

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ПРОФИЛОГРАФА ДЛЯ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ СКЛОНОВЫХ ЗЕМЕЛЬ

**ВАСИЛЬЕВ Михаил Андриянович**, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова  
**ВАСИЛЬЕВ Сергей Анатольевич**, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова  
**ВАСИЛЬЕВ Алексей Анатольевич**, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет

68

АГРАРНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

2

2021

В работе анализируется обширный набор данных измерений профиля дневной поверхности обработанной почвы с целью обоснования метода скользящего среднего для оценки морфологических параметров и изучения влияния базовой длины профиля на точность получаемых значений. Шероховатость поверхности для элементарной площадки составила 5,08 мм, гребнистость поверхности, образованная технологическими бороздами, – 21,9 мм, а уклон площадки – 0,056 или 3,2 град. Точность полученных значений шероховатости и гребнистости поверхности обработанной почвы существенно зависит от длины исследуемого профиля, определяемой количеством выполненных замеров. За один оборот прибора для элементарной площадки было получено 9616 точек данных на длине профиля 6,3 м (на 2 мм выполняется 3 замера). Шероховатость поверхности варьировалась от 2 мм до 6 мм, а гребнистость – 16...28 мм при количестве замеров от 2000 до 9600. При длине замеряемого профиля около 1,3 м и менее (не более 2000 точек) параметры обработанной почвенного покрова сильно недооцениваются, и эта ошибка больше для вспаханной почвы, чем для проборонованной. На более ровных поверхностях базовая длина профиля в 2,5 м может быть достаточной для адекватного расчета параметров дневной поверхности почвы.

**Введение.** Шероховатость поверхности почвы агроландшафта играет важную роль в ряде агрохимических и физико-механических процессов, происходящих на границе системы «почва–атмосфера» [1, 14]. Среди этих явлений для агроландшафта склоновых земель характерными являются инфильтрация, образование стока и почвенная эрозия. Шероховатая поверхность почвы, имеющая множество неровностей и впадин, обеспечивает меньше времени на инфильтрацию влаги. Дополнительно, шероховатые поверхности почвы снижают общую скорость стока и интенсивность эрозионных процессов, чем более ровные поверхности почвы. В целом шероховатые обработанные поверхности создают благоприятные условия для накопления влаги и сохранения плодородия почвы агроландшафта на склонах.

Наиболее часто используемым показателем шероховатости почвы является так называемая случайная шероховатость, представляющая собой стандартное отклонение высот поверхности [1, 12]. Шероховатость поверхности почвы относится к вертикальным изменениям, присущим в микро- и макрорельфе поверхности почвы, а также к их стохастическому распределению и представляет собой характерную вертикальную шкалу длины вариации микрорельефа от отдельных зерен почвы до почвенных агрегатов в диапазоне от 1 до 10 мм, а волнис-

тость (гребнистость) поверхности почвы включает в себя определенную кривизну или макроскопические топографические ее особенности [15]. Гребнистость представляет собой совокупность периодически повторяющихся неровностей, у которых расстояния между смежными возвышеностями или впадинами превышают базовую длину для имеющейся шероховатости поверхности. Шероховатость поверхности почвы в значительной степени зависит от антропогенного воздействия и сезонности, например, от обработки почвы и количества осадков. Шероховатость определяется количественно с помощью случайной величины, которая, по сути, является стандартным отклонением данных о возвышении поверхности вокруг среднего значения высоты после коррекции с использованием плоскости наилучшего соответствия и устранения эффектов обработки почвы в отдельных показаниях высоты, что отмечается в документе [11] и ГОСТ 25142-82 «Шероховатость поверхности. Термины и определения», ГОСТ ИСО 4287-2014.

В последнее время для получения цифровых моделей поверхности с высоким разрешением применяют фотограмметрические методы ближнего действия [13, 17] и наземные лазерные сканирующие приборы [2, 3, 16]. Эти методы потенциально могут обеспечивать получение информации о высоте точек на больших

площадях. Тем не менее, фотограмметрия выполняется на близком расстоянии для площадей до 1 м<sup>2</sup>. И наоборот, лазерные сканеры могли бы обследовать участки площадью до 10...100 м<sup>2</sup>, но эти приборы давали плохие результаты при измерении поверхности почвы на больших площадях [9].

