

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОЛЕВОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА АГРОЛАНДШАФТАХ СКЛОНОВЫХ ЗЕМЕЛЬ

С.А. Васильев

Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, Чебоксары, Россия

Эл. почта: vsa_21@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.07.17; принята к печати 20.09.2017

На основании математической модели движения водного потока на агроландшафте склоновых земель получено модифицированное уравнение движения временного водного потока и предложена гидродинамическая характеристика для его решения, также выявлены основные гидравлические потери водного потока при движении по подстилающей поверхности. Предложены конструкции технических средств и методики их применения при полевом профилировании подстилающей поверхности для контроля противоэрозионных технологий. Реализация предложенного подхода на агроландшафтах склоновых земель Чувашской Республики свидетельствует о его перспективности при использовании сельскохозяйственными и мелиоративными предприятиями России, развивающими и внедряющими противоэрозионные технологии.

Ключевые слова: метод полевого профилирования, противоэрозионные технологии, агроландшафт, склоновые земли, средства контроля.

IMPLEMENTATION OF A FIELD PROFILING TECHNIQUE FOR THE CONTROL OF EROSION PREVENTION IN SLOPED LANDS OF AGRICULTURAL LANDSCAPES

S.A. Vasilyev

Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Russia

E-mail: vsa_21@mail.ru

A mathematical model of water flow in sloped lands is suggested. An equation is derived to connect water flow with defined hydrodynamic characteristics and to determine hydraulic losses caused by water flow over underlying soil surface are. A design for devices useful in field profiling required for erosion-preventive measures is suggested. The devices and procedures of their application are being tested in sloped lands of agricultural landscapes in Chuvash Republic. The results suggest that the approach is promising for implementation by agricultural and land-reclamation enterprises involved in developing of erosion-preventive technologies.

Keywords: field profiling, erosion-preventive technologies, agricultural landscape, sloping lands, control means.

Введение

Правительством Российской Федерации признаны приоритетными федеральные целевые программы «Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2010 годы и на период до 2013 года» и «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы».

В концепциях федеральных программ отмечается, что на агроландшафтах существенно увеличилось количество почв, подверженных эрозии и действию различных негативных явлений, в особенности для пашни плодородие почв снизилось на 30–60%.

Динамика эрозии в агроландшафтах склоновых земель в настоящее время такова, что делает важным переход от пятилетнего обследования к ежегодному количественному контролю параметров подстилающей поверхности, важных, в частности, для поверхностного задержания стока.

В России и за рубежом разработано множество подходов к оценке противоэрозионных технологий, однако не все из них вполне соответствуют действительности происходящих процессов [12, 19], что вероятнее всего объясняется недостаточным учетом специфики параметров почвы [1, 4, 14, 18]. Эти параметры на агроландшафтах склоновых земель меняются существенно, и гидравлика склонового

стока имеет свои принципиальные особенности по сравнению, например, с речными процессами, что создает определенные затруднения научного, методического и технического плана.

Влияя на поверхностное задержание стока на агроландшафтах склоновых земель, можно при внедрении и количественном контроле противоэрозионных технологий активно управлять процессами стокообразования и эрозии почв [8, 10, 16, 17].

Из вышеизложенного следует, что необходимо определять объективные показатели подстилающей поверхности склоновых земель, удовлетворяющие требованиям практики, и разработать методы и технические средства полевого профилирования для определения таких показателей.

1. УСЛОВИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОЛЕВОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Анализ теоретических исследований [21–25] показывает, что перспективными для противоэрозионных технологий на агроландшафтах склоновых земель являются исследования по определению гидрофизических и эрозионных показателей подстилающей поверхности, для чего

необходима разработка методов и способов полевого профилирования, а также технических средств для их реализации при учете энергетического взаимодействия водного потока с объектами подстилающей поверхности.

Связи между разными аспектами применения технических средств полевого профилирования для контроля противоэрозионных технологий отражены на рис. 1.

С учетом этих связей предложена описанная ниже математическая модель движения водного потока.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ВОДНОГО ПОТОКА НА АГРОЛАНДШАФТЕ СКЛОНОВЫХ ЗЕМЕЛЬ

При рассмотрении движения водного потока на склоне можно выявить закономерности, связывающие параметры потока и подстилающей поверхности, обусловленные воздействием на него движущих сил и сил сопротивления движению. Воздействие этих сил, вызывающих ускорение или торможение водного потока, можно представить в виде мощностного баланса с учетом некоторых допущений, отмеченных в работах [3, 11]:

$$N_{\alpha} = N_{\varphi} + N_{\psi} + N_{\delta} + N_{\gamma} + N_j + N_s, \quad (1)$$



Рис. 1. Структурная схема функционирования технических средств для контроля противоэрозионных технологий

где: N_α – мощность водного потока, Дж/с; в правой части уравнения (1) потери мощности водного потока (Дж/с) на:

N_φ – преодоление силы сопротивления шероховатости подстилающей поверхности склона;

N_ψ – размыв подстилающей поверхности склона;

N_S – взвешивание твердых частиц [7].

N_δ – преодоление силы сопротивления растительных элементов на поверхности склона [3]; а также обусловленные

N_γ – влиянием волнистости подстилающей поверхности склона;

N_j – влиянием инерции потока.

Для сравнения водных потоков, движущихся по разным подстилающим поверхностям склона, и выявления резервов энергии водного потока, которые могут, например, ускорить поток или размывать микрорусло, приведем уравнение мощностного баланса водного потока к безразмерной форме, разделив все его составляющие на произведение веса рассматриваемого объема и скорости потока:

$$i = i_\varphi + i_\psi + i_\delta + i_\gamma + i_j + i_S = i_c + i_\psi + i_j + i_S = \sum i_\lambda, \quad (2)$$

где: i – уклон подстилающей 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 [3];

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;

$\sum i_\lambda$ – сумма уклонов гидравлических потерь при движении водного потока по подстилающей поверхности.

