

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

=====
УДК 631.434.52

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет

Аннотация

В статье проанализированы причины возникновения эрозионных процессов под действием атмосферных осадков. Приведены результаты теоретического исследования процесса падения дождевой капли. Полученные теоретические зависимости позволяют оценить риск возникновения водной эрозии, наметить мероприятия по снижению эрозионных процессов.

Ключевые слова: ОСАДКИ, ПОЧВА, ЭРОЗИЯ, УСТОЙЧИВОСТЬ, РАСТИТЕЛЬНОСТЬ, ДОЖДЕВАЯ КАПЛЯ, ВЕТЕР

Повсеместное развитие при возделывании сельхозкультур на склоновых землях эрозионных процессов обусловлено особым сочетанием здесь природных условий, определяющих возможность их проявления. Одинаково определяющими здесь являются климатические условия, рельеф, геологическое строение, особенности почвенного и растительного покрова [1, 2]. Влияние климатических условий на проявление эрозионных процессов многообразно, но решающее значение имеют общее количество выпадающих осадков и характер распределения их в течение года. Годовое количество осадков в пределах горной территории колеблется в пределах 600...1200 мм и значительно превышает эти показатели для равнины. Основная масса осадков выпадает в весенне-летний период (май-июнь-июль) в виде ливней разной интенсивности, нередко очень сильные (более 2 мм/мин). Ливневые осадки не успевают впитаться в почву, и большая их часть стекает по склонам, вызывая интенсивный смыв там, где почвы обладают слабой

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

.....
Электронный научно-производственный журнал

«АгроЭкоИнфо»
=====

эрозионной устойчивостью и плохо защищены растительным покровом. Сравнительно малое количество осадков, выпадающих в зимний период, и частые оттепели обуславливают незначительную высоту снежного покрова (до 15 см) на большей части горной территории, относительно малую интенсивность развития эрозии, вызываемой стоком талых вод. Таким образом, исследование процессов возникновения эрозионных процессов с целью разработки мероприятий для их снижения является актуальной задачей.

Наиболее слабой противозэрозионной устойчивостью обладают почвы легкосуглинистого, супесчаного механического состава, сформированные, в основном, на продуктах выветривания массивно-кристаллических горных пород.

Несколько лучшей противозэрозионной устойчивостью при прочих равных условиях характеризуются почвы более тяжелого механического состава, развивающиеся на продуктах выветривания плотных осадочных пород и на рыхлых отложениях. Отрицательно влияет на противозэрозионную устойчивость почв их значительная окарбоначенность, наследованная от сильнокарбонатных пород – известняков, песчаников и др.) [3-5].

Большая роль в защите почв от эрозии принадлежит растительности. Ее роль трудно переоценить. Растительность предохраняет почву от прямого воздействия дождевых капель, разрушающих структурные агрегаты, задерживает на листьях, стеблях часть выпадающих осадков, замедляет склоновый сток, способствует равномерному распределению его по поверхности почвы, скрепляет своими корнями почвенные частицы, обогащает почву органическим веществом и т.д. Вместе с тем не всякая растительность одинаково защищает почвы от эрозии – важны здесь биологические особенности растений, их типовая принадлежность, состояние растительного покрова в целом (проективное покрытие, густота, высота и др.).

Таким образом, система агротехнических мероприятий по освоению склонов под садоводство должна обеспечивать высокую продуктивность плодовых насаждений, комплексную механизацию технологических процессов и, что самое главное, предотвращение водной эрозии почв, возникающей под действием выпадающих осадков [6, 7]. С учетом этого, основные вопросы, которые следует рассмотреть при

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

прогнозировании эрозионных процессов, следующие: конечная скорость дождевой капли, ее предельные размеры, траектория и угол падения.

Теоретические исследования нами проводились при следующих допущениях: физико-механические свойства почвы одинаковы на исследуемом участке; состояние почвенного покрова одинаковое; климатические условия постоянные во времени и в пространстве; выпадение осадков на исследуемом участке равномерное.

