

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОДНОГО ПОТОКА НА АГРОЛАНДШАФТЕ СКЛОНОВЫХ ЗЕМЕЛЬ

Васильев С.А., Максимов И.И., Михайлов А.Н., Алексеев Е.П.

Реферат. В работе предложен метод определения направления движения водного потока на агроландшафте склоновых земель. Установлены принципиальные особенности гидравлики склонового стока. Гидравлические потери водотока на преодоление сопротивлений подстилающей поверхности, эрозионные процессы и транспортирование частиц составляющих наносы представлены в виде гидродинамической характеристики водного потока. Получены зависимости для определения скорости изменения коэффициента гидравлической шероховатости для любой стокоформирующей поверхности. Разработано устройство для изучения процесса формирования микрорусла на подстилающей поверхности, позволяющее изучить процесс формирования микрорусла и точно измерять глубину и ширину потока микрорусла. По результатам полевых исследований установлено, что максимальная ширина микрорусла достигла 8,1 см, а глубина – 3,4 см, а в процессе взаимодействия водного потока и почвы с заданными характеристиками менялось положение нижней точки микрорусла, вследствие возникновения колебаний водотока и его меандрирования, амплитуда колебаний менялась в пределах от 1,86 см до 2,12 см, и составила максимум 2,6 см. Таким образом, полученные параметры позволяют прогнозировать склоновую эрозию и разрабатывать эффективные мероприятия по сокращению склонового стока атмосферных осадков.

Ключевые слова: гидродинамическая характеристика, водный поток, склоновые агроландшафты, уклоны гидравлических потерь, микрорусло, склоновая эрозия.

Введение. При решении фундаментальных и прикладных гидрологических проблем управления водным потоком на склоновых землях особенно острым является вопрос о проектировании и оценке эффективности противозонозных технологий [4,8]. Сложную научную задачу представляет собой определение направления движения водного потока на агроландшафте склоновых земель от параметров водного потока.

Используемые в настоящее время подходы для определения направления движения для склонового водотока не в полной мере удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к процессам взаимодействия потока воды с подстилающей поверхностью [5]. Основные причины заключаются в использовании эмпирических и полумпирических формул, применение которых ограничено пределами тех опытов, на которых они основаны [1,6]; определении переноса частиц на основании описательных (а не количественных) характеристик водотока и микрорусла; непрерывном изменении различных параметров потока и русла [10].

Условия, материалы и методы исследований. Воздействие внешних и внутренних сил сопротивлений на движущую среду, которые обеспечивают ускорение или торможение водного потока, можно представить в виде уравнения баланса действительного уклона и суммы уклонов гидравлических потерь при движении водного потока по стокоформирующей поверхности. С некоторым приближением без учета инфильтрации влаги в почву,

вследствие продолжительности процесса, запишем уравнение в упрощенной безразмерной форме [2]:

$$i = \sum i_{\lambda} = i_{\varphi} + i_{\psi} + i_{\delta} + i_{\gamma} + i_{j} + i_{s} = i_c + i_{\psi} + i_j + i_s, \quad (1)$$

где i – уклон подстилающей поверхности склона; $\sum i_{\lambda}$ – сумма уклонов гидравлических потерь при движении водного потока по стокоформирующей поверхности; i_{φ} – уклон гидравлических потерь на трение; i_{ψ} – уклон гидравлических потерь на размыв подстилающей поверхности склона; i_{δ} – уклон гидравлических потерь на преодоление растительных элементов; i_{γ} – уклон гидравлических потерь на преодоление волнистости поверхности; i_j – уклон гидравлических потерь на преодоление инерции потока; i_s – уклон гидравлических потерь на взвешивание твердых частиц; i_c – уклон гидравлических потерь на преодоление стокоформирующей поверхности.

Для анализа параметров водотоков можно, опираясь на уравнение (1), использовать графическое изображение зависимости изменения уклонов гидравлических потерь водного потока от скорости его движения, которое называют гидродинамической характеристикой стокоформирующей поверхности.

В тоже время, любая подстилающая поверхность, имеющая шероховатость, может быть описана коэффициентом гидравлической шероховатости φ , а ее изменение в пространстве можно представить в картах с изолиниями. По сути, представление коэффициента гидравлической шероховатости φ в виде карт с

изолиниями является эквипотенциальной поверхностью [9].