Другой важной характеристикой сельскохозяйственных почв, расположенных на склоновых землях, до сих пор подробно не изученной, является связь между направлением склона и пахотных технологических борозд или гребней. Угол между бороздами обработанной почвы и направлением аспекта, которое представляет собой основное направление склона, существенно влияют на сток осадков [5, 7]. Однако, насколько известно авторам, влияние направления обработки почвы относительно склона на параметры почвы еще не было количественно оценено.

Цель исследований – обоснование метода скользящего среднего для оценки морфологических параметров дневной поверхности обработанной почвы и изучение влияния длины профиля высоты этой поверхности на точность полученных значений.

**Методика исследований.** Исследования проводили на сельскохозяйственном водосборе Орининского сельского поселения, который находится в Моргаушском районе Чувашской Республики (рис. 1). Эта территория включает Падаккасинскую ГТС с водоисточником и является частью водосборной сети реки Моргаушка. Рассматриваемая водосборная площадь занимает около 300 га с довольно сложными склонами около 8 % и высотой от 152 до 185 м. Климат

умеренно континентальный с продолжительной холодной зимой и теплым летом. Среднегодовое количество осадков составляет около 500 мм. Преобладающий класс почв – дерново-подзолистые с разной степенью оподзоленности [4, 6]. Водосбор почти полностью обработан, а сеть оврагов, границы водоисточника и ручьев – единственные участки, которые покрыты естественной растительностью. Основными культурами являются многолетние травы (костер, люцерна) и озимые злаки (пшеница и ячмень).

На водосборной площади было выбрано три сельскохозяйственных поля, размеры которых варьировались от 25 до 53 га (см. рис. 1). Исследуемые участки обрабатывались различными способами: 1-е поле – вспашка с бороноением (ПЛН-4-35+БЗТС-1); 2-е поле – дискование почвы (дискатор БДМ-3×4П); 3-е поле – зяблевая вспашка (ПЛН-4-35), некоторый анализ проводился по работе [1, 10].

Профили элементарных участков измеряли с помощью первоначально разработанного наземного кругового лазерного профилометра [2, 3]. Элементарный участок – это площадь, которую можно охарактеризовать одним исследованием дневной поверхности почвы или одной объединенной пробой почвы, согласно ГОСТ 28168-89 «Почвы. Отбор проб».

Прибор включает в себя лазерный датчик, который измеряет расстояние от самого датчика до поверхности почвы (рис. 2). Лазерный профилометр состоит из стального основания с осью, на которую прикреплена поперечная планка. Лазерный датчик помещен на каретке, размещенной на одной стороне планки, которая



Рис. 1. Фрагмент местоположения экспериментального водосбора в Моргаушском районе Чувашской Республики с распределенными контрольными полями (три сельскохозяйственных участка)



перемещается по ней вручную, при установке заданного радиуса окружности. Этот датчик имеет вертикальную точность  $\pm 0,5$  мм и диапазон измерения до 1 м, что делает его подходящим для измерения и контроля склоновых элементарных участков обработанных почв и оценки проявления эрозионных процессов на них – измерения эрозионных рывин и микрорусел. Профилограф запрограммирован на сбор и хранение данных о высоте точек, расположенных по окружности сканирования, через каждые 0,02 с. Общая базовая длина профиля поверхности может достигать 6,5 м при установке датчика на планке под радиус 1 м и более. Базовая линия, используемая для выделения неровностей, характеризует шероховатость поверхности, согласно ГОСТ 25142-82 «Шероховатость поверхности. Термины и определения». Установка содержит блок обработки сигналов, поступающих с лазерного датчика для измерения расстояния и углового энкодера для определения положения планки с датчиком вокруг оси. Прибор подключен к ноутбуку, от которого он получает питание, в нем же информация о полученных профилях собирается и обрабатывается. Процесс замера данных прост и быстр: как только первые данные о профиле поверхности начинают отображаться на компьютере в полярных координатах, оператор поворачивает планку против или по часовой стрелке вокруг оси [3]. Далее для замеряемого уклона с помощью регрессионного анализа каждый из профилей высоты корректируется, что бы получил массив истинных значений высоты. Затем профили обрабатываются специально разработанной программой в системе Excel для расчета параметров уклона, гребнистости и шероховатости поверхности.