Определяющей характеристикой осадков следует считать конечную скорость дождевой капли. При определении конечной скорости дождевой капли необходимо учитывать, что закон падения тел, полученный Галилеем, верен лишь для падения тел в пустоте. В данном случае дождевая капля падает в воздухе, поэтому наблюдаются некоторые отступления от этого закона, вызванные наличием сопротивления среды ее падению. При этом живая сила падающей дождевой капли тратится на образование вихревых движений воздуха и преодоление молекулярных сил прилипания воздуха к падающей дождевой капле.

Также необходимо учесть и влияние ветра на траекторию движения дождевой капли, т.к. дожди зачастую сопровождаются ветрами довольно большой скорости.

Для исследования траектории движения дождевой капли воспользуемся рис. 1.

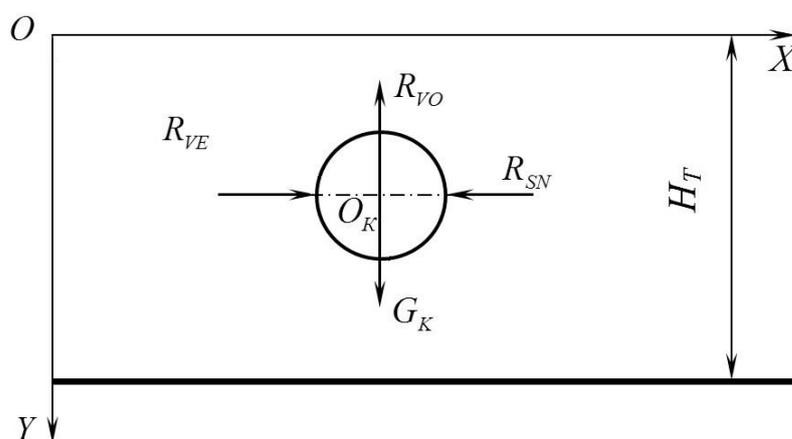


Рис. 1 – Схема к исследованию траектории движения дождевой капли.

Ось X располагаем на уровне нижней границы облака, из которого выпадает рассматриваемая дождевая капля. Ось Y направляем вертикально вниз. При падении

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

=====

дождевая капля будет совершать криволинейное движение под действием движущих сил (силы давления ветра и собственного веса) и сил сопротивления (силы сопротивления воздуха при падении под действием собственного веса дождевой капли и силы сопротивления воздуха при горизонтальном сносе под давлением ветра).

Дифференциальные уравнения движения дождевой капли в проекциях на инерциальные оси координат запишутся в виде:

$$m_K \frac{dV_{KX}}{dt} = R_{VE} - R_{SN}, \quad (1)$$

$$m_K \frac{dV_{KY}}{dt} = G_K - R_{VO}, \quad (2)$$

где V_{KX} и V_{KY} – проекции скорости дождевой капли на инерциальные оси координат, м/с; R_{VE} – сила давления ветра, Н; R_{SN} – сила сопротивления воздуха при горизонтальном сносе дождевой капли под давлением ветра, Н; G_K – вес дождевой капли, Н; R_{VO} – сила сопротивления воздуха при вертикальном падении дождевой капли под действием собственного веса, Н.

Силы R_{VE} , R_{SN} и R_{VO} определяются из выражений:

$$R_{VE} = C_X \gamma_{VO} S_K V_{VE}^2 / g, \quad (3)$$

$$R_{SN} = C_X \gamma_{VO} S_K V_{KX}^2 / g, \quad (4)$$

$$R_{VO} = C_X \gamma_{VO} S_K V_{KY}^2 / g, \quad (5)$$

где C_X – аэродинамический коэффициент; γ_{VO} – удельный вес воздуха, Н/м³; S_K – площадь поперечного сечения дождевой капли, м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; V_{VE} – скорость ветра, м/с.