Опишем функцию вида $\varphi = \varphi(x, y, z)$, представляющую собой непрерывную и однозначную в зависимости от координат x, y, z и при решении имеет непрерывные частные производные. В этом случае имеем представление функции в виде скалярного поля. В скалярном поле можно выделить определенные точки, в которых процесс протекает одинаково, т.е. коэффициент гидравлической шероховатости имеет одинаковые значения, это можно представить в виде:

$$\varphi = \varphi(x, y, z) = p, \quad (p = const), \quad (2)$$

где φ – коэффициент гидравлической шероховатости, представляющий собой отношение изменения удельной энергии потока жидкости при взаимодействии с шероховатой поверхностью к удельной энергии потока при взаимодействии с гладкой поверхностью; пространственная изменчивость φ на подстилающей поверхности склоновых агроландшафтов представляется изолиниями на картах и при приближении описана функцией выравнивания.

Выражение (2) представим в виде уравнения определенной поверхности в пространстве. Устанавливая в выражении (2) для величины p заданные значения $p_1, p_2, p_3 \dots p_n$, имеем целый ряд поверхностей, где коэффициент гидравлической шероховатости для каждой постоянен, т.е. $\varphi = const$. В итоге получены эквипотенциальные поверхности – поверхности с постоянным значением коэффициента гидравлической шероховатости, применяемые в теории поля.

Скорость изменения функции $\varphi(x, y, z)$ на отрезке CO (рисунок 1) определяется отношением $D\varphi/CO$ и имеет максимальные значения в точках, где расстояния между изолиниями минимальны.

Рассмотрев вместо прямолинейного отрезка PO произвольную кривую PA или дугу PB , определим производную функции коэффициента гидравлической шероховатости φ по длине l дуги AP , отсчитываемой с точки C по выражению:

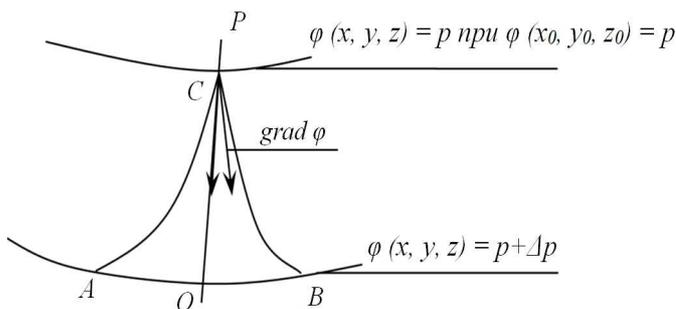


Рисунок 1 – Схемы к определению $grad \varphi$ и расположения векторных φ_{grad} -линий

$$\frac{d\varphi}{dl} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{dx}{dl} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{dy}{dl} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \frac{dz}{dl} \quad (3)$$

Рассмотрим единичный вектор, направление которого совпадает с движением водотока на склоне

$$\tau = \frac{dx}{dl} i + \frac{dy}{dl} j + \frac{dz}{dl} k \quad (4)$$

Градиент скалярного поля φ представляет собой вектор, в численном выражении приравненный к максимальной скорости изменения коэффициента гидравлической шероховатости φ по заданному направлению:

$$grad \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} i + \frac{\partial \varphi}{\partial y} j + \frac{\partial \varphi}{\partial z} k \quad (5)$$

Скалярное произведение на $grad \varphi$ позволяет определить правую часть уравнения (3), то есть

$$\frac{d\varphi}{dl} = (\pm grad \varphi) \tau \quad (6)$$

Кроме того, возможен случай, когда множители в правой части (6) перпендикулярны (при склоновом стоке вдоль изолиний φ , при этом $grad \varphi \neq 0$) или один из них равен нулю (при прохождении склонового потока по линии $\varphi = const$, т.е. $grad \varphi = 0$)

$$\frac{d\varphi}{dl} = 0 \quad (7)$$

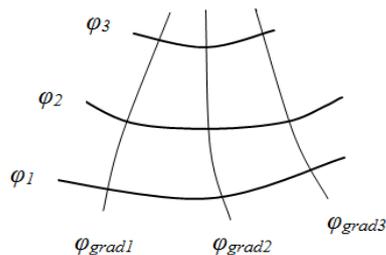
Если направление $grad \varphi$ совпадает с направлением стока τ , то:

$$\frac{d\varphi}{dl} = \frac{d\varphi}{dn} = |grad \varphi| \rightarrow \max, \quad (8)$$

где dn – дифференциал нормали (рисунок 1).

