

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6423

УДК 630*432

Статья

Определение характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтометом, методами оптического распознавания и оптического измерения

Гнусов Максим Александрович

*кандидат технических наук, научный сотрудник, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация),
mgusov@yandex.ru*

Драпалюк Михаил Валентинович

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), md@vglta.vrn.ru

Попиков Пётр Иванович

доктор технических наук, профессор, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), porikovpetr@yandex.ru

Дручинин Денис Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), druchinin.denis@rambler.ru

Бухтояров Леонид Дмитриевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), vglta-mlx@yandex.ru

Ступников Дмитрий Сергеевич

*кандидат технических наук, инженер-конструктор, ООО «НПП «ТЕТА»,
Neiti1992@mail.ru*

Получена: 31 мая 2022 / Принята: 6 декабря 2022 / Опубликовано: 11 декабря 2022

Аннотация: Проведение полевых экспериментальных исследований является неотъемлемой частью процесса разработки и исследования сельскохозяйственных и лесных орудий. Грунтометательная техника, применяемая для тушения и предупреждения лесных низовых пожаров, проходит ряд теоретических и лабораторно-полевых исследований. От момента отрыва фрезерным рабочим

органом до момента встречи с кромкой лесного низового огня почвогрунт находится в полёте в виде фрагментов, перемещающихся в воздушной среде под действием законов аэродинамики и противодействующих сил. Значительный рост вычислительной мощности компьютеров, развитие процесса моделирования, а также совершенствование алгоритмов позволяют пополнить базу по применению компьютерного зрения и методов оптического измерения при проведении научных исследований. Цель работы — определение характеристик движения потока почвогрунта в воздушной среде методами оптического распознавания и оптического измерения по видеоряду. Для достижения поставленной цели исследования необходимо выявить наиболее эффективный метод оптического распознавания, позволяющий с высокой надёжностью отделить поток почвогрунта от фона и разработать математический аппарат, позволяющий по каждому кадру видеозаписи полевого эксперимента определить характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтометательной техникой. В ходе проведения научных исследований нами были проверены пять основных методов оптического распознавания по видеоряду для определения наиболее эффективного метода отделения изображения потока почвогрунта от фоновых изображений (деревьев, веток, травы и т. д.): разделение по цветам, разделение по яркости, комбинация методов по цветам и яркости, определение изображения фона (предварительное или путём усреднения множества видеок кадров) и отделение движущихся объектов на видеокadre от фона, выделение размытых в движении участков кадров. Анализ методов показал, что комбинированный цвето-яркостный метод максимально эффективен для реализации поставленной в работе цели. Исходя из формы траектории движения потока почвогрунта установлено, что грунтомет подаёт поток почвогрунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с, при этом дальность метания почвогрунта составляет 11 м. По мере движения потока почвогрунта скорость сначала снижается с 14 до 6 м/с из-за полёта почвогрунта вверх и перехода кинетической энергии в потенциальную, затем увеличивается с 6 до 8 м/с по мере падения почвогрунта на поверхность за счёт перехода потенциальной энергии в кинетическую. Угол оседания частиц почвогрунта на поверхность составляет около 73° к горизонту, что благоприятствует тушению кромки лесного низового пожара.

Ключевые слова: оптическое распознавание; грунтомет; поток почвогрунта; картограмма распределения плотности потока; картограмма скоростей потока

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6423

Article (Review)

Determination of the characteristics of the soil flow formed by the soil thrower by optical recognition and optical measurement methods

Maxim Gnusov

Ph. D. in engineering, researcher, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), mgnusov@yandex.ru

Mikhail Drapalyuk

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), md@vglta.vrn.ru

Petr Popikov

D. Sc. in engineering, professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), popikovpetr@yandex.ru

Denis Druchinin

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), druchinin.denis@rambler.ru

Leonid Bukhtoyarov

Ph. D. in engineering, associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G. F. Morozov (Russian Federation), vglta-mlx@yandex.ru