Обозначив

$$a = C_X \gamma_{VO} S_K / g \quad (6)$$

уравнение (1) перепишем в виде:

$$m_K \frac{dV_{KX}}{dt} = a V_{VE}^2 \left(1 - \frac{V_{KX}^2}{V_{VE}^2} \right). \quad (7)$$

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Разделив обе части выражения (7) на получим:

$$\frac{dV_{KX}}{dt} = \frac{a}{m_K} V_{VE}^2 \left(1 - \frac{V_{KX}^2}{V_{VE}^2} \right). \quad (8)$$

Обозначив в выражении (8)

$$b = aV_{VE}^2 / m_K \quad (9)$$

$$c = 1/V_{VE} \quad (10)$$

и произведя некоторые математические преобразования выражение (8) перепишем в виде:

$$\frac{dV_{KX}}{1 - c^2 V_{KX}^2} = b dt. \quad (11)$$

Интегрируя выражение (11) получим:

$$\ln \frac{1 + cV_{KX}}{1 - cV_{KX}} = 2cbt + C_1. \quad (12)$$

Постоянную интегрирования C_1 найдем с учетом начальных условий:

$$t = 0, V_{KX} = V_{VE(T)}:$$

$$C_1 = \ln \frac{1 + cV_{VE(T)}}{1 - cV_{VE(T)}}, \quad (13)$$

где $V_{VE(T)}$ – скорость ветра на высоте нижней границы тучи, м/с, которая рассчитывается по формуле:

$$V_{VE(T)} = V_{VE(I)} \frac{\ln \left(\frac{H_T + z_0}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{z_I + z_0}{z_0} \right)}, \quad (14)$$

где $V_{VE(I)}$ – измеренная скорость на выбранной высоте, м/с; H_T – высота нижней границы тучи, м (зимой – 800 м, весной – 1200 м, летом – 1300 м и осенью – 900 м); z_0 – высота неровностей поверхности почвы, м; z_I – высота измерения скорости $V_{VE(I)}$, м.

В общем виде высота нижней границы тучи рассчитывается по формуле:

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

$$H_T = 3780(2 - \lg f_0), \quad (15)$$

где f_0 – относительная влажность воздуха на уровне поверхности почвы.

С учетом выражения (13) зависимость (12) примет вид:

$$\ln \frac{1 + cV_{KX}}{1 - cV_{KX}} = 2cbt + \ln \frac{1 + cV_{VE(T)}}{1 - cV_{VE(T)}}. \quad (16)$$

Решение выражения (16) дает возможность получить формулу для расчета горизонтальной составляющей абсолютной скорости движения дождевой капли с учетом влияния ветра:

$$V_{KX} = \frac{(1 + cV_{VE(T)}) - (1 - cV_{VE(T)})e^{-2cbt}}{(c + c^2V_{VE(T)}) + (c - c^2V_{VE(T)})e^{-2cbt}}. \quad (17)$$

Далее определим вертикальную составляющую абсолютной скорости дождевой капли, для чего с учетом выражения (5) перепишем уравнение (2) в виде:

$$m_K \frac{dV_{KY}}{dt} = G_K - aV_{KY}^2 = m_K g - aV_{KY}^2. \quad (18)$$

Разделив обе части уравнения (18) на m_K , обозначив

$$n = \sqrt{\frac{a}{m_K g}},$$

и произведя некоторые преобразования, получим:

$$\frac{dV_{KY}}{1 - n^2 V_{KY}^2} = g dt. \quad (19)$$

Интегрируя выражение (19), получим:

$$\frac{1 + nV_{KY}}{1 - nV_{KY}} = 2ngt + C_2. \quad (20)$$

Постоянную интегрирования C_2 определим при начальных условиях: $t = 0$,

$V_{KY} = 0 : C_2 = 0$. Тогда выражение (20) примет вид:

$$\frac{1 + nV_{KY}}{1 - nV_{KY}} = 2ngt. \quad (21)$$

Решение выражения (21) дает возможность получить формулу для расчета вертикальной составляющей абсолютной скорости дождевой капли:

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

$$V_{KY} = \frac{1 - e^{-2ngt}}{n(1 + e^{-2ngt})}. \quad (22)$$

Таким образом, абсолютная скорость дождевой капли с учетом влияния ветра определится с использованием выражений (17) и (22) по формуле:

$$V_K = \sqrt{V_{KX}^2 + V_{KY}^2}. \quad (23)$$

Угол наклона касательной к траектории движения дождевой капли относительно поверхности почвы определится по выражению:

$$\alpha = \arctg(V_{KY}/V_{KX}). \quad (24)$$

С использованием выражения (24) построена зависимость угла падения дождевой капли от скорости ветра (рис. 2). Из рисунка 2 видно, что, например, при скорости ветра 5 м/с на высоте 2 м (при падении капли с высоты 1200 м) дождевая капля диаметром 1 мм падает под углом 25° к горизонту, а диаметром 5 мм – уже 44°.

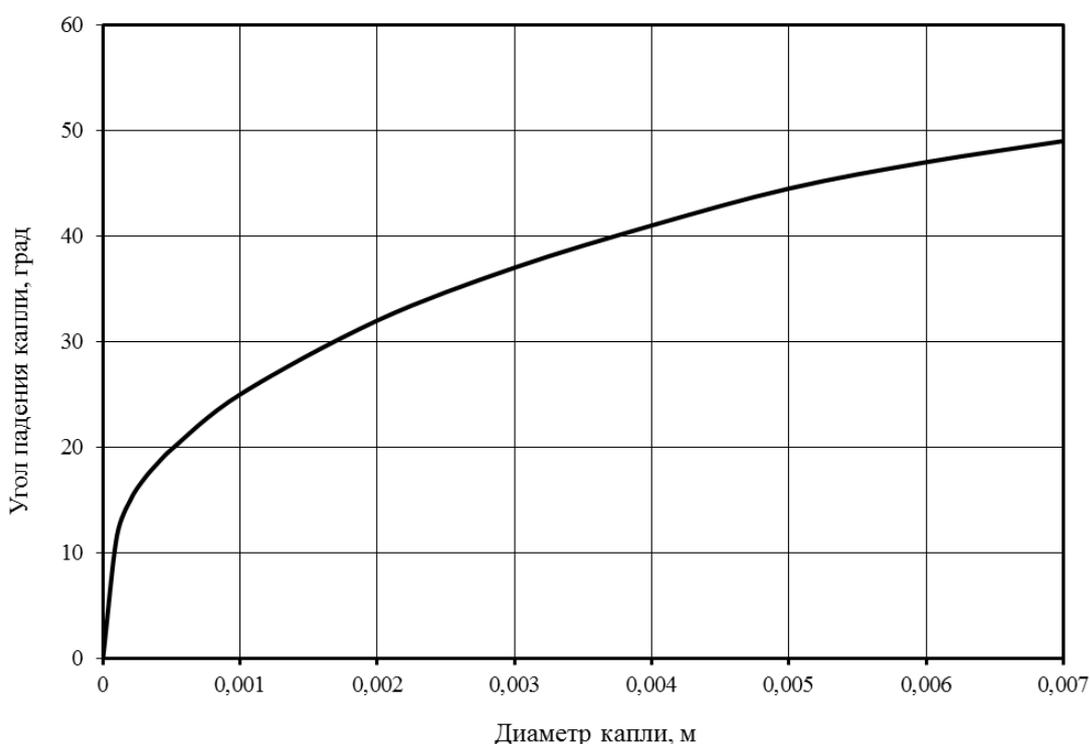


Рис. 2 – Зависимость угла падения дождевой капли от ее диаметра (при скорости ветра 5 м/с).