Основными преимуществами этого прибора по сравнению с другими методами измерения шероховатости являются [2, 3]:

- 1) высокая точность получаемых данных (0,5 мм);



а



б

*Рис. 2. Профилографы: а - общий вид; б - задействованный в работе*

2) поверхность почвы элементарного участка остается неизменной во время и после измерений;

3) данные о профиле загружаются в компьютерную программу непосредственно, поэтому не требуется никакой предварительной обработки (в полярных координатах [3] и в таблицу Excel);

4) прибор надежен, прост, мобилен (габаритные размеры при замерах 1,5 м×0,3 м×1,4 м, в транспортном положении – 0,3 м×0,3 м×1,5 м) и может использоваться в полевых условиях;

5) сбор и хранение большого количества профилей (в одном профиле от 5000 до 40000 точек в зависимости от скорости вращения датчика).

Для определения основных параметров уклона, гребнистости и шероховатости дневной поверхности почвы для каждого способа обработки почвы использовался метод скользящего среднего [8]. Метод скользящего среднего позволяет определить скользящую среднюю, которая численно равна среднеарифметическому значению исходной функции за установленный период и определяется по выражению:

$$SMA_k = \frac{1}{n_c} \sum_{i=0}^{n-1} h_{k-i} = \frac{h_k + h_{k-1} + \dots + h_{k-n+1}}{n_c}, \quad (1)$$

где  $SMA_k$  – величина скользящего среднего в точке  $k$ ;  $n_c$  – количество значений точек, полученных при сканировании поверхности, в виде функции для расчёта скользящего среднего (интервал осреднения);  $h_{k-i}$  – величина полученной функции в точке  $k-1$ .

**Результаты исследований.** Замеренные данные усреднили по различному количеству значений точек, полученных при сканировании поверхности, в виде функции для расчёта скользящего среднего от 2 до 1500 и выбрали – 10, 500 и 1000 для определения основных морфологических параметров поверхности. Для определения шероховатости, гребнистости и уклона поверхности по замеренным данным вычисляем

скользящее среднее с количеством периодов равным 10, 500 и 1000 соответственно по следующим выражениям:

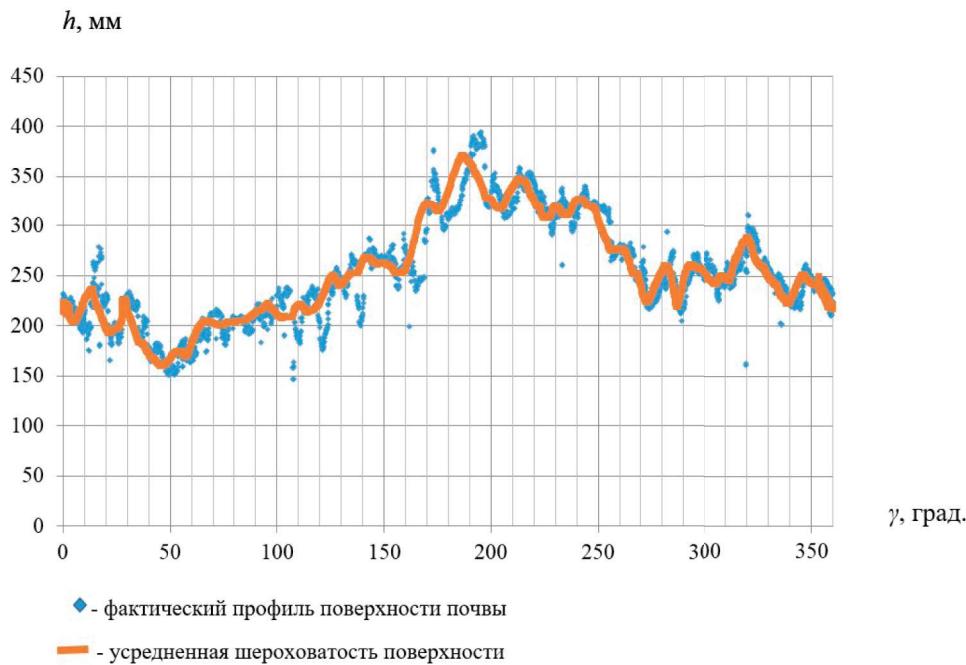
$$SMA_{10} = \frac{h_k + h_{k-1} + \dots + h_{k-9}}{10}, \quad (2)$$