Раскрывая составляющие уравнения (2), получим следующее выражение при условии $i_S = 0$:

$$i = \frac{(1+\varphi)}{2qg} \lambda_{zn} v^3 + \frac{1}{\psi} v^2 + \frac{v^3}{2\delta^2 qg} + \frac{\gamma}{2qg} v^3 + \frac{j}{g}, \quad (3)$$

где: φ – коэффициент гидравлической шероховатости [6]; λ_{zn} – коэффициент сопротивления гладкой поверхности;

v – скорость движения элементарного объема водного потока, м/с;

$q = \frac{Q}{B}$ – единичный расход водного потока, м²/с [20];

Q – расход водного потока, м³/с;

B – элементарная ширина водотока, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ψ – потенциал эрозионной стойкости почвы, Дж/кг; δ – комплексная гидродинамическая характеристика растительного слоя;

γ – коэффициент гидродинамического сопротивления волнистости поверхности или дискретного препятствия;

j – ускорение водного потока, м/с² [11].

Уравнения (2) и (3) показывают баланс действительного уклона и суммы уклонов гидравлических потерь при движении водного потока по стокоформирующей поверхности.

Преобразуем уравнение (3), выделив в левой части ускорение, и получим дифференциальное модифицированное уравнение движения временного водного потока:

$$\frac{dv}{dt} = ig - \left[\left((1+\varphi)\lambda_{zn} + \frac{1}{\delta^2} + \gamma \right) \frac{v^3}{2q} + \frac{g}{\psi} v^2 \right]. \quad (4)$$

Проведем замену суммы, представленной в квадратных скобках, на коэффициент суммарного сопротивления подстилающей поверхности:

$$\kappa = (1+\varphi)\lambda_{zn} + \frac{1}{\delta^2} + \gamma. \quad (5)$$

При моделировании процессов разгона или замедления водного потока используем системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = ig - \left(\kappa \frac{v^3}{2q} + \frac{g}{\psi} v^2 \right); \\ \frac{dL}{dt} = v. \end{cases} \quad (6)$$

Интегрирование этих уравнений позволяет получить характеристики изменения скорости $v = f(t)$ и пройденного расстояния $L = f(t)$ в зависимости от времени при разгоне и замедлении водного потока. Начальные условия интегрирования $v = 0$ и $L = 0$. Решение полученных уравнений выполнялось аналитическим и графоаналитическим методами.

Для анализа движения водотоков по подстилающей поверхности и решения полученных уравнений представим гидродинамическую характеристику водного потока – графическое изображение изменений уклонов гидравлических потерь водного потока в зависимости от его скорости движения (рис. 2).

Так как составляющие уравнения (2) имеют обратную зависимость от величины веса рассматриваемого объема водного потока, необходимо при использовании гидродинамической характеристики наносонесущего водного потока изменить масштаб оси ординат прямо пропорционально соотношению

$$\frac{G}{G_e} = \frac{m}{m_e} = \frac{\rho}{\rho_e}, \quad (7)$$

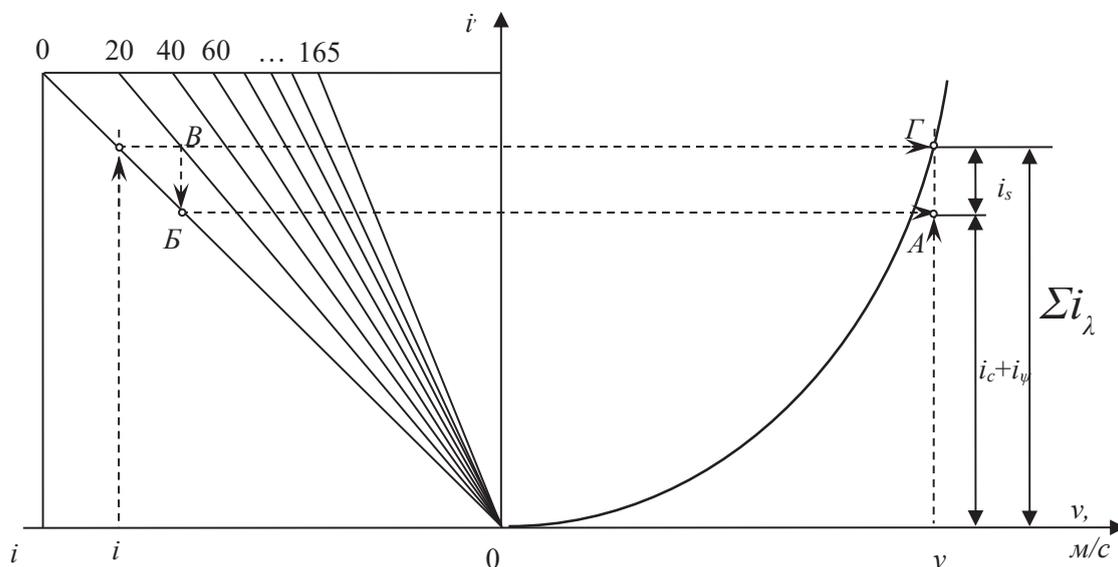


Рис. 2. Гидродинамическая характеристика водного потока при известном уклоне подстилающей поверхности (по [11]).
Объяснения в тексте

где: G, G_g – соответственно вес мутной или осветленной воды, Н; m, m_g – соответственно масса мутной или осветленной воды, кг; ρ, ρ_g – соответственно плотность мутной или осветленной воды, кг/м³.

По этой причине в левом квадранте рис. 2 показана номограмма, где через начало координат проводятся прямые под определенным углом, тангенс которого определен уравнением (7). Воспользоваться ими можно при выполнении гидравлических расчетов по определению величин уклона гидравлических потерь на взвешивание твердых частиц при известной мутности водного потока, то есть $i_s > 0$. Соответствующие построения для некоторого случая показаны на рис. 2 линиями со стрелками.

Таким образом, на основе энергетического подхода получены уравнения движения (2), (4) и гидродинамическая характеристика водного потока, установлены основные составляющие сопротивления водному потоку, создающие гидравлические потери: на преодоление шероховатости, волнистости дневной поверхности почвы и растительных элементов на ней, на взвешивание твердых частиц и на размыв подстилающей поверхности склона. Воздействуя установленными факторами сопротивления на водный поток, можно управлять стоком атмосферных осадков на подстилающей поверхности агроландшафта склоновых земель. Также выявлены при анализе модифицированных уравнений движения водного потока (3) и (4) основные параметры контроля подстилающей поверхности, существенно влияющие на процесс взаимодействия водного потока с подстилающей поверхностью: коэффициенты гидравлической шероховатости и гидродинамического

сопротивления волнистости поверхности почвы, потенциал эрозионной стойкости почвы, комплексная гидродинамическая характеристика растительного слоя и временного водного потока: интенсивность стока или расход.

3. РАЗРАБОТАННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОЛЕВОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ И МЕТОДИКИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для проведения экспериментальных исследований на склоновых землях разработан способ определения среднего уклона, шероховатости и волнистости элементарной площадки в полевых условиях и профилографы для его осуществления [9], показанные на рис. 3 и 4.

Устройство, показанное на рис. 2, состоит из рамы 1 с тремя опорами 2, по центру которой вертикально расположена шарнирно-фиксируемая ось 3, подшипника качения 4, плеча 5 с жестко закрепленной перпендикулярно на конце стойкой 6, поводка 7 в виде параллелограмма, ролика 8 и механизма считывания вертикального перемещения ролика, состоящего из датчика перемещения 9, жесткой ленты с продольной рамкой 10 и направляющей 11, закрепленной на кронштейне 12. На раме установлен уровень 13. Для определения угла поворота стойки 6 вокруг центра устройства применяется датчик перемещения 9, который закреплен на плече 5 и скользит по поверхности диска 14, жестко закрепленного на оси 3.

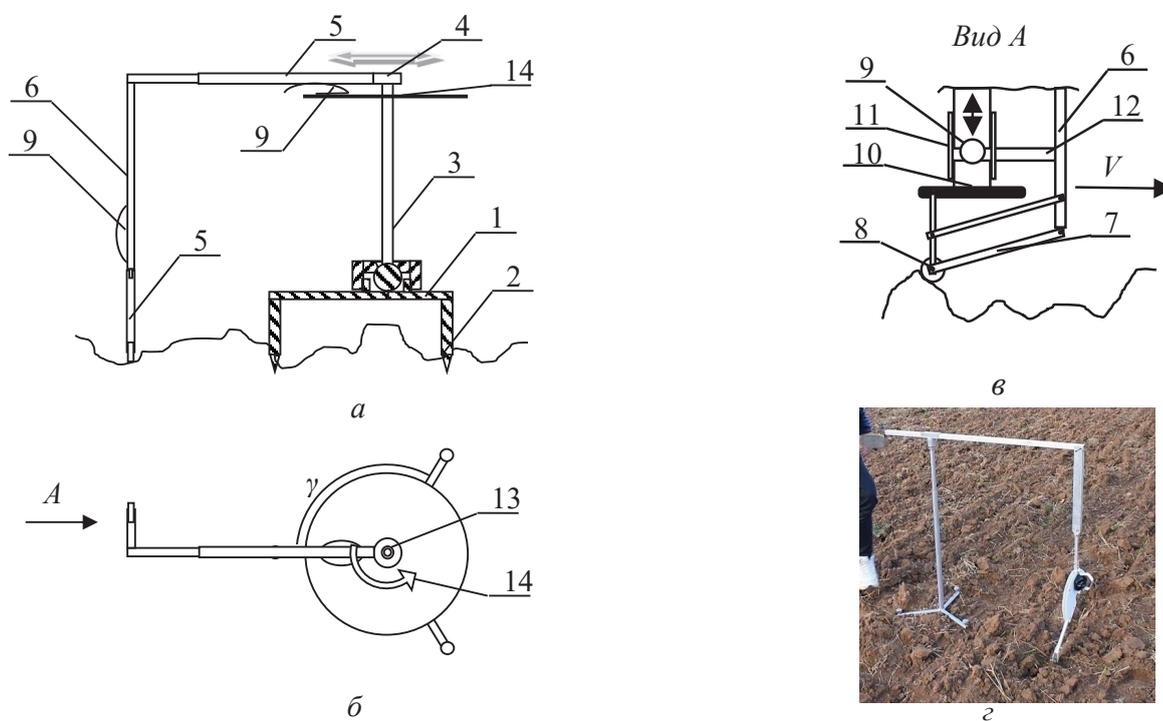


Рис. 3. Принципиальная схема и общий вид изготовленного контактного профилографа [9]: а – принципиальная схема контактного профилографа; б – вид сверху; в – вид А; г – общий вид

Предварительно перед измерением рама 1 профилографа устанавливается опорами 2 на исследуемом участке, а с помощью уровня 13 находят вертикальное положение оси 3 и фиксируют его. Выставляют вылет плеча 5 в зависимости от величины неровностей поверхности элементарной площадки поля, то есть от вида обработки и типа почвы, например, после вспашки – вылет больше, обработка почвы под посев – вылет меньше и т. д. Таким образом, имеется возможность установить определенный радиус траектории движения ролика и получить необходимую базовую длину, которая должна быть такой, чтобы в ее пределах находилось 40–50 пересечений профиля со средней линией. Датчики перемещения 9 подключаются по беспроводной связи к компьютеру для записи результатов.

Далее вращают плечо 5 с постоянной скоростью. В этот момент ролик будет двигаться по окружности и копировать неровности участка. Параллелограммный механизм позволит передать только вертикальное перемещение ролика через считывающий механизм. С поверхности диска 14 также будет передаваться информация о пройденном расстоянии датчиком перемещения 9. Выполнив один оборот вокруг оси 3, проводят анализ полученной информации и строят график на компьютере.

На рис. 4 приведены принципиальная схема и общий вид изготовленного бесконтактного профилографа,

разработанного с учетом преимуществ и недостатков контактного профилометра.

Устройство состоит из массивного основания со стержнями 1 для фиксации на поверхности почвы, на которое с помощью подшипника устанавливается ось 2, в нижней части которой крепится энкодер – угловой датчик 3, а в верхней части перпендикулярно закреплено подвижное плечо 4 с противовесом 5 с одной стороны и лазерным датчиком положения 6 с другой стороны, установленного с помощью стержня 7, что позволяет изменять начальное положение лазерного датчика 6. В верхней части оси 2 установлен электронный блок обработки сигналов 8, который подсоединен через USB к ноутбуку 9. На оси 2 также крепится уровень 10.

Устройство функционирует следующим образом. Предварительно профилограф устанавливается строго вертикально по уровню 10 во всех направлениях, перемещая плечо 4 по окружности. Электрическое питание для датчиков угла и положения подается от ноутбука 9. Запускается компьютерная программа «РФ 605+энкодер» на ноутбуке 9.