Dmitry Stupnikov

Ph. D. in engineering, design engineer, NPP TETA LLC, Neiti1992@mail.ru

Received: 31 May 2022 / Accepted: 6 December 2022 / Published: 11 December 2022

Abstract: Conducting field experimental research is an integral part of the development and research of agricultural and forestry tools. Soil-throwing equipment used to extinguish and prevent forest ground fires is undergoing a number of theoretical and laboratory and field studies. From the moment of separation by the milling working body until the moment it meets the edge of the forest ground fire the soil is in free flight in the form of fragments moving in the air under the influence of the laws of aerodynamics and opposing forces. A significant increase in the computing power of computers, the development of the modeling process, as well as the improvement of

algorithms provided an opportunity to apply computer vision and optical measurement methods in scientific research more effectively. The purpose of the work is to determine the characteristics of the movement of the soil flow in the air by the methods of optical recognition and optical measurement from the video sequence. To achieve the purpose it is necessary to identify the most effective method of optical recognition, which makes it possible to separate the flow of soil from the background with high reliability and develop a mathematical apparatus that allows the characteristics of the soil flow formed by forest fire soil-throwing equipment to be determined for each frame of the video recording of the field experiment. In the course of scientific research we have tested five main methods of optical recognition by video sequence to determine the most effective method for separating the image of the soil flow from background images (trees, branches, grass, etc.). These methods provide separating by color, separating by brightness, combining methods by colors and brightness, determining the background image (preliminary or by averaging a set of video frames) and separating moving objects on a video frame from the background, highlighting areas of frames blurred in motion. Analysis of the methods showed that the combined color-brightness method is the most effective one to achieve the purpose of the study. Judging from the shape of the trajectory of the soil flow it was found that the forest fire soil thrower delivers the soil flow at an angle of 35° to the horizon with an initial speed of 14 m/s, while the distance of throwing the soil is 11 m. As the soil flow moves, the speed first decreases from 14 m/s to 6 m/s due to the flight of the soil upwards and the transition of kinetic energy into potential energy, then increases from 6 m/s to 8 m/s as the soil falls to the surface due to the transition of potential energy into kinetic energy. The angle of soil particles subsidence on the surface is about 73° to the horizon which favors extinguishing the edge of a forest ground fire.

Keywords: optical recognition; soil thrower; soil flow; flow density distribution cartogram; flow velocity cartogram

1. Введение

Проведение полевых экспериментальных исследований является неотъемлемой частью процесса разработки и исследования процессов функционирования сельскохозяйственных и лесных орудий [1—4]. Оцифровка данных экспериментальных исследований в последние годы претерпела ряд изменений, появление персональных компьютеров позволило вносить данные сразу в таблицы обработки и получать предварительные результаты ещё в «полях». Грунтометательная техника, применяемая для тушения и предупреждения лесных низовых пожаров, проходит ряд вычислительных и лабораторно-полевых экспериментов [5—9]. От момента отрыва фрезерным рабочим органом до момента встречи с кромкой лесного низового огня почвогрунт находится в воздушном пространстве в виде фрагментации и подвергается сопротивлению со стороны противодействующих сил. Значительный рост вычислительной мощности компьютеров, развитие процесса моделирования, а также совершенствование алгоритмов предоставило возможность повысить прогресс по применению компьютерного зрения и методов оптического измерения при проведении научных исследований [10]. Компьютерное зрение призвано решать задачи, связанные со сбором и анализом зрительной информации в различных областях производства, при этом частично или полностью заменяя человека [11]. В работе [12] отображены современные методы формирования структурных описаний изображений.

Для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтометательной техникой, целесообразно использовать современные методы оптического распознавания и оптических измерений [13]. Полученные в результате экспериментального исследования видеозаписи содержат детальную информацию о характере движения потоков почвогрунта: разрешение кадров 1920×1080 пикселей и более при частоте видеосъёмки 30 кадров/с.

Цель настоящей работы заключалась в определении характеристик движения потока почвогрунта в воздушной среде методами оптического распознавания и оптического измерения по видеоряду. Для достижения поставленной цели и задач исследования необходимо выявить наиболее эффективный метод оптического распознавания, позволяющий с высокой надёжностью отделить поток почвогрунта от фона и разработать математический аппарат, позволяющий по каждому кадру видеозаписи полевого эксперимента определить характеристики формируемого грунтометательной техникой потока почвогрунта.

2. Материалы и методы

Для реализации поставленной задачи нами был разработан и изготовлен лабораторный грунтомет. Вначале были проанализированы основные методы оптического распознавания по видеоряду для поиска наиболее эффективного метода отделения изображения потока почвогрунта от фоновых изображений (деревьев, веток, травы и т. д.).