Для определения времени падения дождевой капли выражение (17) перепишем в виде:

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
 =====

$$\frac{dY_K}{dt} = \frac{1 - e^{-2ngt}}{n(1 + e^{-2ngt})}. \quad (25)$$

Разделив переменные и проинтегрировав выражение (25) (приняв, что высота падения $Y_K = H_T$), получим:

$$t_K = \frac{1}{g} H_T \sqrt{\frac{C_X \gamma_{VO} S_K}{m_K}}. \quad (26)$$

Таким образом, получено выражение (26), позволяющее рассчитать время падения дождевой капли. С помощью этого выражения установлено, например, что при скорости ветра 5 м/с на высоте 2 м дождевая капля диаметром 1 мм с высоты 1000 м падает 460 с, а диаметром 5 мм – 206 с.

Траектория движения дождевой капли с учетом влияния ветра будет описываться уравнениями, полученными при интегрировании выражений (17) и (22). Для этого выражение (17) после некоторых преобразований перепишем в виде:

$$cdX_K = \frac{i - je^{-2cbt}}{i + je^{-2cbt}} dt, \quad (27)$$

где $i = 1 + cV_{VE(T)}$, $j = 1 - cV_{VE(T)}$.

После некоторых математических преобразований выражение (27) представим в виде:

$$cdX_K = \frac{1 - qe^{-2cbt}}{1 + qe^{-2cbt}} dt, \quad (28)$$

где $q = j/i$.

Обозначив

$$s = -2cb \quad (29)$$

получим после интегрирования выражения (28) и некоторых математических преобразований:

$$X_K = V_{VE(I)} \frac{\ln\left(\frac{H_T + z_0}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_I + z_0}{z_0}\right)} t, \quad (30)$$

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

Полученное выражение (30) позволяет определить величину горизонтального сноса дождевой капли.

Из выражения (26) получим:

$$Y_K = \frac{gt}{\sqrt{\frac{C_X \gamma_{VO} S_K}{m_K}}} \quad (31)$$

Таким образом, получены выражения (30) и (31), описывающие траекторию движения дождевой капли с учетом влияния ветра. Их реализация позволила получить искомые траектории (рис. 3). Из рисунка 3 видно, что, например, дождевая капля диаметром 5 мм при скорости ветра на высоте 2 м, равном 5 м/с, при падении с высоты 1200 м сносится на 455 м, а при скорости 15 м/с – уже на 1365 м.