Далее медленно вращают плечо 4 вокруг основания 1. Выполняя один оборот, лазерный датчик положения 6 сканирует поверхность почвы и передает информацию в электронный блок обработки сигналов 8. Работает лазерный датчик по принципу оптической триангуляции. В то же время энкодер 3 замеряет положение

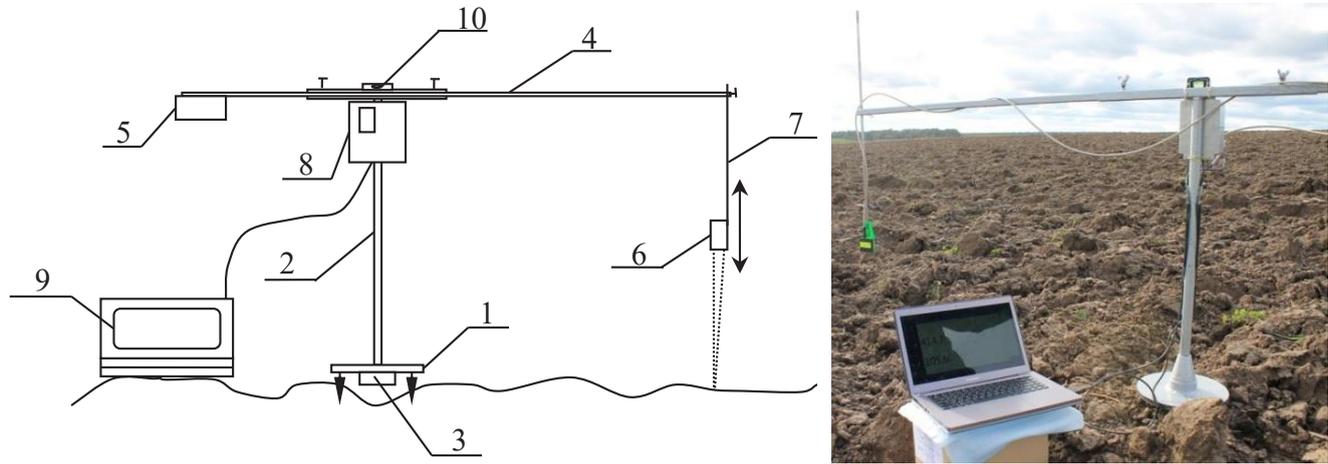


Рис. 4. Принципиальная схема и общий вид изготовленного бесконтактного профилографа [9]

оси 2 относительно основания 1 и также пересылает мгновенные значения угла поворота в электронный блок обработки сигналов 8.

Таким образом, в электронный блок обработки сигналов поступают два сигнала одновременно, которые после обработки передаются на ноутбук 9. Компьютерная программа позволяет представить информацию в полярных координатах для двух параметров: расстояние между датчиком положения и поверхностью почвы, а также соответствующий этому положению угол поворота от нулевой отметки.

При условии сканирования абсолютно гладкой наклонной поверхности величину вертикального перемещения относительно угла поворота устройства определяют по формуле [9]:

$$h = R \operatorname{tg} \alpha (1 - \cos \gamma), \quad (8)$$

где R – радиус окружности описываемой роликом или датчиком положения (вылет плеча), м; α – угол уклона элементарной площадки, град; γ – угол поворота от исходного положения плеча, град.

Полученная экспериментальная линия строится в полярных координатах h - γ (величина вертикального положения – угол поворота) или в декартовых – в виде развертки и выводится полиномиальная линия тренда 4-й степени, а также ее уравнение.

Среднее значение уклона элементарной площадки определяется по выражению:

$$i' = \frac{I_{\max} - H_{\min}}{D}, \quad (9)$$

где: I_{\max} , H_{\min} – максимальное и минимальное значения расстояния между датчиком положения и поверхностью почвы, определяемое по линии тренда (м); D – диаметр сканируемой окружности (м).

Использование метода скользящего среднего позволяет разбить данные на составляющие $y(t) = s(t) + \varepsilon(t) + k(t)$ и выделить на общем фоне:

$s(t)$ – средний уклон поверхности, случайно расположенные неровности; $\varepsilon(t)$ – шероховатость поверхности и технологические борозды; $k(t)$ – волнистость поверхности. С целью автоматизации процесса определения этих параметров разработана программа, позволяющая непосредственно проводить расчет и выводить информацию на экран монитора. Конструктивно-технологические параметры профилографов обоснованы с учетом особенностей противоэрозионных технологий обработки почвы.

Полевые исследования с контактным и лазерным бесконтактным профилографом были проведены на разных агрофонах (пашня, пашня с боронованием, мульчирование, посевы озимых, стерня зерновых и др.).

Результаты исследования одной точки поля, расположенного на сложном склоне, после зяблевой обработки почвы дисковатором БДМ-3х4П (борона дисковая тяжелая модернизированная прицепная), получаемые на экране монитора в полярных координатах, представлены на рис. 5.

После обработки данных средний уклон элементарной площадки составил 0,06, или 3,44°. Направление основной обработки почвы определялось по углу отклонения технологических борозд от направления склона, который составил 93,6°. Полученные данные после обработки в электронной таблице Excel по двум параметрам – углу поворота и высоте профиля поверхности почвы – были представлены в виде развертки. Далее при использовании метода скользящего среднего определили средний уклон поверхности. Шероховатость поверхности почвы составила 3,5 мм, а волнистость (изборожденность) поверхности почвы – 7,94 см.

По результатам теоретических и полевых исследований обоснованы конструктивно-технологические параметры профилографов, в том

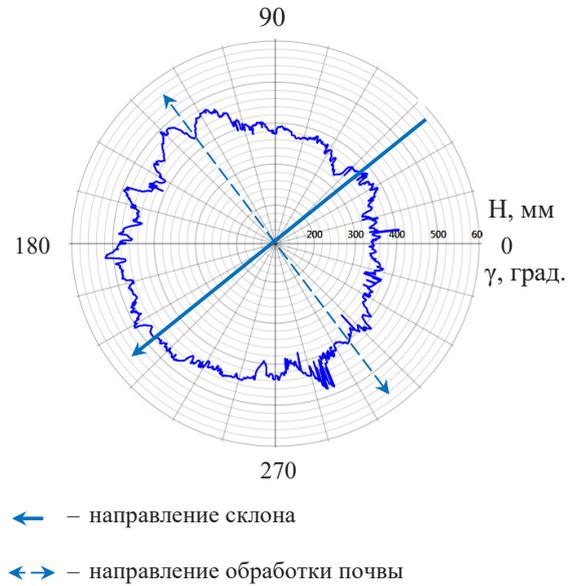


Рис. 5. Полевые исследования с помощью профилографа и их результаты в полярных координатах

числе диаметр сканируемой окружности в зависимости от технологии обработки почвы, и рассчитан рекомендуемый радиус сканирования поверхности почвы профилографом для различных почвообрабатывающих и противоэрозионных машин (табл. 1).