Таким образом, по зависимостям (6), (7) и (8) может быть определена скорость изменения коэффициента гидравлической шероховатости для любой стокоформирующей поверхности.

При изучении ряда физических процессов и явлений применяется метод источников [7]. Сущность метода сводится к следующему: на изучаемый объект воздействуют каким-либо источником, находящимся в определенных



точке (точечный источник), линии (линейный источник), плоскости (плоский источник) с заданными параметрами; затем исследуется влияние этих параметров на изучаемый объект. Нами в качестве точечного источника рассматривается струя жидкости с заданным расходом и скоростью истечения, воздействующая на деформируемую поверхность с известными характеристиками.

На рисунке 2 приведена принципиальная схема установки для измерения размыва подстилающей поверхности, на рисунке 3 – общий вид установки, разработанная с учетом особенностей конструкции профилографа, основанного в работе [3].

Устройство состоит из рамы 1, съемного наклонного лотка 2 с перфорированным дном и шероховатой поверхностью для отделения воды 3 (наклонный лоток с перфорированным дном и шероховатой поверхностью приведен на рисунке 2), просочившейся через образец почвогрунта. Подача воды в лоток 2 осуществляется из сосуда Мариотта 4 постоянного напора посредством трубопровода 5 с зажимом Гофмана 6 и насадка 7. Сосуд 4 снабжен подвижной Мариоттовой трубкой для поддержания постоянного напора, трубкой для заполнения сосуда водой, а также шкалой расхода воды (условно не показаны). На выходной части лотка 2 установлены лоточек 8 и сосуд 9 для сбора воды и смывтой почвы. Для сбора информации о развитии микрорусла в почве

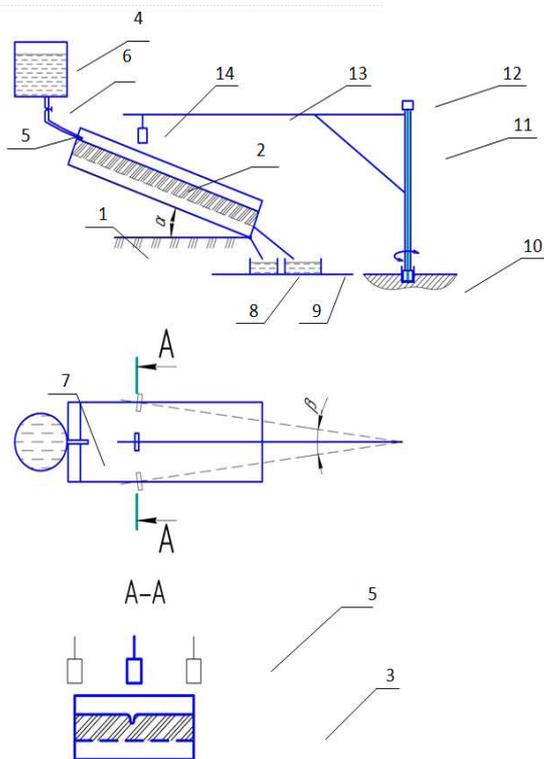


Рисунок 2 – Принципиальная схема установки для измерения глубины и ширины потока микрорусла

устройство дополнительно имеет конструкцию, состоящую из массивного основания 10, на которое устанавливается ось 11, в которой крепится энкодер - угловой датчик 12, а в верхней части с помощью подшипника перпендикулярно закреплено подвижное плечо 13 с лазерным датчиком 14, установленного с помощью стержня, что позволяет изменять начальное положение лазерного датчика 14.

Триангуляционный лазерный датчик предназначен для бесконтактного измерения и контроля положения, перемещения, размеров, профиля поверхности, деформаций, вибраций, сортировки, распознавания технологических объектов, измерения уровня жидкостей и сыпучих материалов. В основу работы датчика положен принцип оптической триангуляции. Датчик устанавливается таким образом, чтобы контролируемый объект располагался в зоне рабочего диапазона датчика. Кроме того, в области прохождения падающего на объект и отраженного от него излучения не должно находиться посторонних предметов. При контроле объектов сложной формы и текстуры необходимо минимизировать попадание зеркальной составляющей отраженного излучения во входное окно датчика.

