

УДК 631.3.004

UDC 631.3.004

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
ИСКУССТВЕННОГО ДОЖДЯ**

**SUBSTANTIATION OF THE PARAMETERS OF  
AN ARTIFICIAL RAIN**

Шекихачев Юрий Ахметханович  
д.т.н., профессор

Shekihachev Yury Akhmetkhanovich  
Dr.Sci.Tech., professor

Шомахов Лев Аслангериевич  
д.т.н., профессор

Shomahov Lev Aslangerievich  
Dr.Sci.Tech., professor

Пазова Таймира Хасановна  
д.т.н., доцент

Pazova Taimira Hasanovna  
Dr.Sci.Tech., associate professor

Балкаров Руслан Асланбиевич  
д.т.н., профессор

Balkarov Ruslan Aslanbievich  
Dr.Sci.Tech., professor

Алоев Владимир Закиевич  
д.х.н., профессор

Aloev Vladimir Zakievich  
Dr.Sci.Chem., professor

Шекихачева Людмила Зачиевна  
к.с.-х.н., доцент  
*Кабардино-Балкарский государственный аграрный  
университет им. В.М.Кокова, Нальчик, Россия*

Shekihacheva Lyudmila Zachievna  
Cand.Tech.Sci., associate professor  
*Kabardino-Balkarian state agrarian university of  
V.M.Kokova, Nalchik, Russia*

Медовник Анатолий Николаевич  
д.т.н., профессор

Medovnik Anatoliy Nikolaevich  
Dr.Sci.Tech., professor

Твердохлебов Сергей Анатольевич  
к.т.н., доцент  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Tverdokhlebov Sergey Anatolevich  
Candidate of Technical Sciences, assistant professor  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье проанализирована целесообразность применения метода расчета по предельному состоянию для определения допустимых (неразмывающих) скоростей водного потока для условий Кабардино-Балкарской республики, обоснованы критерии для выбора параметров модельного дождя

In the article we have analyzed the expediency of application of the method of calculation of definition of supposed (not washing away) speeds of water streams on a limiting condition for the Kabardino-Balkarian republic; criteria for a choice of parameters of a modeling rain are proved

Ключевые слова: ЭРОЗИЯ, ДОЖДЕВАНИЕ, МОДЕЛЬНЫЙ ДОЖДЬ

Keywords: EROSION, OVERHEAD IRRIGATION, MODELLING RAIN

Эрозия почвогрунтов – процесс не только гидромеханический, но и физико-химический и биологический. Размывающую скорость водного потока следует рассматривать как функцию генезиса почв и их минералогического и гранулометрического состава и последующего воздействия сложных физико-химических и биологических процессов [1, 2].

Из всего комплекса физико-химических свойств почвогрунтов, определяющих размываемость, самыми показательными являются

сцепление при полной влагоемкости, размеры отрывающихся частиц [3, 4]. Сопротивление размыву возрастает с увеличением сил сцепления при полной влагоемкости, интегрально отражающих весь комплекс физико-технических и химических свойств и характеризующих сопротивляемость размыву (прочность, водопрочность связей, устойчивость против разрушающего воздействия водного потока).

Наиболее простой и удобный метод определения сил сцепления – метод Цитовича с последующим применением методов математической статистики при обработке полученных данных.

Для того, чтобы исследовать сопротивляемость почв в различных зонах КБР предпочтителен метод расчета по предельному состоянию для определения допустимых (неразмывающих) скоростей водного потока [5]. Это объясняется тем, что прогноз возможной перегрузки и снижение устойчивости против средних расчетных значений основан на теории вероятностей и обработки данных опытов и наблюдений методами математической статистики. Без применения этого метода невозможно правильно учитывать изменчивость свойств почвогрунтов и описывать процесс эрозии.

На разных метеостанциях параметры дождя различны. Поэтому не представляется возможным ставить задачу создания точно таких же осадков с помощью дождевальных установок [6]. Следует определить характеристику дождя, которая была бы тесно связана со смывом почвы. При условии наличия подобной характеристики для естественного дождя, появляется возможность подбора параметров для искусственного дождя, который обеспечивал бы такой же эрозионный эффект как и естественный. Следовательно, необходимо установить критерии для выбора параметров модельного дождя.