Установлено, что предложенные методы и технические средства полевого профилирования обеспечивают высокую точность измерения параметров при профилировании поверхности почвы для различных уклонов агроландшафта склоновых земель

(с погрешностью до 1% или ± 1 мм для бесконтактного и до 3% для контактного методов или ± 3 мм) [9].

Таким образом, применение профилографов позволяет определить направление и величину уклона, волнистость и шероховатость поверхности почвы элементарного участка, угол отклонения направления обработки почвы от направления склона в полевых условиях, что обеспечит повышение точности агротехнической оценки поверхности поля после обработки почвы орудиями, осуществляющими различные мелиоративные мероприятия.

Табл. 1

Рекомендуемый радиус сканирования поверхности почвы профилографом для различных почвообрабатывающих и противоэрозионных машин [2, 5, 9]

Наименование и марка почвообрабатывающей машины	Вид обработки почвы	Микрорельеф, см	Радиус сканирования, м
Борона дисковая полуприцепная БДП-4×4П	Зяблевая	1,8	0,5–0,75
Рыхлитель чизельный навесной РЧН-4,5	Зяблевая	2,3–4	0,75–1
Культиватор противоэрозионный комбинированный КПЭ-3,8Г	Зяблевая	3,5–6,5	0,75–1
Глубокорыхлитель «SALFORD DRH 9815-19»	Основная глубокая безотвальная	До 5	1–1,25
Плуг чизельный глубокорыхлитель ПЧ-2,5	Глубокое рыхление по стерневому фону	9,2	1,25–1,5
Противоэрозионное орудие ОП-3С	Зяблевая безотвальная мелкая	6,3–11,2	1,25–1,5
Глубокорыхлитель-щелерез ГЩ-4М	Сплошная	13,6	1,5–1,75

4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОЛЕВОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОТИВОЭРОЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА СКЛОНОВЫХ ЗЕМЛЯХ

Экспериментальные исследования по определению гидрофизических и эрозионных характеристик почвы – потенциала эрозионной стойкости, коэффициента гидравлической шероховатости, пористости и коэффициента фильтрации в полевых условиях – проводились на территории площадью более 400 га с разными агрофонами в СХПК «Труд» Батыревского района Чувашской Республики при поддержке РФФИ по проекту 13-05-97048-р_поволжье_а. Схема расположения экспериментальных точек на поле с посевами озимой культуры [2] приведена на рис. 6. С помощью программы «Google Планета Земля» на схеме отражен исследуемый участок 40×40 м с координатами его месторасположения.

Карты изолиний параметров контроля и величины смыва почвы, полученного по математической модели (6) для исследуемого участка, представлены на рис. 7. Установлено, что для исследуемой подстилающей поверхности величина смыва почвы изменяется от 0 до 0,006 кг/с для 11% площади.

Статистическая обработка данных измерений по экспериментальным исследованиям показала,

что величина ПЭС и коэффициент гидравлической шероховатости характеризуются пространственной изменчивостью для подстилающей поверхности в пределах однородного участка [15].

Для условий Канашского района Чувашской Республики контроль и обоснованность применения тех или иных мелиоративных мероприятий проводились в ходе анализа состояния агроландшафтов с учетом формы склонов, размеров мелиорируемых участков и других параметров [13]. Предлагалось при использовании гидродинамической характеристики движения водного потока на склоне определять наиболее эффективные по применению противоэрозионные мелиоративные мероприятия на агроландшафтах склоновых земель [13].

Поскольку фактически уклон склона меняется по цепочке разных фаций в зависимости от их удаленности от водораздела, согласно продольного профиля водосбора, представим функцию склона в виде:

$$i_i = f(l_i), \quad (10)$$

где: i_i – фактический уклон исследуемой фации на расстоянии l_i ; l_i – i -е расстояние от водораздельной линии по склону до исследуемой фации.

Гидродинамическую характеристику водного потока подставляют в номограмму (рис. 8) и графоаналитическим способом решают совместно с уравнением (10). Результатом решения уравнений

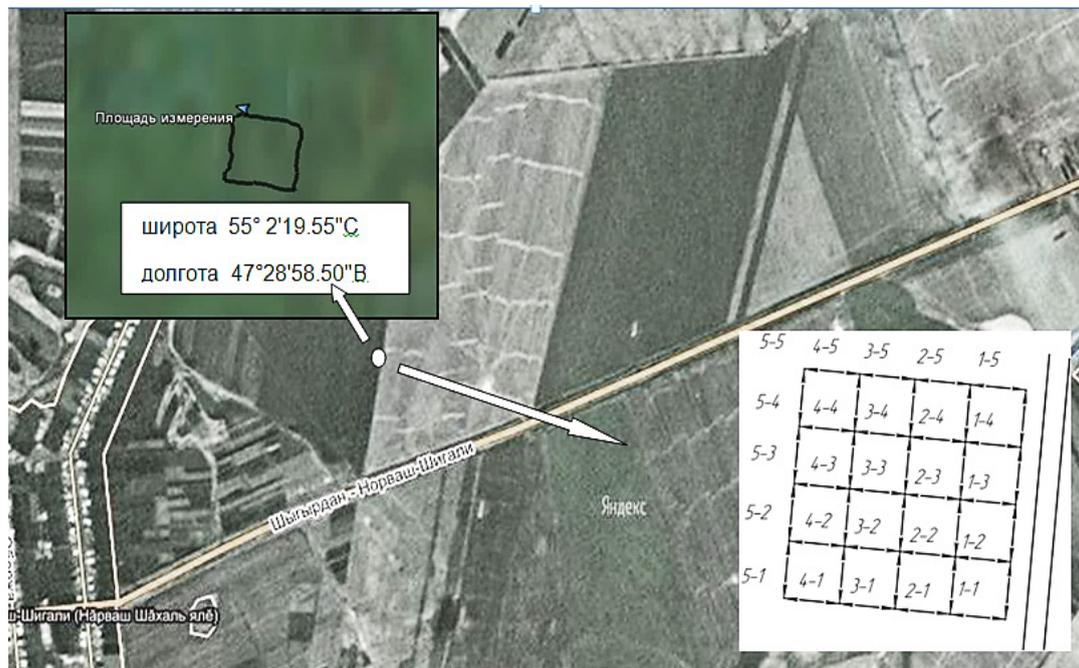


Рис. 6. Схема расположения экспериментальных точек на поле с посевами озимой культуры [8]