Анализ и обсуждение результатов. Для проведения экспериментальных исследований на склоновых землях разработана методика определения размыва подстилающей поверхности в полевых условиях и устройство для его осуществления с учетом работ [3].

На рисунке 4 приведена принципиальная схема расположения устройства на склоне, на рисунке 5 представлен общий вид устройства на склоне.

Устройство в полевых условиях функционирует следующим образом. С помощью системы постоянного напора устанавливается заданный расход воды Q_v , скорость истечения u_v . Предварительно конструкция для сбора информации о развитии микрорусла в почве устанавливается строго вертикально по уров-

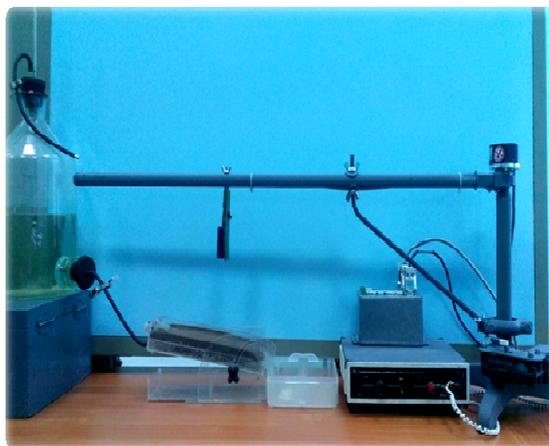


Рисунок 3 – Общий вид установки

нию во всех направлениях. Электрическое питание для датчиков угла и положения подается от ноутбука. Запускается компьютерная программа «РФ 605+энкодер» на ноутбуке.

Далее с помощью приводного механизма выполняются медленные возвратно-поступательные колебания плеча (колебательный процесс осуществляется с помощью электроредуктора, в качестве источника питания является АКБ на 12 В) с датчиком вокруг оси относительно некоторого центра совмещенного с продольной осью микрорусла. Выполняя возвратно-поступательные колебания, лазерный датчик положения сканирует поверхность почвы и передает информацию в электронный блок обработки сигналов. В тоже время энкодер замеряет положение оси относительно основания и также пересылает мгновенные значения угла поворота в электронный блок обработки сигналов.

Таким образом, в процессе опыта определяются расход воды Q_0 , продолжительность

опыта, фотографии в плане, а с помощью лазерного датчика определяется величина размыва подстилающей поверхности.

Полевые исследования, используя устройство для определения размыва подстилающей поверхности, были проведены на разных агрофонах (пашня, пашня с боронованием, мульчирование, посевы озимых, стерня зерновых и др.).

В качестве примера на рисунке 6 представлены результаты динамики формирования микрорусла после основной обработки почвы.

По данным представленным на рисунке видно, что максимальная ширина микрорусла достигла 8,1 см, а глубина – 3,4 см. В процессе взаимодействия водного потока и почвы менялось положение нижней точки микрорусла, вследствие возникновения колебаний водотока и его меандрирования, амплитуда колебаний менялась в пределах от 1,86 см до 2,12 см, и составила максимум 2,6 см.