Дождевание используется уже довольно давно, однако подобного рода критерии до настоящего времени все еще не установлены, что создает большую неопределенность в толковании получаемых результатов.

Главной задачей в методологии дождевания является обоснование параметров искусственного дождя, которые должны обеспечивать дождевальную установку.

Ниже предлагается подход к решению этой задачи. Так как любой метод основывается на теории, то решению поставленной задачи уделяется особое внимание.

Для упрощения, чтобы лучше представить физику процесса, рассмотрим монодисперсный дождь, т.е. когда все капли имеют одинаковые диаметр  $d$  и скорость падения  $V$ . Интенсивность дождя  $I$  примем постоянной во времени  $t$ . Любой такой дождь описывается следующими четырьмя независимыми параметрами:  $d$ ,  $V$ ,  $t$  и  $n$ . Величина  $n$  определяет количество капель в единице воздушного пространства.

Все остальные параметры дождя являются производными этих четырех. Например, объем капли  $w = \pi d^3 / 6$ , масса капли  $m = \rho w$  ( $\rho$  - плотность воды), импульс капли  $mV$ , ее кинетическая энергия  $mV^2/2$ , интенсивность дождя  $I = nwV$  (средняя скорость движения массы воды), слой осадков  $h = It$ .

Часто для описания дождевых осадков используется кинетическая энергия капель. Например, Г.И. Швобс [7] предложил использовать удельную мощность (кинетическая энергия, нормированная на единицу времени и единицу площади). Рассматривая удар капель о почву, Ю.П. Сухановский и др. [8] предложили эрозионную характеристику дождя, которая (как будет показано далее) является основой для моделирования дождевых осадков. Ниже приводится ее вывод в более простой форме, раскрывающей в большей мере физический смысл, что является весьма важным в понимании рассматриваемой проблемы.

Начало эрозионного процесса – это удар дождевой капли о почву. При этом происходит ее торможение. Сила торможения, согласно закону Ньютона, равна

$$f \approx \frac{mV}{\tau} = \frac{\rho w V}{\tau}, \quad (1)$$

где  $\tau \approx \frac{d}{V}$  – время торможения (которое происходит в слое толщиной  $d$  у поверхности почвы).

Количество капель в слое торможения, нормированное на единицу площади, равняется  $nd$ . Тогда давление ( $\text{Н/м}^2$ ), создаваемое этими каплями, запишется

$$F = fnd \approx \rho V^2 I. \quad (2)$$

При выводе этого соотношения использовано равенство  $I = nwV$ .

При выпадении слоя осадков величиной  $h = It$  силы торможения ( $\text{Дж/м}^2$ ) совершают работу, равную

$$A = Fh \approx \rho V I^2 t \quad (3)$$

Правую часть (2.19) можно представить в следующем виде

$$A \approx (\rho V I)(It) = (\rho V n w V) h \approx \frac{nmV^2}{2} h, \quad (4)$$

где  $\frac{nmV^2}{2}$  – кинетическая энергия капель дождя в единице воздушного пространства;  $h$  – слой осадков.

Из (4) следует (и это весьма важно), что величина  $A$  определяется слоем осадков и удельной энергией дождевых капель. Выражение (3) запишем в виде

$$A = at, \quad (5)$$

где  $a = \rho V I^2$  представляет собой удельную мощность ( $\text{Вт/м}^2$ ) сил торможения.

Используя приведенные выше соотношения, можно показать, что кинетическая энергия капель дождя, выпавших за время  $t$  на единицу площади, запишется

$$E \approx \rho V^2 I t . \quad (6)$$

Тогда отношение  $A/E \sim I/V \ll 1$ . В этом и заключается принципиальное различие между энергией дождевых капель и работой сил торможения, совершаемой ими при ударе о поверхность почвы.

Вишмайер [9] эмпирически предложил эрозионный индекс дождя  $EI_{30}$ , среднемноголетнее значение которого хорошо коррелирует со среднемноголетним смывом почвы. Это послужило основой для известного универсального уравнения потерь почвы [10].

Янг и Бурвел [11] сделали следующее предположение. Если при дождевании задать значение  $EI_{30}$  такое же как и для естественного дождя, то смыв почвы должен быть одинаковым в обоих случаях. Проведенный ими эксперимент подтвердил это предположение.