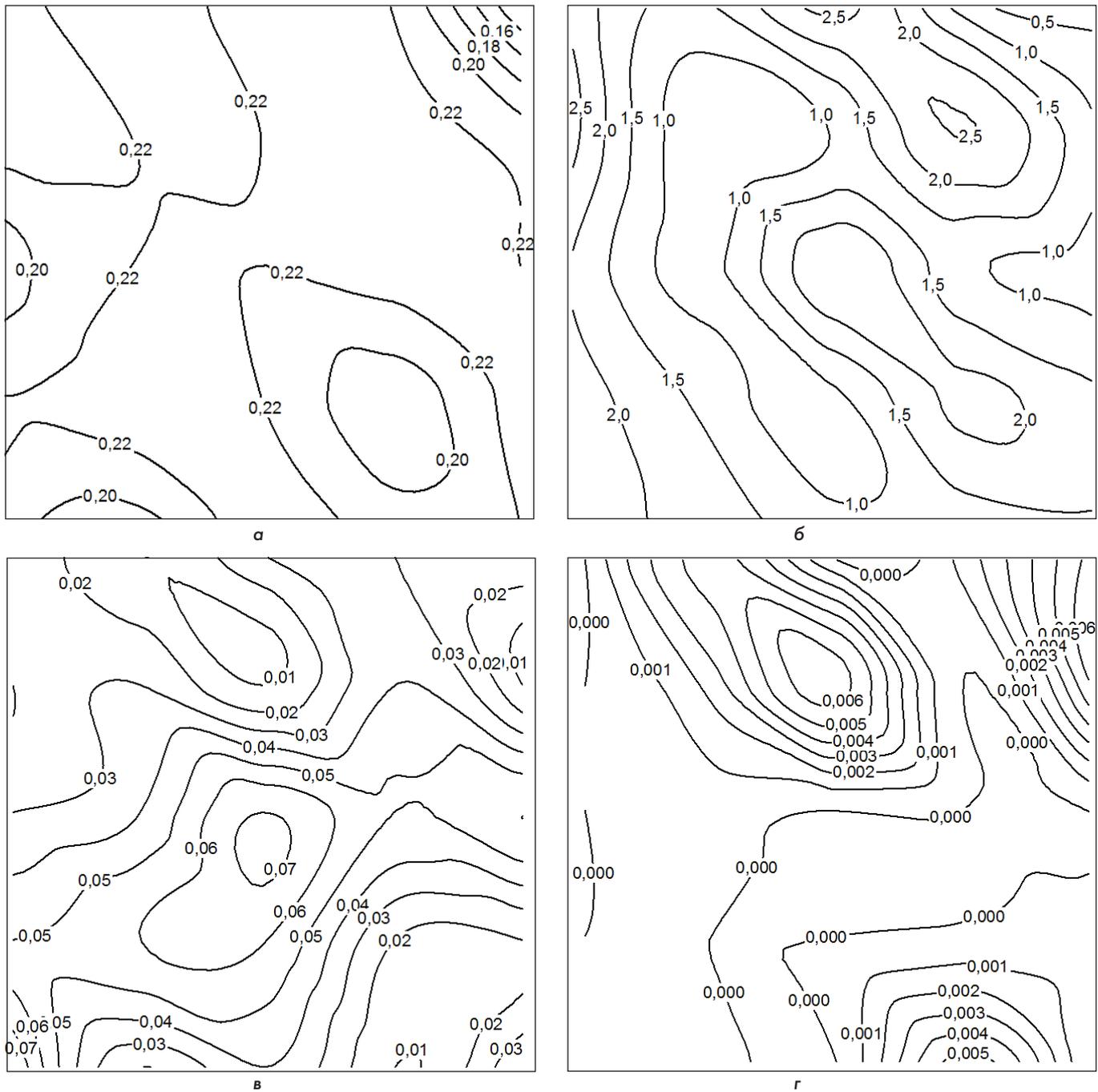


Рис. 7. Карты изолиний параметров контроля и величины смыва почвы для исследуемого участка: а – коэффициент гидравлической шероховатости; б – потенциал эрозионной стойкости, m^2/c^2 ; в – уклон подстилающей поверхности; г – смыв почвы, kg/c

является эпюра скоростей водного потока по длине водосбора, формируемая в нижнем правом квадранте номограммы.

Место применения противоэрозионных мелиоративных мероприятий определяется по эпюре скоростей водного потока номограммы (рис. 8) с учетом критических скоростей начала размыва почвы

(см. рис. 7). Размывающую скорость водного потока и основные параметры подстилающей поверхности агрофона на исследуемом водосборе определяют с помощью разработанных технических средств полевого профилирования.

Установлено, что для компенсационных мелиоративных мероприятий и инженерно-мелио-