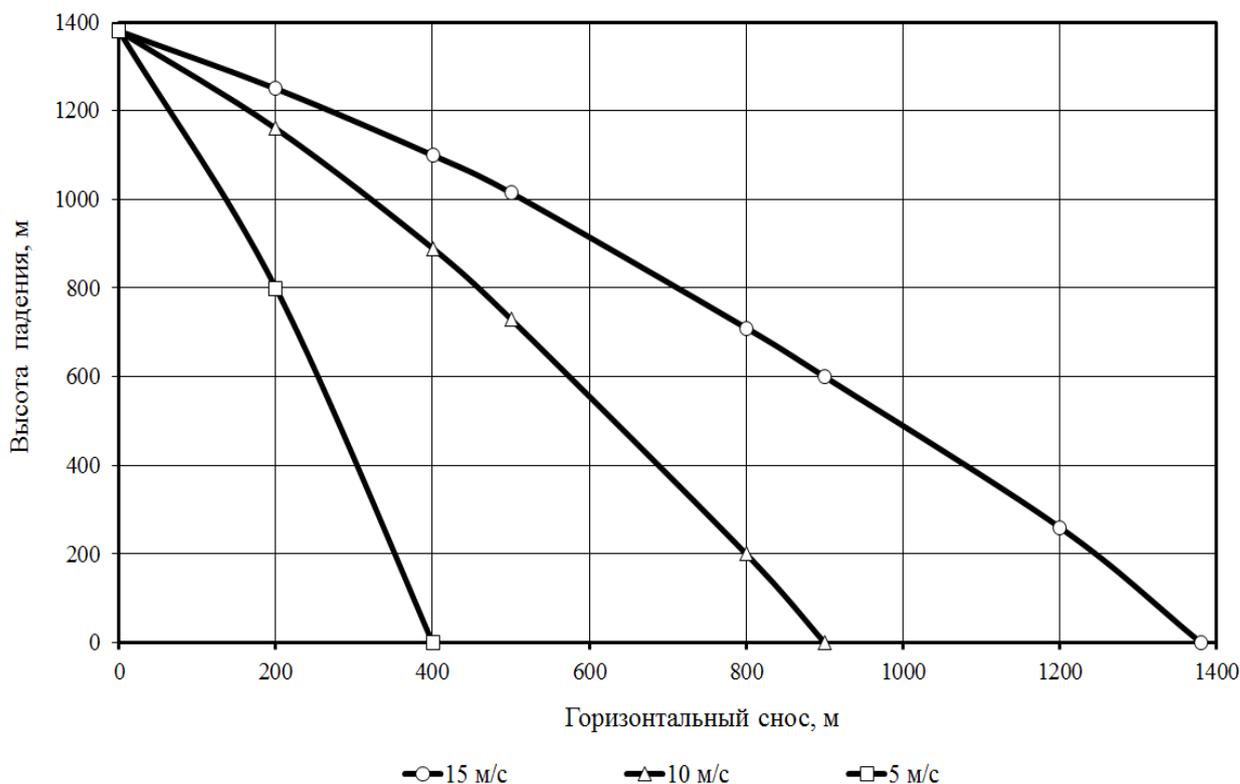


Рис. 3 – Траектории движения дождевой капли диаметром 5 мм при различных скоростях ветра

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К.

Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

=====

Список использованных источников

1. Kyul E.V., Apazhev A.K., Kudzaev A.B., Borisova N.A. Influence of anthropogenic activity on transformation of landscapes by natural hazards / Indian Journal of Ecology. 2017. Т. 44. № 2. С. 239-243.– URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57195587959>.
2. Апажев А.К. Устойчивость развития регионов в условиях пространственно-экономических трансформаций / В сборнике: Устойчивость развития территориальных экономических систем: глобальные тенденции и концепции модернизации. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции памяти профессора Б.Х. Жерукова. 2016. С. 10-13.
3. Бжеумыхов В.С., Шекихачев Ю.А., Бжеумыхова З.В. Оптимизация агротехнологии выращивания сельскохозяйственных культур в Кабардино-Балкарской республике / АгроЭкоИнфо. 2017. № 4 (30). С. 1. – URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_408.doc.
4. Бжеумыхов В.С., Шекихачев Ю.А. Основные направления рационального использования, охраны и улучшения почвенных ресурсов в Кабардино-Балкарской республике / АгроЭкоИнфо. 2017. № 4 (30). С. 2. – URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_412.doc.
5. Бжеумыхов В.С., Шекихачев Ю.А., Хажметов Л.М. Исследование устойчивости склоновых агроландшафтов / АгроЭкоИнфо. 2017. № 4 (30). С. 29. – URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2017/4/st_407.doc.
6. Apazhev A., Shekikhachev Y., Hazhmetov L., Smelik V. Combined unit for preparation of soil for sowing grain crops / В сборнике: Engineering for Rural Development 2019. С. 192-198. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N235.pdf>
7. Apazhev A.K., Fiaphev A.G., Shekikhachev Y.A., Hazhmetov L.M., Shekikhacheva L.Z. Modeling the operation process of the unit for processing row-spacings of fruit plantings / В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. С. 52023. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/315/5/052023/>

=====

Цитирование:

Апажев А.К., Шекихачев Ю.А., Пазова Т.Х., Шекихачева Л.З., Курманова М.К. Математическое моделирование процесса возникновения водной эрозии/ АгроЭкоИнфо. – 2020, №2. – http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2020/2/st_222.pdf.