Сложность оптического выделения потока почвогрунта обусловлена следующими

причинами: малая цветовая дисперсия изображения (изображение в оттенках серого), сложный для отделения фон, представляющий собой совокупность веток и стволов деревьев, движимых ветром, и существенно изменяющийся от кадра к кадру; также следует учитывать размытость потоков почвогрунта и области запыления и перемещение трактора «от нас», требующее коррекцию при межкадровом усреднении. В ходе проведения научных исследований нами были проверены методы:

- *разделение по цветам* — довольно эффективный метод, однако его недостатком является выделение красного канала, что влияет на плохое выделение тёмных частей изображения, которые представляют основную часть движущегося потока почвогрунта и отображаются на изображении практически чёрным цветом, без красноватого оттенка;

- *разделение по яркости* — поток почвогрунта на видеокадрах имеет преимущественно чёрный цвет, т. е. низкую яркость, но при этом также отделяется множество артефактов изображения фона, связанных с движением ветвей и стволов деревьев под действием ветра, однако яркостный метод сам по себе не позволяет выделить поток почвогрунта;

- *комбинация методов по цветам и по яркости* — выделение потока почвогрунта по красному каналу и по низкой яркости, определённую проблему составляет наличие изображений фона, однако их можно устранить путём усреднения видеокадров, дополнительным преимуществом данного метода является фильтрация областей запыления. Таким образом, комбинированный метод выделения потока почвогрунта по яркости и цветности является достаточно эффективным для последующего получения характеристик потока почвогрунта. Разделение на постоянный фон и меняющиеся фрагменты изображения;

- *определение изображения фона (предварительное или путём усреднения множества видеокадров) и отделение движущихся объектов на видеокадре от фона* — этот метод является одним из способов оптического распознавания и широко используется в техническом зрении. Нами была произведена проверка эффективности данного метода. Несмотря на то, что во многих технических системах данный метод является эффективным, для потока почвогрунта он показал низкую эффективность. Наибольшей проблемой является то, что поток почвогрунта имеет практически одно и то же изображение на серии видеокадров, и поиск отличия текущего кадра от основных не позволяет выделить ядро потока, в то же время есть возможность выделить флуктуации потока и его дискретную структуру. Данный метод оптического распознавания хорошо работает для отделения пешеходов или автомобилей от фона, отделения автомобильных знаков и т. п. [14], но его нецелесообразно использовать для отделения практически неподвижного и слабо меняющегося объекта. Таким образом, метод отделения потока почвогрунта от фона использовать нецелесообразно;

- *выделение размытых в движении участков кадров* — поток почвогрунта на видеокадрах является «размытым в движении». Поэтому будет верно проверить также метод выделения локальной размытости изображения. Однако данный метод показал низкую эффективность в выделении потока почвогрунта. Проблема заключается в том, что фоновое

изображение из-за низкой контрастности между отдельными ветвями деревьев и артефактов JPG-сжатия при передаче видеокамерой воспринимается как размытое, практически так же, как и поток почвогрунта. Поэтому данный метод выделения потока почвогрунта использовать нецелесообразно.

Подводя итог проверки различных методов отделения потока почвогрунта от фонового изображения, можно сделать вывод, что наилучшую надёжность отделения и лучшее пространственное разрешение имеет комбинированный цвето-яркостный метод. Данный метод и был использован в дальнейшем для получения характеристик движущегося в воздушном пространстве потока почвогрунта, подаваемого грунтометом.

3. Результаты

Так как видеофиксация потока почвогрунта проводилась из точки, расположенной довольно близко к потоку почвогрунта (не на бесконечном удалении), на изображениях происходит сферическое оптическое искажение, не позволяющее напрямую получить, например, картограмму распределения плотности потока в пространстве, поэтому необходимо провести коррекцию сферических оптических искажений.

Для коррекции сферического оптического искажения используется следующий математический аппарат. Будем считать схему объектива эквидистантной, которая при качественных оптических компонентах имеет только радиальную составляющую бочкообразной дисторсии. Коррекцию последней можно осуществить по формуле (1):

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{r}_p f(r_p) \mathbf{r}_s = r_p f(r_p). \quad (1)$$

Данная формула позволяет с помощью функции f пересчитать принадлежащие плоскости пиксели с координатами \mathbf{r}_p через принадлежащие полусфере пиксели с координатами \mathbf{r}_s (\mathbf{r} — векторная величина, поэтому выделена жирным шрифтом). Функция f задаётся следующим аналитическим выражением (2):

$$r_s = r_p f(r_p) \mathbf{r}_s = r_p f(r_p) \quad (2)$$

где R_0 — это радиус в пикселях, соответствующий углу 90° на исходном изображении относительно оси симметрии объектива.