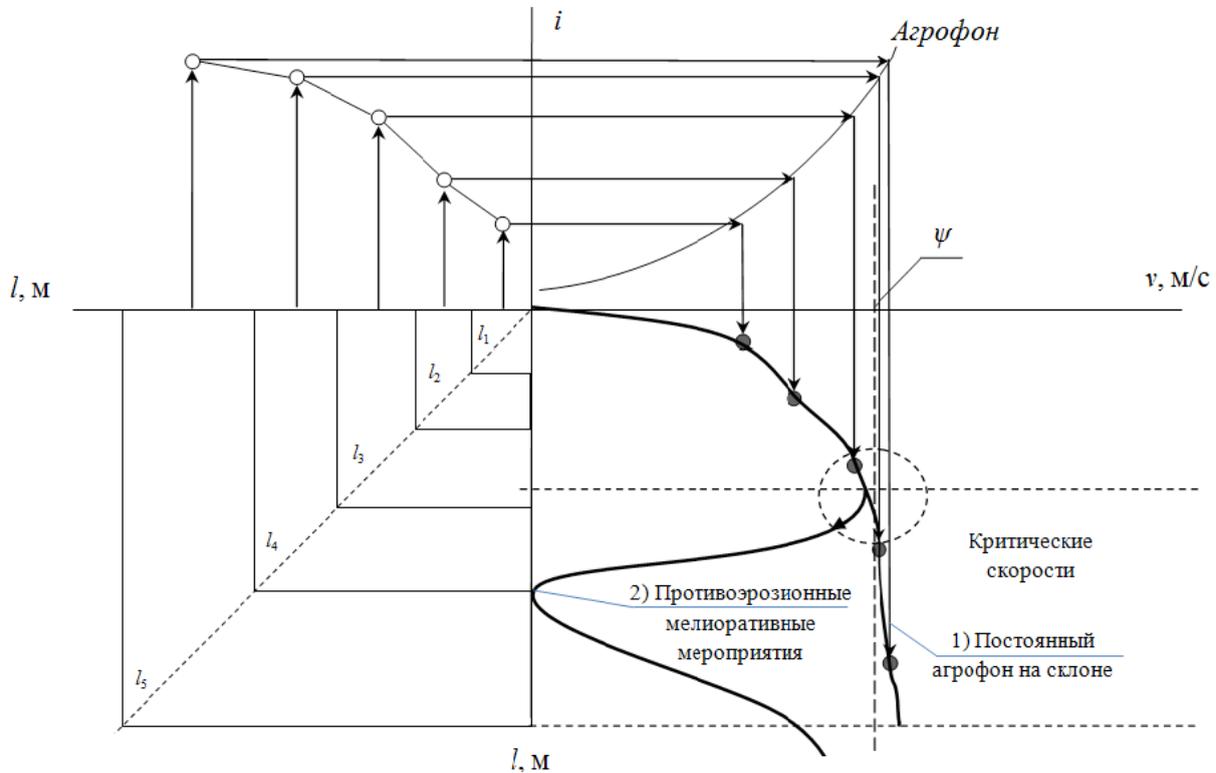


Рис. 8. Номограмма для подбора противоэрозионных мелиоративных технологий на выпуклом склоне водосбора

ративных систем, планируемых на агроландшафтах склоновых земель, возникают следующие скорости водного потока: для фитомелиоративных мероприятий – от 0,022 до 1,5 м/с даже при существенных уклонах, для агротехнических мелиоративных мероприятий – от 0,138 м/с при уклоне 0,08, а для традиционной обработки почвы скорости превышают критические, доходя до 0,8 м/с.

По номограмме для определения эпюры скоростей на конкретном склоне водосбора можно количественно проконтролировать и оценить противоэрозионные мелиоративные мероприятия, выявляя реальный скоростной режим движения водного потока на проблемных участках, а следовательно, имеется возможность своевременно предупредить эрозионные процессы и сохранить плодородие почвы на склоновых мелиорируемых землях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полевое профилирование – не единственный подход к контролю противоэрозионных технологий, но поскольку предложенный метод прост и надежен, его усовершенствование на основе дополнительных исследований, статистической обработки данных, их анализа и верификации может быть полезным для решения следующих задач:

- практические расчеты при вычислении и прогнозировании величины смыва почвы, определении параметров подстилающей поверхности и конструировании ландшафтной катены, а также при проектировании и эксплуатации противоэрозионных и мелиоративных технологий на агроландшафтах склоновых земель;

- оценка противоэрозионных технологий и средств механизации, применяемых на агроландшафтах склоновых земель, для чего рекомендуется применять следующие параметры контроля подстилающей поверхности, значительно влияющие на эрозионные процессы: потенциал эрозионной стойкости почвы, коэффициент гидравлической шероховатости дневной поверхности почвы, доля растительных элементов на поверхности почвы и, с учетом изменения этих параметров в плане, составлять карты изолиний с наложением на рельеф местности;

- получение достоверной информации об изменении основных параметров подстилающей поверхности на агроландшафтах склоновых земель, позволяющей определить направление стока атмосферных осадков, средний уклон, волнистость, шероховатость и долю растительных элементов на элементарной площадке в полевых условиях и обеспечить высокую точность измерения параметров, например, при

профилировании поверхности почвы погрешность не превышает 1% или ± 1 мм для бесконтактного метода по различным уклонам;

– проектирование и обоснование параметров и режимов работы различных противоэрозионных машин, применяемых для выполнения

технологических процессов возделывания сельскохозяйственных культур на склоновых землях.

Благодарности: работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 13-05-97048-р_поволжье_а.

Литература

Список русскоязычной литературы

1. Алексеев ВВ, Максимов ИИ, Васильев СА. Получение функциональной зависимости липкости почв от основных гидрофизических почвенных параметров. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2014;(3):63-7.
2. Алексеев ЕП, Васильев СА, Максимов ВИ. Повышение качества подпочвенного разбросного посева. Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2011;(12):8-9.
3. Боровков ВС. Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. Л.: Гидрометеиздат; 1989.
4. Будник СВ. Гидравлическое сопротивление в склоновых водотоках. Вестник Московского университета. Сер. 5. География. 2004;(4):44-8.
5. Васильев АА, Васильев СА. Устройство для внесения в почву жидких мелиорантов при плоскорезной обработке. Труды ГОСНИТИ. 2013;(т.111, Ч.1):181-3.
6. Васильев СА, Максимов ИИ, Максимов ВИ. Безразмерный показатель для оценки гидравлических потерь на трение в руслах разной шероховатости. Мелиорация и водное хозяйство. 2011;(5):40-2.
7. Васильев СА. Математическая модель для прогноза эрозионных процессов на склоновых агроландшафтах. Вестник Оренбургского государственного университета. 2015;(9):96-100.
8. Васильев СА, Максимов ИИ, Алексеев ВВ. Методика и устройство для профилирования поверхности почвы и определения направления стока атмосферных осадков в полевых условиях. Вестник АПК Ставрополя. 2015;(3):22-6.
9. Васильев СА. Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контроля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016;(4):40-54.
10. Васильев СА, Максимов ИИ, Алексеев ВВ. Определение эквивалентной шероховатости стокоформирующей поверхности для оценки противоэрозионных мероприятий на склоновых землях. Мелиорация и водное хозяйство. 2014;(4):32-4.
11. Васильев СА. Энергетический подход для построения гидродинамической характеристики водного потока на склоновом агроландшафте. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015;(4):194-200.
12. Голованов АИ, Айдаров ИП, Григоров МС и др. Мелиорация земель. М.: КолосС; 2011.
13. Дмитриев АН, Васильев СА, Алексеев ВВ, Максимов ИИ. Результаты почвенно-мелиоративных исследований при реконструкции межхозяйственной оросительной системы «Дружба» Чувашской Республики. Мелиорация и водное хозяйство. 2016;(2):17-21.
14. Гришанин КВ. Гидравлическое сопротивление естественных русел. СПб.: Гидрометеиздат; 1992.
15. Доспехов ВА. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов). М.: Агропромиздат; 1985.
16. Заславский МН. Эрозиоведение. Основы противоэрозионного земледелия. М.: Высшая школа; 1987.
17. Кузнецов МС, Глазунов ГП, Зорина ЕФ. Физические основы эрозии почв. М.: Изд-во МГУ; 1992.
18. Максимов ИИ, Максимов ВИ. Энергетическая концепция эрозионной устойчивости антропогенных агроландшафтов. Чебоксары: Чувашская ГСХА; 2006.
19. Мирцхулава ЦЕ. Инженерные методы расчета и прогноза водной эрозии. М.: Колос; 1970.
20. Чугаев РР. Гидравлика. Л.: Энергоиздат; 1982.