Для упрощения рассмотрим гипотетический естественный дождь, выпадающий с постоянной интенсивностью в течении 30 минут. Для естественных дождей между средним диаметром капель  $d$  (мм) и интенсивностью дождя  $I$  (мм/час) справедливо соотношение [12]

$$d = 1,06 I^{0,2} . \quad (7)$$

При установившемся падении капли ее скорость в зависимости от диаметра определяется формулой

$$V = 41,5 \sqrt{gd} .$$

Используя выражение (2.22) и последнее, можно показать, что

$$EI_{30} \approx \rho I^{2,2} ,$$

$$A \approx \rho I^{2,1} t .$$

Следовательно, величины  $EI_{30}$  и  $A$  практически одинаково характеризуют эрозионную способность дождя.

Для произвольного естественного дождя выражение для  $A$  (5) с помощью (7) запишется

$$A = \rho \sum V_i I_i^2 \Delta t_i = 0,106 \sum I_i^{2,1} \Delta t_i , \quad (8)$$

где  $\Delta t_i$  – интервал времени;  $V_i I_i$  – средние значения скорости падения капель и интенсивности дождя для этого интервала времени.

В правой части (8) величины имеют следующие размерности:  $[I_i] = \text{мм/мин}$ ,  $[\Delta t_i] = \text{мин}$ . Величина  $A$  имеет размерность  $\text{Дж/м}^2$ .

На рис. 1 сопоставлены значения  $EI_{30}$  и  $A$  для дождей, зарегистрированных в КБР (метеостанция «Нальчик»). Аналогичная картина наблюдается и для дождей практически на всем юге России. В табл. 1 представлены некоторые характеристики дождей для разных зон.