С помощью указанной функции преобразования f проводилась предварительная коррекция сферического искажения анализируемых кадров. Таким образом, нами произведена проверка эффективности основных методов оптического распознавания потока почвогрунта по видеоряду, полученному в ходе полевого эксперимента грунтомета. Цвето-яркостное отделение потока почвогрунта оказалось наиболее надёжным для фона, представляющего собой ветви деревьев лесного массива, движимые ветром.

3.1. Методика определения характеристик потока почвогрунта по видеоряду

На этапе предварительного исследования, описанного в материалах и методах, было установлено, что цвето-яркостный способ отделения изображения потока почвогрунта от фона является наиболее эффективным для достижения поставленной цели.

3.2. Математический аппарат для выделения потока почвогрунта от фона

В данной работе использовались изображения (последовательные кадры видеозаписи) размером 1920×1980 пикселей в формате BMP. В формате BMP цвет каждого пикселя задаётся тремя числами — яркостью красного, зелёного, синего компонентов цвета. Часто этот формат называют RGB (Red, Green, Blue) с качеством передачи интенсивности по каждому каналу 1 байт/пиксель.

С математической точки зрения изображение представляет собой три матрицы яркости $I_{ij}^R, I_{ij}^G, I_{ij}^B$, где R, G, B — индекс цветового канала (красный, зелёный, синий соответственно), i и j — номера пикселя по горизонтали (слева направо) и вертикали (сверху вниз).

Метод цвето-яркостного отделения потока почвогрунта от фона позволяет получить матрицу I_{ij}^{tr} , элементы которой могут принимать два значения: «1», если в данной точке изображения находится поток почвогрунта, или «0», если в данной точке изображения находится фон, но не поток почвогрунта.

Цвето-яркостное отделение производилось по следующему условию:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (3)$$

где δ — константа запаса надёжности отделения красного цвета от зелёного и синего каналов (может использоваться другое число, подбираемое в процессе предварительной настройки; число 8 указано для диапазона яркости 0—255); I_{ij} и I_{ij}^0 — яркости пикселя ij , переведённые в градации серого для текущего изображения и калибровочного изображения без потока почвогрунта (кадр до начала метания потока почвогрунта).

При распознавании потока почвогрунта на виде «сзади» необходимо было учитывать постепенное удаление машины. Для этого производилась коррекция изображения на известное расстояние между задними указателями поворота трактора, которые имеют жёлтый цвет и хорошо выделяются на фотографиях. В ходе проведения коррекции производилось линейное преобразование:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (4)$$

где L и L_0 — расстояние между указателями поворота на текущем видеокадре и исходном видеокадре.

Поиск указателей поворота (сначала левого, затем правого) на изображениях производился автоматически программой на порядок 10^2 — 10^3 видеокадров, что потребовало

использования надёжного метода поиска. Поиск основан на методе Монте-Карло с сужением диапазонов. Необходимо найти координаты x_i, y_i центра указателя поворота ($i = 1—2$) в ортогональной системе координат, связанной с изображением. В дальнейшем для переменных будем использовать обозначение p_{ji} , где p — искомый параметр, j — номер параметра (1—2 — координата y), i — номер указателя поворота (фото 1).



Фото 1. Пример кадра из видеозаписи экспериментального исследования: *a* — кадр из видеозаписи; *б* — найденные задние указатели поворота трактора на жёлтом канале изображения

Photo 1. An example of a frame from a video recording of an experimental study: (a) a frame from a video recording; (b) found rear turn indicators of the tractor on the yellow channel of the image

Задача поиска сводится к оптимизационной задаче [15], [16], при этом критерием оптимизации K является количество пикселей жёлтого цвета в окне сканирования квадратной формы [17—26]. Необходимо так поместить квадратное окно сканирования размером 25×25 пикселей на изображение (найти координаты его центра x, y), чтобы было наибольшим количество жёлтых точек, попавших в окно сканирования:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (5)$$

где I^Y — интенсивность пикселя жёлтого канала изображения. В процессе поиска необходимо найти максимум критерия K .