Общий список литературы/Reference List

1. Alekseyev VV, Maksimov AI, Vasilyev SA. [Deriving the functional dependence of soil stickiness on the basic hydrophysical parameters of soil]. *Agrarnaya Nauka Yevro-Severo-Vostokat*. 2014;(3):63-7. (In Russ.)
2. Alexeyev VV, Vasilyev SA, Maksimov VI. [Improving the quality of subsurface broadcast seeding]. *Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Selskogo Khoziaystva*. 2011;(12):8-9. (In Russ.)
3. Borovkov VS. *Ruslovye Protsessy i Dinamika Rechnykh Potokov na Urbanizirovannykh Territoriyakh*. [River Channel Processes And the Dynamics of River Flow in Urban Areas]. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1989. (In Russ.)
4. Budnik SV. [Hydraulic resistance in slope watercourses]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta Ser 5 Geografiya*. 2004;(4):44-8. (In Russ.)
5. Vasilyev AA, Vasilev SA. [A device for liquid fertilizer application to soils upon flat tillage]. *Trudy GOSNITI*. 2013;111(Pt 1):181-3. (In Russ.)
6. Vasilyev SA, Maksimov AI, Maksimov VI. [A dimensionless measure for assessing hydraulic friction losses in channels featuring varying roughness]. *Melioratsiya i Vodnoye Khoziaystvo*. 2011;(5):40-2. (In Russ.)
7. Vasilyev SA. [A mathematical model for prediction of erosion processes in hillslope agricultural landscapes]. *Vestnik Orenburgskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2015;(9):96-100. (In Russ.)
8. Vasilyev SA, Maksimov AI, Alekseyev VV. [A method and device for profiling of soil roughness and determining of flow direction of atmospheric precipitation under field conditions]. *Vestnik APK Stavropolya*. 2015;(3):22-6. (In Russ.)
9. Vasilyev SA. [Substantiation of the parameters of the design and performance of profilographs for controlling ameliorative technologies in hillslope agrolandscapes]. *Nauchnyi Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*. 2016;(4):40-54. (In Russ.)
10. Vasilyev SA, Maksimov AI, Alekseyev VV. [Determination of equivalent roughness of flow-forming surfaces for assessing measures for erosion control in sloping lands]. *Melioratsiya i Vodnoye Khoziaystvo*. 2014;(4):32-4. (In Russ.)
11. Vasilyev SA. [An energy-based approach to constructing of the hydrodynamic characteristics of water flow on sloping landscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo Agrouniversitetskogo Kompleksa*. 2015;(4):194-200.
12. Golovanov AI, Aidarov IP, Grigorov. *Melioratsiya Zemel'*. Moscow: KolosS; 2011. (In Russ.)
13. Dmitriyev AN, Vasilyev SA, Alekseyev VV, Maksimov AI. [The results of soil-meliorative research upon the reconstruction of the inter-farm irrigation system "Druzhba" of the Chuvash Republic]. *Melioratsiya i Vodnoye Khoziaystvo*. 2016;(2):17-21. (In Russ.)
14. Grishanin KV. *Gigravlicheskoye Soprotivleniye Yetsetvennykh Rusel*. [Hydraulic Resistance of Natural Channels]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat; 1992. (In Russ.)
15. Dospekhov VA. *Metodika Polevogo Opyta*. [Methodology of Field Experiment]. Moscow: Agropromizdat; 1985.
16. Zaslavsky MN. *Erosiovedeniye. Osnovy Protivoerozionnogo Zemledeliya*. [Erosion Science. Fundamentals of Erosion Control in Agriculture]. Moscow: Vysshaya Shkola; 1987. (In Russ.)
17. Kuznetsov MS, Glazunov GP, Zorina EPH. *Fizicheskiye Osnovy Eroзии Pochv*. [The Physical Basis of Soil Erosion]. Moscow: Izdatelstvo MGU; 1992. (In Russ.)
18. Maksimov AI, Maksimov VI. *Energeticheskaya Konsenseptiya Erozionnoy Ustoychivosti Antropogennykh Landshtaftov*. [An Energy-Based Concept of Erosion Resistance of Anthropogenic Landscapes]. Cheboksary: Chuvashskaya GSKhA; 2006. (In Russ.)
19. Mirtskhulava TsE. *Inzhenernyye Metody Rascheta i Prognoza Vodnoy Eroзии*. [Engineering Methods of Calculating and Forecasting of Ablation]. Moscow: Kolos; 1970. (In Russ.)
20. Chugayev PP. *Gidravlika*. [Hydraulics]. Leningrad: Energoizdat; 1982. (In Russ.)
21. Burwell RE, Allmaras RR, Amemiya M. A field measurement of total porosity and surface microrrelief of soils. *Soil Sci Soc Am Proc*. 1963;(27):697-700.
22. Flanagan DC, Huang C-H, Norton LD, Parker SC. Laser scanner for erosion plot measurements. *Trans ASAE*. 1995;(38):703-10.
23. Foster GR, Wischmeier WH. Evaluating irregular slopes for soil loss prediction. *Trans Am Soc Agric Engrs*. 1974;(17):305-9.
24. Garcia MR. A shadow analysis method to measure soil surface roughness. *Geoderma*. 2008;(146):201-8.
25. Merrill SD, Huang CH, Zobeck TM, Tanaka DL. Use of the chain set for scale-sensitive and erosion relevant measurement of soil surface roughness. In: *Sustaining the Global Farm*. International Soil Conservation Organization; 2001. p. 594-600.