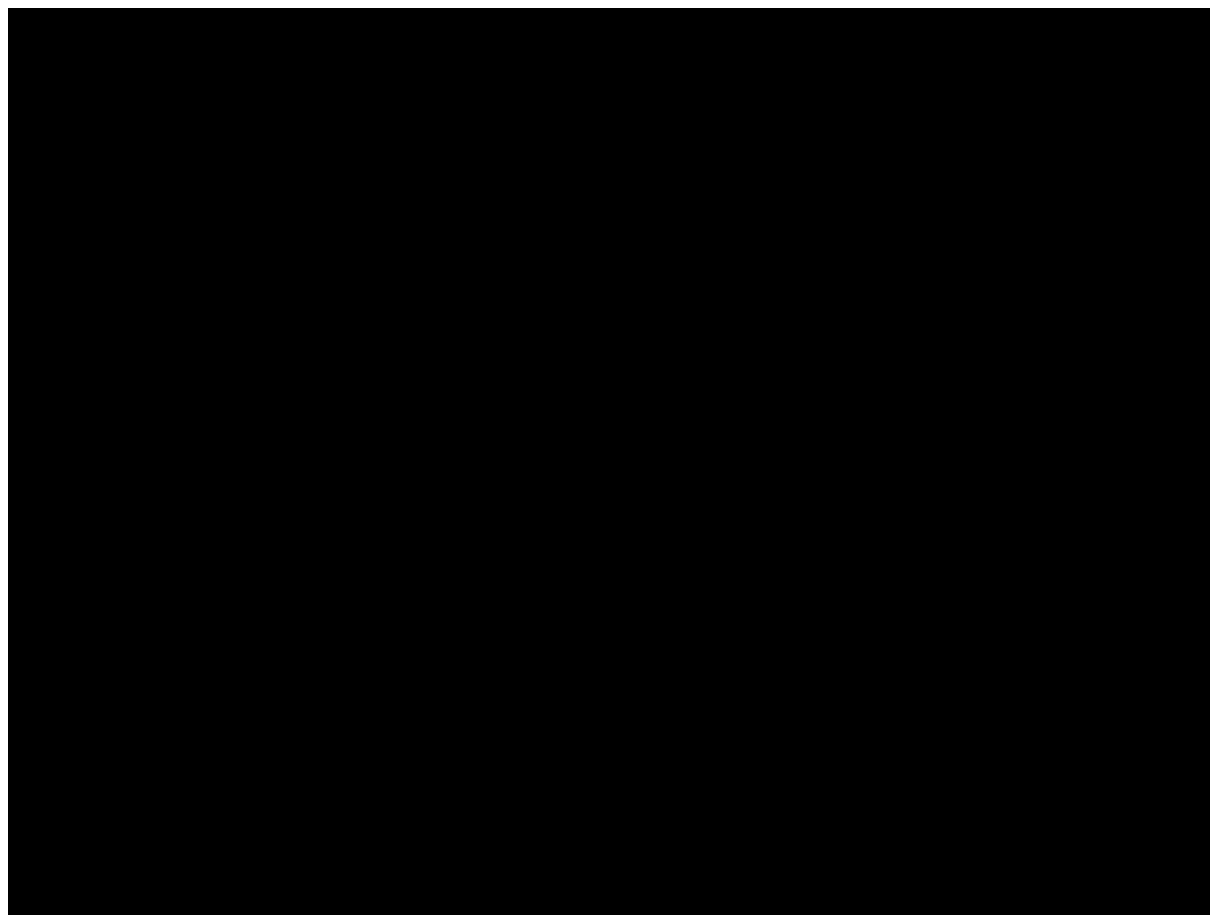


Рисунок 1 – Зависимость между  $A$  и  $EI_{30}$ .

Полученные данные позволяют сделать весьма важный вывод, что между величинами  $EI_{30}$  и  $A$  существует высокая корреляция. А это, в свою

очередь, дает основание для утверждения, что и величина  $A$  (также как и  $EI_{30}$ ) хорошо коррелирует со смывом почвы.

Важно отметить, что отношение  $EI_{30}/A$  (табл. 1) практически одинаково для дождей, зарегистрированных на разных метеостанциях. Это означает, что в универсальном уравнении потерь почвы вместо  $EI_{30}$  можно использовать эрозионную характеристику  $A$  с соответствующим поправочным коэффициентом.

Таблица 1 – Среднемноголетние значения  $A$  и  $EI_{30}$

Метеостанции	г. Прохладный	г. Нальчик	с. Каменно-мостское
Период наблюдений, год	32	26	21
$A \times 10^3$ , Дж/м <sup>2</sup>	3,4	5,9	10,1
$EI_{30} \times 10^3$ , Дж/м <sup>2</sup> х м/с	8,8	15,9	28,3
Коэффициент корреляции	0,95	0,94	0,95
$EI_{30}/A$	2,6	2,7	2,8

Зависимость (8) можно представить в следующем виде

$$A = 0,106 \sum I_i^{2,1} \Delta t_i = 0,106 \sum \Delta h_i I_i^{1,1},$$

где  $\Delta h_i = I_i \Delta t_i$  – слой осадков за  $\Delta t_i$ .

Таким образом, для естественного дождя величина  $A$  (следовательно, и смыв почвы) зависит не только от слоя дождя, но и от его интенсивности.

Таким образом, величина  $A$ , которая определяет работу сил торможения при ударе дождевых капель о твердую поверхность, может быть названа эрозионной характеристикой дождя.

Изложенное выше дает основание предположить, что если для искусственного и естественного дождей значения эрозионной характеристики будут одинаковыми, то должны быть одинаковыми и величины смыва почвы (при прочих равных условиях). В частности, это относится и к монодисперсному модельному дождю.

При выборе параметров искусственного дождя необходимо соблюдение равенства

$$A_n = A_m = \rho V_m I_m^2 t_m, \quad (9)$$

где  $n$  – натурные условия;  $m$  – моделируемые условия.

Соблюдение равенства (9) является необходимым условием, но все же не достаточным. К примеру, в данном случае возможен подбор такой низкой интенсивности  $I_m$  (и большой продолжительности  $t_m$ ), что будет обеспечено полное впитывание осадков. Это означает, что требуются дополнительные критерии для выбора параметров дождя.

Известно, что при моделировании любой моделируемый процесс должен быть качественно таким же, как и процесс, протекающий в натуральных (естественных) условиях. Это означает, что при искусственном дождевании должно происходить разбрызгивание почвы и формирование стока и смыва.

Решение данной задачи - выбор значений параметров модельного (искусственного) дождя (интенсивность, продолжительность, размер и скорость капель), которые близки к естественному дождю. При этом, как указывалось выше, необходимо соблюдение равенства (9).