Для поиска положения x, y указателя поворота на изображении 1920×1080 пикселей необходимо использовать метод численной оптимизации. Задача оптимизации осложнена дискретностью переменных x, y и большим количеством ложных локальных оптимумов (порядка $10^2—10^5$). Поэтому из большого количества методов численной оптимизации был выбран наиболее универсальный и надёжный метод Монте-Карло (МК), который требует значительных вычислительных ресурсов. Метод МК заключается в многократном случайном переборе параметров x, y и последующем выборе комбинации параметров, для которой критерий K принимает наибольшее значение. Для существенного ускорения сходимости

метода МК использована его модификация с регулярным сужением диапазонов. Таким образом, для оптимизации использован метод Монте-Карло с сужением диапазонов (МКСД). Кроме того, для поиска используется многократный «поиск с начала», чтобы снизить вероятность нахождения максимумов.

Общее количество шагов в методе МКСД составляло 40 000. На каждом шаге генерируется случайный набор переменных x , y с помощью предоставляемого системой программирования генератора случайных чисел с равномерным законом распределения вероятности:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (6)$$

где G_{11} и G_{12} — границы диапазона поиска переменной x (границы изображения 0 и 1920 пикселей соответственно); G_{21} и G_{22} — границы диапазона поиска переменной y (границы изображения 0 и 1980 пикселей соответственно); i — номер итерации; F_k — последовательные реализации случайной величины, распределённой равномерно в диапазоне 0—1 [27—31]; k — номер реализации случайной величины F .

Для каждого случайного набора x , y рассчитывается критерий оптимизации K по формуле (7). Если критерий K оказывается больше найденного ранее хорошего значения K_b (индекс «b» — от английского слова *best* — лучший), т. е. $K > K_b$, производится запоминание текущего набора переменных x , y как наилучшего: $x_b = x$, $y_b = y$.

Таким образом, при поиске указателей поворота решается следующая задача оптимизации:

$$r_s = r_p f(r_p) r_s = r_p f(r_p) \quad (7)$$

где $x_i^{\text{опт}}$, $y_i^{\text{опт}}$ — координаты расположения квадратного окна, лучше всего охватывающего указатель поворота.

3.3. Определение характеристик потока почвогрунта

Для определения характеристик потока почвогрунта производилось предварительное усреднение картограмм распределения потока почвогрунта по множеству кадров (около 600, что соответствует 20 с эксперимента со скоростью съёмки 30 кадров в секунду). По усреднённой картограмме, представляющей собой матрицу размером 400×400 элементов, рассчитывались приведённые ниже характеристики потока почвогрунта.

3.4. Программа для определения характеристик потока почвогрунта

Для автоматизированного анализа кадров видеозаписей экспериментального полевого исследования была разработана компьютерная программа [32].

«Программа для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтомётом, на основе оптического распознавания» (фото 2) позволила получить картограмму распределения плотности потока почвогрунта и определить по ней различные

характеристики его потока.

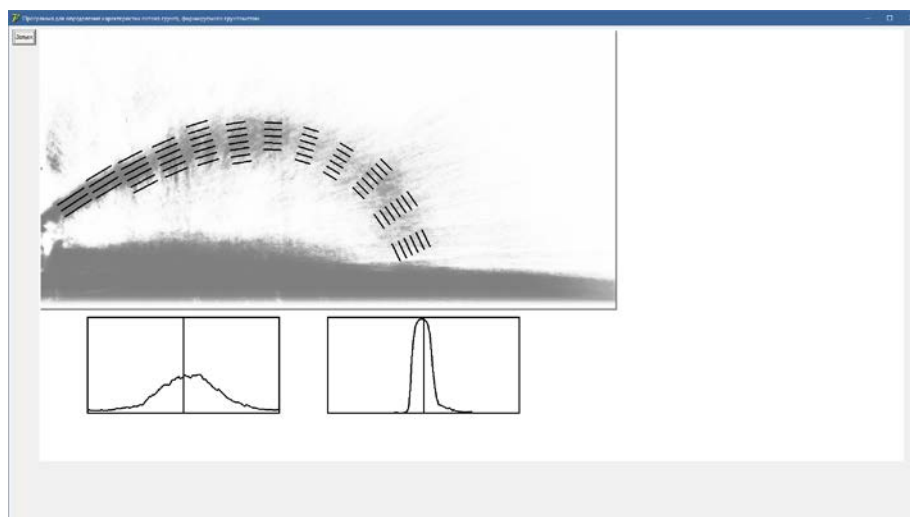


Фото 2. Интерфейсная форма «Программы для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтомётом, на основе оптического распознавания»

Photo 2. Interface form of the «Program for determining the characteristics of the soil flow formed by a soil thrower based on optical recognition»

Программа разработана на языке Object Pascal среды Borland Delphi 7 для операционной системы Windows 10 и предназначена для оптического распознавания и определения характеристик потока почвогрунта, формируемого лесопожарным грунтомётом, на видеокадрах полевого экспериментального исследования. В тексте программы может быть выбран один из методов отделения изображения потока почвогрунта от фонового изображения. Программа применима для видеоклипов верхнего и продольного ракурсов съёмки грунтомёта.