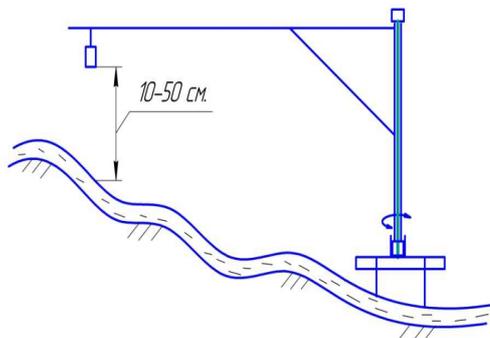


Рисунок 4 – Принципиальная схема расположения устройства на склоне



Рисунок 5 – Общий вид изготовленного бесконтактного устройства на склоне

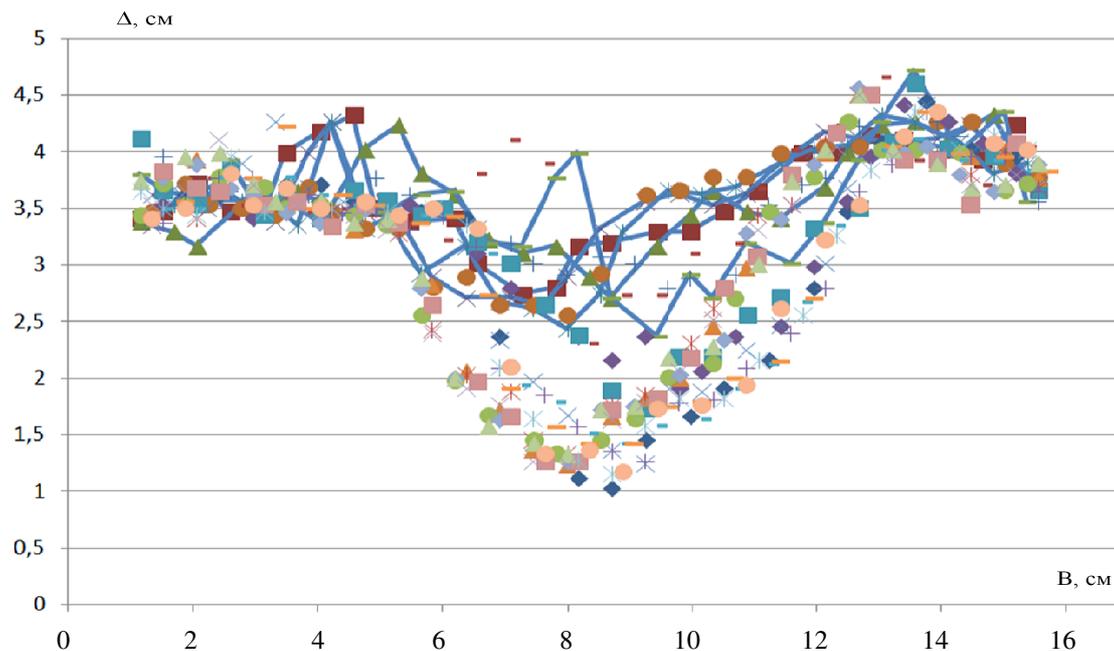


Рисунок 6 – Результаты полевых исследований полученные с помощью разработанного устройства

Выводы. Гидравлические потери на преодоление сопротивлений подстилающей поверхности, эрозионные процессы и транспортирование частиц составляющих наносы водотоком представлены в виде математической модели. Опираясь на это уравнение, можно провести анализ параметров водотоков, используя графическое изображение зависимости изменения уклонов гидравлических потерь водного потока от скорости его движения в виде гидродинамической характеристикой стокоформирующей поверхности.

Любая подстилающая поверхность, имеющая шероховатость, может быть описана коэффициентом гидравлической шероховатости φ , а ее изменение в пространстве можно представить в картах с изолиниями в виде карт с изолиниями, т.е. эквипотенциальной поверхности. По полученным зависимостям может быть определена скорость изменения коэффициента гидравлической шероховатости для любой стокоформирующей поверхности.

Разработанное устройство для изучения процесса формирования микрорусла на под-

стилающей поверхности позволяет изучить процесс формирования микрорусла и точно измерять глубину и ширину потока микрорусла, следовательно, прогнозировать склоновую эрозию и разрабатывать эффективные мероприятия по сокращению склонового стока атмосферных осадков.

По результатам полевых исследований видно, что максимальная ширина микрорусла достигала 8,1 см, а глубина – 3,4 см. В процессе взаимодействия водного потока и почвы с заданными характеристиками менялось положение нижней точки микрорусла, вследствие возникновения колебаний водотока и его мандрирования, амплитуда колебаний менялась в пределах от 1,86 см до 2,12 см, и составила максимум 2,6 см.

Таким образом, полученные критерии, их величина и изменения в динамике процесса позволяют прогнозировать склоновую эрозию и разрабатывать эффективные мероприятия по сокращению склонового стока атмосферных осадков.