Анализ многолетних статистических данных по осадкам, которые вызвали смыв почвы, показал, что они имеют «ядро», которое имеет один и более максимумов. Подобного рода «ядро» и вызывает смыв почвы. Таким образом, параметры искусственного дождя должны определяться



этим «ядром». С учетом этого и используя выражение (5), искомые параметры можно оценить из равенства

$$a_n = a_m \text{ или } \rho V_n I_n^2 = \rho V_m I_m^2.$$

Отсюда

$$I_m = I_n \sqrt{\frac{V_n}{V_m}}. \quad (10)$$

Поскольку при дождевании, как правило,  $V_m < V_n$ , то должно быть  $I_m > I_n$ .

Диаметр капли в явном виде не входит в выражение для  $A$  (5). Однако, как отмечалось выше, существует слабая зависимость диаметра капель от интенсивности дождя (7). Например, при  $I = 2$  мм/мин,  $d = 2,8$  мм. Увеличение интенсивности в 2 раза приводит к увеличению диаметра капель всего лишь на 15 %.

Таким образом, если для искусственного дождя принять  $d = 3$  мм, то это будет соответствовать естественным дождям высокой интенсивности и в большом диапазоне значений.

С другой стороны, ударный эффект капель о почву зависит от импульса  $mV$ . Отсюда следует, что если  $V_m < V_n$ , то для искусственного дождя диаметр капель может быть несколько больше, чтобы значения импульса для обоих случаев было примерно одинаковым.

Таким образом, главным критерием выбора параметров искусственного дождя является условие (9). Соотношения (5) и (10) дают некоторую свободу выбора значений для параметров  $I_m$ ,  $d_m$  и  $V_m$ .

### Список использованной литературы

1. Шекихачев, Ю.А. Математическое моделирование эрозионных процессов в горном садоводстве [Текст] / Ю.А. Шекихачев // Тезисы докладов II региональной конференции молодых ученых.- Нальчик: КБНЦ РАН, 2001.- С. 35-37.

2. Шекихачев, Ю.А. Оптимальные параметры дренажных систем для подпочвенного отвода сточных вод [Текст] / Ю.А. Шекихачев, Т.Х. Пазова //

Межвузовский сборник научных трудов «Актуальные проблемы региона».- Нальчик: Насып, 2004.- С. 43-44.

3. Каскулов, М.Х. Водная эрозия почв - основной источник экологических проблем в сельском хозяйстве [Текст] / М.Х. Каскулов, Ю.А. Шекихачев, А.Х. Тенгизов // Тезисы докладов Северо-Кавказской региональной научной конференции «Перспектива-99».- Приэльбрусье, 1999.- С. 242-244.

4. Шекихачев, Ю.А. Исследование влияния агрометеорологических факторов на развитие водной эрозии почв [Текст] / Ю.А. Шекихачев, А.Х. Тенгизов // Тезисы докладов региональной научно-практической конференции Юга России «Производственный потенциал АПК и его использование в условиях рынка».- Владикавказ, 2000.- С. 85-86.

5. Каскулов, М.Х. Математическое моделирование процесса падения дождевой капли и ее воздействия на поверхностный слой почвы [Текст] / М.Х. Каскулов, Ю.А. Шекихачев, В.Х. Мишхожев // Известия Кабардино-Балкарского Научного Центра РАН, №1 (4).- Нальчик: КБНЦ РАН, 2000.- С. 77-80.

6. Каскулов, М.Х. О влиянии ветра на характер движения и размеры дождевых капель [Текст] / М.Х. Каскулов, Ю.А. Шекихачев, Т.Х. Пазова // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Московского государственного агроинженерного университета им. В.П. Горячкина «Развитие села и социальная политика в условиях рыночной экономики».- Москва, 2000.- С. 124-128.

7. Швевс, Г.И. Материалы к изучению эродирующего действия капель воды [Текст] / Г.И. Швевс // Почвоведение.- 1968.- №2.- С.133-140.

8. Сухановский, Ю.П. Обоснование параметров модельных дождей при исследовании эрозионных процессов [Текст] / Ю.П. Сухановский, В.А. Незнанова, А.И. Санжаров // Докл. ВАСХНИЛ.- 1990.- № 8.- С.61-63.

9. Wischmeier, W.H. A rainfall erosion index for a universal soilloss equation [Текст] / W.H. Wischmeier // Soil Science Society of America Proceedings 23.1959. P.246-249.

