freezethaw and consolidation effect on strength of a wet silt loam // Transactions of the ASAE. 1982. V. 27. № 7. P. 1749–1752.
19. Foster G.R. Modeling the erosion process / Eds.: C.T. Haan, H.P. Johnson, D.L. Brakensiek. Hydrologic Modeling of Small Watersheds. ASAE Monograph. St. Joseph, MI. 1982. № 5. P. 297–380.
20. Horton J.H., Hawkins R.H. Flow path of rain from the soil surface to the water table // Soil Sci. 1965. V. 100. № 6. P. 377–383.
21. Imeson A.C., Vis M. Seasonal variations in soil erodibility under different land-use type in Luxembourg // J. Soil Sci. 1984. V. 35. № 4. P. 323–331.
22. Mitchler C.K., Carter C.E. Soil erodibility variation during the year // Transactions of the ASAE. 1983. V. 29. № 4. P. 1102–1108.
23. Nearing M.A., Parker S.C., Bradford J.M., Elliot W.J. Tensile strength of thirty-three saturated repacked soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1991. V. 55. № 6. P. 1546–1551.
24. Shum S.A., Lusby G.C. Seasonal variation of infiltration capacity and runoff on hillslopes in Western Colorado // J. Geophys. Res. 1963. V. 68. № 12. P. 3655–3666.
25. Wischmeier W.H., Johnson C.B., Cross B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites // J. Soil and Water Conservation. 1971. V. 26. P. 189–193.
26. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington. USDA. Agriculture Handbook № 282. 1965. 47 p.
27. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses — a guide conservation planning. U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook № 537. 1978. 58 p.