Литература

1. Барышников, Н.Б. Формулы и методы для расчета расходов донных наносов / Н.Б. Барышников, Ю.А. Демидова, А.О. Пагин, А.Б. Соколов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 11. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГМУ, 2009. – С. 16-23. – Режим доступа: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/11-2.pdf.
2. Васильев, С.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах [Электронный ресурс] / С.А. Васильев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 4(20). – С. 79–93. – Режим доступа: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec358-field6.pdf.
3. Васильев, С.А. Результаты экспериментальных исследований гидрофизических и эрозионных свойств почв на территории СХПК «Труд» Батыревского района Чувашской Республики / С.А. Васильев, И.И. Максимов, Е.П. Алексеев [и др.] // Вестник Чувашского государственного педагогического университета имени И.Я. Яковлева. – 2013. – Вып. 4(80), Ч.2. – С. 39 – 45.
4. Ларионов, Г.А. Влияние наносов на эродирующую способность мелководных потоков / Н.Г. Добровольская, З.П. Кирухина, Л.Ф. Литвин // Эрозия почв и русловые процессы. – 2003. – Вып. 14. – С. 34-45. – Режим доступа: <http://makkaveev-lab.narod.ru/SEFP-14.pdf>.
5. Маккавеев, Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне / Н.И. Маккавеев. – М.: Географический факультет МГУ, 2003. – 355 с. – ISBN 5-89575-063-X.
6. Максимов, И.И. Прогноз эрозионных процессов, техника и технология для обработки склоновых земель: дисс. докт. техн. наук / И.И. Максимов. – Чебоксары, 1996. – 325 с.
7. Максимов, И.И. Моделирование развития русла в подстилающей поверхности склоновых агроландшафтов / И.И. Максимов, В.И. Максимов, С.А. Васильев, В.В. Алексеев // Почвоведение. – 2016. – № 4. – С. 514–519.
8. Мирцхулава, Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел / Ц.Е. Мирцхулава. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 303 с.
9. Патент 2292539 РФ. Способ определения гидравлических потерь на трение / И.И. Максимов, С.А. Васильев, В.И. Максимов - Опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3.
10. Швец, Г.И. Теоретические основы эрозиоведения / Г.И. Швец. – Киев; Одесса: Вища школа, 1981. – 219 с.

Сведения об авторах:

Васильев Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: vsa_21@mail.ru
 Максимов Иван Иванович – доктор технических наук, профессор, e-mail: maksimov48@inbox.ru
 Алексеев Евгений Петрович – кандидат технических наук, старший преподаватель, e-mail: kurmyshova_olga@mail.ru
 Михайлов Анатолий Николаевич – аспирант кафедры транспортно-технологических машин и комплексов, e-mail: tolya.amn@yandex.ru
 ФГБОУ ВО «Чувашская государственная сельскохозяйственная академия», г. Чебоксары, Чувашская Республика, Россия.

METHOD FOR DETERMINING THE DIRECTION OF WATER FLOW MOTION ON AGROLANDSCAPE OF SLOPE LAND

Vasilev S.A., Maksimov I.I., Mikhaylov A.N., Alekseev E.P.

Abstract. A method for determining the direction of the water flow movement on the agrolandscape of slope lands is proposed. The principal features of slope drain hydraulics are established. Hydraulic losses of the watercourse to overcome the resistance of the underlying surface, erosion processes and the transport of particles of the constituent sediments are presented in the form of hydrodynamic characteristics of the water flow. Dependences are obtained to determine the rate of change in the coefficient of hydraulic roughness for any stochastically forming surface. A device for studying the process of forming a microcanal on the underlying surface has been developed, which makes it possible to study the process of forming a microcanal and accurately measure the depth and width of the flow of the microcanal. According to the results of field studies, it was found that the maximum width of the microcanal reached 8.1 cm and the depth 3.4 cm, and in the process of interaction of the water flow and soil with the specified characteristics, the position of the lowest point of the microcanal changed, due to the occurrence of fluctuations in the watercourse and its meandering. The amplitude of the oscillations varied from 1.86 cm to 2.12 cm and amounted to a maximum of 2.6 cm. Thus, the parameters obtained allow us to predict slope erosion and develop effective measures to reduce the slope current precipitation.

Key words: hydrodynamic characteristic, water flow, sloping agrolandscapes, slopes of hydraulic losses, micrograss, slope erosion.