$$SMA_{500} = \frac{h_k + h_{k-1} + \dots + h_{k-499}}{500}, \quad (3)$$

$$SMA_{1000} = \frac{h_k + h_{k-1} + \dots + h_{k-999}}{1000}. \quad (4)$$

Используя полученные выражения (2), (3) и (4), построим функцию скользящей средней этих параметров на графике профиля дневной поверхности обработанной почвы. Шероховатость поверхности для элементарной площадки по выражению (2) составила 5,1 мм (рис. 3). Гребнистость поверхности образована технологическими бороздами, высота которых 21,9 мм (рис. 4), а уклон элементарной площадки составил 0,056 или 3,2 град. (рис. 5).

Зависимость значений определяемых величин от длины профиля является следствием мно-

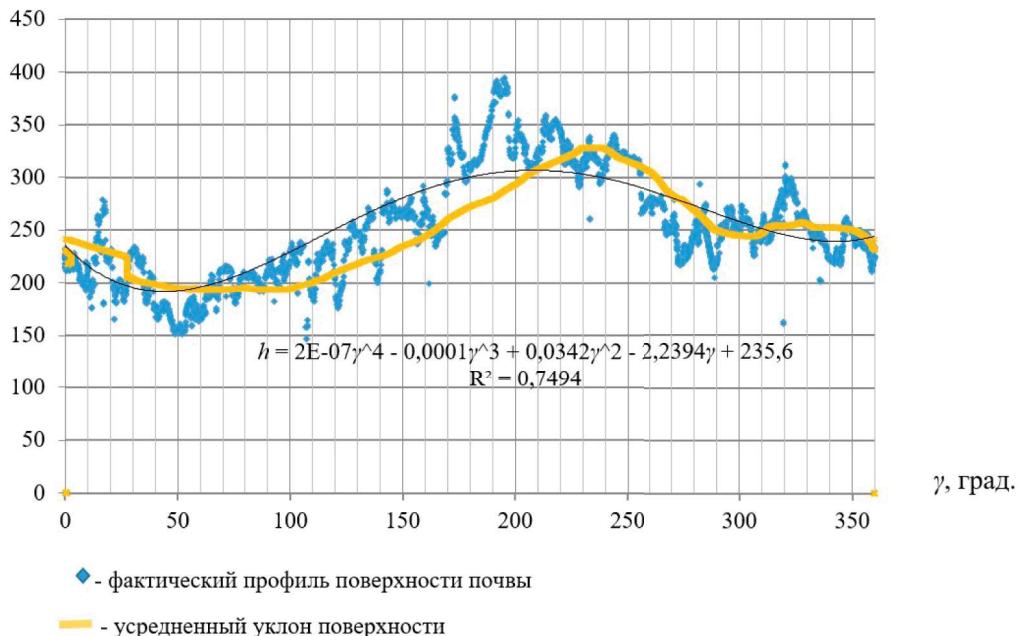


*Рис. 3. График функции фактического профиля поверхности обработанной почвы с усреднением для определения его шероховатости*



*Рис. 4. График функции фактического профиля поверхности обработанной почвы с усреднением для определения его гребнистости*