10. Wischmeier, W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses [Текст] / W.H. Wischmeier // Agricultural handbook № 537. Washington.1978.-65 p.

11. Young, R.A. Prediction of runoff and erosion from natural rainfall using a rainfall simulator [Текст] / R.A Young, R.E. Burwell // Soil Science Soc. America Proceedings.1972.V.36.№ 5.P.827-830.

12. Концепция эффективного использования сельскохозяйственной техники в рыночных условиях [Текст]. – М.: ГОСНИТИ, 1993. – 62 с.

## References

1. Shekihachev, Ju.A. Matematicheskoe modelirovanie jerozionnyh processov v gornom sadovodstve [Tekst] / Ju.A. Shekihachev // Tezisy dokladov II regional'noj konferencii molodyh uchenyh.- Nal'chik: KBNC RAN, 2001.- S. 35-37.

2. Shekihachev, Ju.A. Optimal'nye parametry drenaznyh sistem dlja podpochvennogo otvoda stochnyh vod [Tekst] / Ju.A. Shekihachev, T.H. Pazova // Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov «Aktual'nye problemy regiona».- Nal'chik: Nasy, 2004.- S. 43-44.

3. Kaskulov, M.H. Vodnaja jerozija pochv - osnovnoj istochnik jekologicheskikh problem v sel'skom hozjajstve [Tekst] / M.H. Kaskulov, Ju.A. Shekihachev, A.H. Tengizov //

Tezisy dokladov Severo-Kavkazskoj regional'noj nauchnoj konferencii «Perspektiva-99».- Prijel'brus'e, 1999.- S. 242-244.

4. Shekihachev, Ju.A. Issledovanie vlijanija agrometeorologicheskikh faktorov na razvitie vodnoj jerozii pochv [Tekst] / Ju.A. Shekihachev, A.H. Tengizov // Tezisy dokladov regional'noj nauchno-prakticheskoi konferencii Juga Rossii «Proizvodstvennyj potencial APK i ego ispol'zovanie v uslovijah rynka».- Vladikavkaz, 2000.- S. 85-86.

5. Kaskulov, M.H. Matematicheskoe modelirovanie processa padenija dozhdevoj kapli i ee vozdeystvija na poverhnostnyj sloj pochvy [Tekst] / M.H. Kaskulov, Ju.A. Shekihachev, V.H. Mishhozhev // Izvestija Kabardino-Balkarskogo Nauchnogo Centra RAN, №1 (4).- Nal'chik: KBNC RAN, 2000.- S. 77-80.

6. Kaskulov, M.H. O vlijanii vetra na harakter dvizhenija i razmery dozhdevykh kapel' [Tekst] / M.H. Kaskulov, Ju.A. Shekihachev, T.H. Pazova // Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii, posvjashhennoj 70-letiju Moskovskogo gosudarstvennogo agroinzhenernogo universiteta im. V.P. Gorjachkina «Razvitie sela i social'naja politika v uslovijah rynochnoj jekonomiki».- Moskva, 2000.- S. 124-128.

7. Shvebs, G.I. Materialy k izucheniju jerodirujushhego deystvija kapel' vody [Tekst] / G.I. Shvebs // Pochvovedenie.- 1968.- №2.- S.133-140.

8. Suhanovskij, Ju.P. Obosnovanie parametrov model'nykh dozhdej pri issledovanii jerozionnykh processov [Tekst] / Ju.P. Suhanovskij, V.A. Neznanova, A.I. Sanzharov // Dokl. VASHNIL.- 1990.- № 8.- S.61-63.

9. Wishmeier, W.H. A rainfall erosion index for a universal soilloss equation [Tekst] / W.H. Wishmeier // Soil Science Society of America Proceedings 23.1959. P.246-249.

10. Wischmeier, W.H., Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses [Tekst] / W.H. Wishmeier // Agricultural handbook № 537. Washington.1978.-65 r.

11. Young, R.A. Prediction of runoff and erosion from natural rainfall using a rainfall simulator [Tekst] / R.A. Young, R.E. Burwell // Soil Science Soc. America Proceedings.1972.V.36.№ 5.P.827-830.

12. Koncepcija jeffektivnogo ispol'zovanija sel'skohozjajstvennoj tehniky v rynochnykh uslovijah [Tekst]. – M.: GOSNITI, 1993. – 62 s.