References

1. Baryshnikov N.B. Formulas and methods for calculation of bed-load consumption. / N.B. Baryshnikov, Yu.A. Demidova, A.O. Pagin, A.B. Sokolov // [Formuly i metody dlya rascheta raskhodov donnykh nanosov]. // *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. Nauchno-teoreticheskiy zhurnal. - Scientific notes of Russian State Hydrometeorological University. Scientific and theoretical journal.* – Spb.: izd. RGGMU, 2009. – P. 16-23. – Available at: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/11-2.pdf.
2. Vasilev S.A. Substantiation of constructive-technological parameters of profilographs for control of reclamation technologies on slope agrolandscapes. [Obosnovanie konstruktivno-tekhnologicheskikh parametrov profilografov dlya kontrolya meliorativnykh tekhnologiy na sklonovykh agrolandshaftakh]. / S.A. Vasilev // *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii. - Scientific journal of Russian Research Institute of Problems of Land Reclamation.* – 2016. – №4 (20). – P. 79–93. – Available at: http://www.rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec358-field6.pdf.
3. Vasilev S.A. The results of experimental studies of hydrophysical and erosive properties of soils on the territory of the “Trud” collective farm in the Batyrevo district of the Chuvash Republic. [Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy gidrofizicheskikh i erozionnykh svoystv pochv na territorii SKhPK “Trud” Batyrevskogo rayona Chuvashskoy Respubliki]. // *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni I.Ya. Yakovleva. – The Herald of Chuvash State Pedagogical University named after I.Ya. Yakovleva.* – 2013. – Issue 4(80), Ch.2. – P. 39 – 45.
4. Larionov G.A. Vliyaniye nanosov na erodiruyuschuyu sposobnost melkovodnykh potokov. / N.G. Dobrovolskaya, Z.P. Kiryukhina, L.F. Litvin // *Eroziya pochv i ruslovye protsessy.* (Effect of bed-load on the erodibility of shallow water flows. // Erosion of soils and channel processes). - M., 2003. Issue 14. - P. 34-45. – Available at: <http://makkaveev-lab.narod.ru/SEFP-14.pdf>.
5. Makkaveev N.I. *Ruslo reki i eroziya v ee bassejne.* [River’s bed and erosion in its basin]. / N.I. Makkaveev. - M.: Geograficheskiy fakultet MGU, 2003, P. 355. - ISBN 5-89575-063-Kh.
6. Maksimov I.I. *Prognoz erozionnykh protsessov, tekhnika i tekhnologiya dlya obrabotki sklonovykh zemel: diss. dokt. tekhn. nauk.* (Forecast of erosion processes, techniques and technology for the treatment of sloping lands: dissertation of Doctor of Technical Sciences). / I.I. Maksimov. - Cheboksary, 1996. – P. 325.
7. Maksimov I.I. Modeling the river’s bed development in the underlying surface of slope agrolandscapes. [Modelirovaniye razvitiya rusla v podstilayuschey poverkhnosti sklonovykh agrolandshaftov]. / I.I. Maksimov, V.I. Maksimov, S.A. Vasilev, V.V. Alekseev // *Pochvovedeniye. – Soil science.* – 2016. – №4. – P. 514–519.
8. Mirtskhulava Ts.E. *Osnovy fiziki i mekhaniki erozii rusel.* [Fundamentals of the physics and mechanics of the erosion of river beds]. / Ts.E. Mirtskhulava. - L.: Gidrometeoizdat, 1988. – P. 303.
9. *Patent 2292539 RF. Sposob opredeleniya gidravlicheskikh poter na trenie.* (Patent 2292539 of the Russian Federation. Method for determining hydraulic losses due to friction). / I.I. Maksimov, S.A. Vasilev, V.I. Maksimov - Published 27.01.2007, Bulletin № 3.
10. Shvebs, G.I. *Teoreticheskie osnovy eroziyovedeniya.* [Theoretical foundations of erosion]. / G.I. Shvebs. – Kiev; Odessa: Vishcha shkola, 1981. – P. 219.

Authors:

Vasilev Sergey Anatolevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: vsa_21@mail.ru
 Maksimov Ivan Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: maksimov48@inbox.ru
 Alekseev Evgeniy Petrovich – Ph.D. of Technical Sciences, Senior Lecturer, e-mail: kurmishova_olga@mail.ru
 Mikhaylov Anatoliy Nikolaevich – post-graduate student of Transport-technological machines and complexes Department, e-mail: tolya.amn@yandex.ru
 Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Chuvash Republic, Russia.