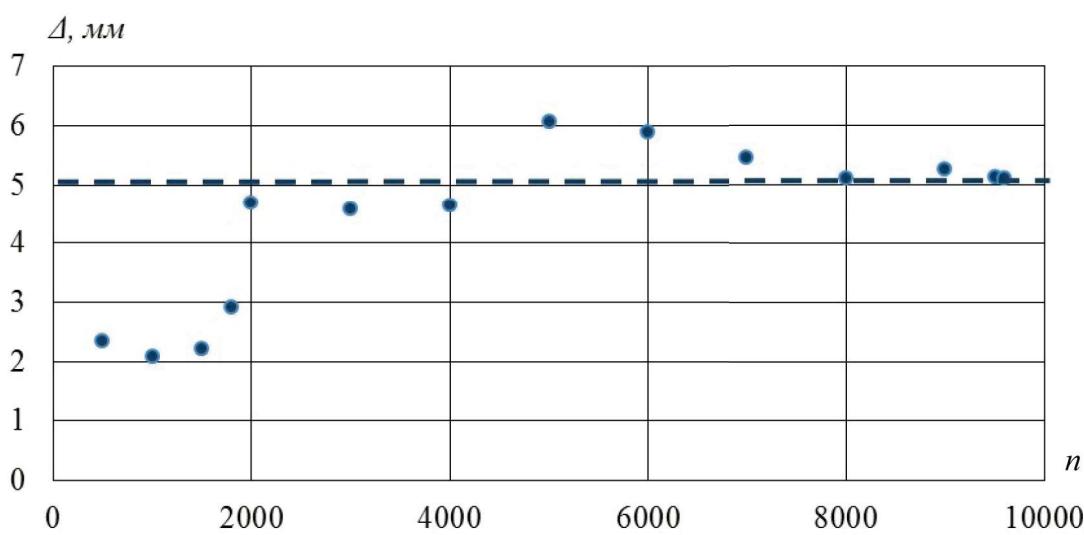
**Рис. 5. График функции фактического профиля поверхности обработанной почвы с усреднением для определения его уклона**

гомасштабного характера шероховатости поверхности [1]. Микротопография поверхности состоит из суперпозиции компонентов почвы с изменяющимися частотами. Таким образом, короткие участки профиля поверхности не могут отражать те низкочастотные составляющие шероховатости, которые заметны только тогда, когда профили достаточно длинные. Для того чтобы сравнить эти значения вследствие поведения масштабирования между различными профилями и различными способами обработки почвы, была рассчитана базовая длина по количеству замеренных точек для каждого морфологического параметра.

Для определения оптимального базового количества точек замера при определении ше-

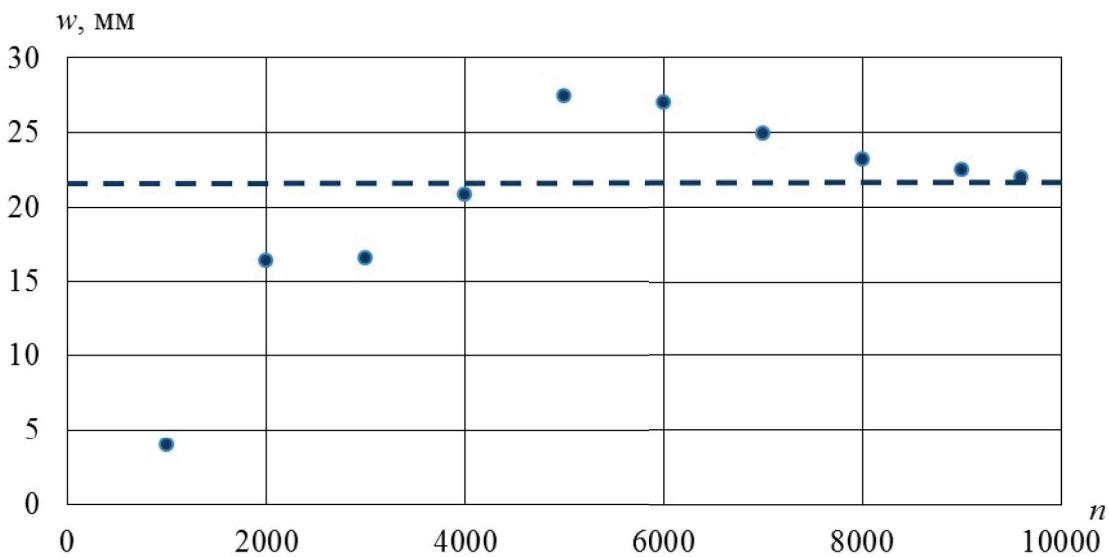
роховатости и гребнистости поверхности по окружности использовали сегментный метод, т.е. количество фактических точек, полученных по кругу в размере 9616, уменьшали в расчетах постепенно, подставляя в выражение (1). Таким образом, получили зависимости изменения расчетной величины шероховатости  $\Delta$  и гребнистости  $w$  от количества точек замера по окружности (рис. 6, 7).

По представленным графикам можно наблюдать, что полученные значения шероховатости и гребнистости поверхности обработанной почвы существенно зависят от длины исследуемого профиля, определяемой количеством замеров  $n$ . За один оборот прибора было получено 9616 точек данных на длине



**Рис. 6. Изменение расчетной величины шероховатости от количества точек замера по окружности**





**Рис. 7. Изменение расчетной величины гребнистости от количества точек замера по окружности**

профиля 6,3 м, примерно на 2 мм выполняется 3 замера. Видно, что расчетная шероховатость поверхности варьируется от 2 до 6 мм, а расчетная гребнистость – 16...28 мм. По мере увеличения длины замеряемого профиля (от 1000 до 5000 точек) параметры расчетной величины шероховатости и гребнистости сначала резко увеличиваются, а затем колеблются вокруг асимптотического значения, принятого за истинное значение, – 5,1 и 21,9 мм соответственно.

При длине замеряемого профиля по окружности около 1,3 м и менее (меньше 2000 точек) параметры обработанного покрова почвы сильно недооцениваются, и ошибка больше для вспаханной почвы, чем для проборонованной. На ровных поверхностях базовая длина профиля в 2,5 м при повороте прибора на угол 150...180 град. может быть достаточной для адекватного расчета параметров дневной поверхности почвы. Это можно объяснить отсутствием низкочастотных составляющих шероховатости на выровненных поверхностях. Аналогичные результаты были получены Taconet и Ciarletti [17], которые оценивали влияние размера комков на точность нескольких параметров шероховатости с помощью фотограмметрических наблюдений для вспаханной почвы и посевов сельскохозяйственных культур.

**Заключение.** Таким образом, на основании результатов полученных в ходе данного исследования можно сделать несколько выводов.

Почвообрабатывающие операции существенно влияют на величину и изменчивость параметров дневной поверхности почвы. Вспаханная поверхность показала не только высокие значения шероховатости и гребнистости, но также и

их большую изменчивость, которую следует учитывать при контроле операций обработки почвы и моделировании гидрологических процессов на склоновых землях, применяя метод скользящего среднего.

Точность полученных значений шероховатости и гребнистости поверхности обработанной почвы существенно зависит от длины исследуемого профиля, определяемой количеством замеров.

На более ровных поверхностях после боронования базовая длина профиля в 2,5 м может быть достаточной для адекватного расчета основных параметров дневной поверхности почвы.

Вышеприведенное позволяет рекомендовать метод скользящего среднего для оценки морфологических параметров дневной поверхности обработанной почвы; в процессе контроля устанавливать базовую длину профиля более 2,5 м для повышения точности получаемых значений.

*Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МД-1198.2020.8, соглашение № 075-15-2020-228.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев С.А., Максимов И.И. Агроландшафтная мелиорация склоновых земель. – Чебоксары, 2019. – 306 с.
2. Васильев С.А. Разработка метода и профилографа для оценки мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 3 (43). – С. 220–226.
3. Васильев С.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров профилографов для контр-



оля мелиоративных технологий на склоновых агроландшафтах // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016. – № 4(24). – С. 40–54.

4. Водосборная площадь малых рек как объект антропогенного агроландшафта (на примере реки Цивиль) / В.А. Сысуев [и др.] // Аграрная наука ЕвроСеверо-Востока. – 2013. – № 5(36). – С. 59–65.

5. Метод определения направления движения водного потока на агроландшафте склоновых земель / И.И. Максимов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2017. – Т. 12. – № 4 (46). – С. 72–77.

6. Моргаушский район: крат. энцикл. / сост. Л.П. Сергеев. – Чебоксары, 2002. – 174 с.

7. Противоэрозионная контурная обработка почвы машинно-тракторными агрегатами на агроландшафтах склоновых земель / А.А. Васильев [и др.] // Вестник НГИЭИ. – 2018. – № 5 (84). – С. 43–54.

8. Реализация способа определения и обработки данных по параметрам подстилающей поверхности агроландшафтов склоновых земель / Ф.Д. Самуилов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2018. – Т. 13. – № 2 (49). – С. 81–85.

9. Семенов С.А., Васильев С.А., Максимов И.И. Особенности реализации и перспективы применения технологий цифрового земледелия в АПК // Вестник Чувашской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 1 (4). – С. 69–76.

10. Энергетический (термодинамический) подход к оценке почвообрабатывающих машин с активными рабочими органами / В.И. Максимов [и др.] // Известия Международной академии аграрного образования. – 2013. – № 17. – С. 68–71.

11. Allmaras R.R. General porosity and random roughness of the inter-row zone under the influence of soil treatment // Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture. 1966, 22 p.

12. Alvarez-Mozos J. et al. Implications of scale, slope, tillage operation and direction in the estimation of surface depression storage // Soil & Tillage Research, 2011, 111, P. 142–153.

13. Elbasit M.A., Anyoji H., Yasuda H., Yamamoto S. Potential of low cost close-range photogrammetry system in soil microtopography quantification // Hydrological Processes, 2009, 23 (10), P. 1408–1417.

14. Helming K., Romkens M.J.M., Prasad S.N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: a flume study // Soil Science Society of America Journal, 1998, 62 (1), P. 243–250.

15. Romkens M.J.M., Helming K., Prasad S.N. Soil erosion at different precipitation rates, surface roughness, and soil water regimes // CATENA, 2002, 46 (2–3), P. 103–123.

16. Takken I., Govers G., Steegen A., Nachtergaele J., Guerif J. The prediction of runoff flow directions on tilled fields // Journal of Hydrology. 2001. 248 (1–4). P. 1–13.

17. Taconet O., Ciarletti V. Estimating soil roughness indices on a ridge-andfurrow surface using stereo photogrammetry // Soil & Tillage Research, 2007, 93 (1), P. 64–76.

**Васильев Михаил Андриянович**, соискатель кафедры «Прикладная механика и графика», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Россия.

**Васильев Сергей Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Прикладная механика и графика», Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова. Россия.

428032, г. Чебоксары, Московский просп., 15.

Тел.: 89278432290.

**Васильев Алексей Анатольевич**, канд. техн. наук, зав. кафедрой «Техническое обслуживание, организация перевозок и управление на транспорте», Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. Россия.

606340, Нижегородская область, г. Княгинино, ул. Октябрьская, 22 А.

Тел.: (83166) 4-15-50.

**Ключевые слова:** оценка качества; обработка почвы; поверхность почвы; лазерный профилограф; круговое сканирование; агроландшафт; склоновые земли.

## APPLICATION OF LASER PROFILOGRAPH IN THE ASSESSMENT OF MECHANICAL TILLAGE OF SLOPE LANDS

**Vasiliev Mikhail Andriyanovich**, Applicant of the chair “Applied Mechanics and Graphics”, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov. Russia.

**Vasiliev Sergey Anatolyevich**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the chair “Applied Mechanics and Graphics”, Chuvash State University named after I.N. Ulyanov. Russia.

**Vasiliev Alexey Anatolyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the chair “Maintenance, Organization of Transportation and Management of Transport”, Nizhny Novgorod State Engineering and Economic University. Russia.

**Keywords:** quality assessment; tillage; soil surface; laser profiler; circular scanning; agricultural landscape; slope lands.

The article analyzes an extensive set of measurements of the daily surface profile of cultivated soil in order to justify the moving average method for evaluating morphological parameters and studying the influence of the base length of

the profile on the accuracy of the obtained values. The surface roughness for the elementary platform was 5.08 mm, the surface ridge formed by technological furrows was 21.9 mm, and the slope of the platform was 0.056 or 3.2 degrees. The accuracy of the obtained values of roughness and ridges of the surface of the treated soil depends significantly on the length of the profile under study, determined by the number of measurements performed. For one turn of the device for the elementary platform, 9616 data points were obtained on the profile length of 6.3 m (3 measurements are performed per 2 mm). The surface roughness varied from 2 mm to 6 mm, and the ridge – 16 ... 28 mm with the number of measurements from 2000 to 9600. When the measured profile length is about 1.3 m or less (no more than 2000 points), the parameters of the treated soil cover are greatly underestimated, and this error is greater for ploughed soil than for cored soil. On flatter surfaces, the base profile length of 2.5 m may be sufficient to adequately calculate the parameters of the daily soil surface.