3.5. Характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтомётом

Полученные в экспериментальном исследовании видеозаписи позволяют определить множество характеристик движущегося потока почвогрунта. Основными из них являются картограммы и эпюры распределения плотности потока, абсолютного значения и направления скорости потока, полученные для ракурсов «сзади» и «сверху».

3.6. Картограмма распределения в вертикальной поперечной плоскости плотности потока почвогрунта

По итогам проведения полевых испытаний грунтомёта получена картограмма распределения плотности потока почвогрунта (фото 3).

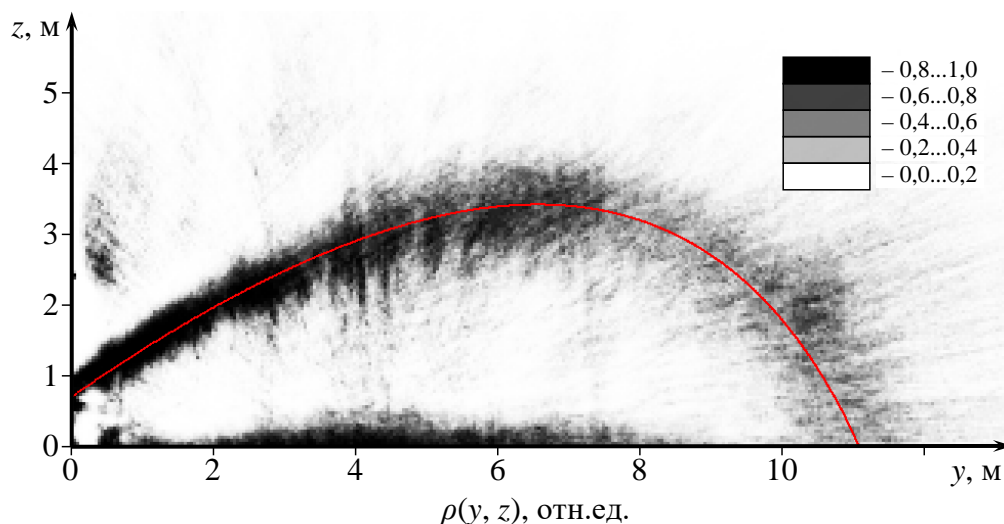


Фото 3. Картограмма распределения плотности ρ потока почвогрунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

Photo 3. Cartogram of the distribution of soil flow density ρ in the vertical transverse plane YZ

Картограмма получена усреднением 600 кадров (20 с работы грунтометра со скоростью съёмки 30 кадров в секунду). В результате обработки получилась достаточно качественная картограмма с практически отсутствующими артефактами от деревьев и ветвей фона изображения.

Необходимо отметить, что усреднённый поток почвогрунта является довольно узким и направленным в требуемом направлении, несмотря на то, что картограмма усреднена по длительному времени работы (20 с движения грунтометра в ходе проведения эксперимента). При этом визуальный анализ отдельных кадров показывает, что поток существенно варьировался: от выброса на малое расстояние около 4 м при неблагоприятных условиях захвата почвогрунта до выброса на предельное расстояние около 15 м. Узость усреднённого потока свидетельствует о том, что большую часть времени (порядка 80 %) формируется узкий управляемый поток и лишь 20 % времени флуктуации почвогрунта приводят к нарушению потока.

Произведена аппроксимация траектории движения потока почвогрунта (красная линия на фото 3) баллистической линией, полученной в результате решения уравнения движения тела, брошенного под углом к горизонту и испытывающего действие силы тяжести и сопротивления воздуха. Исходя из параметров решения баллистической задачи грунтометр подаёт поток почвогрунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с. Дальность метания почвогрунта составляет 11 м. По мере удаления от грунтометра снижается плотность потока почвогрунта.

3.7. Картограмма распределения в вертикальной поперечной плоскости абсолютного значения скорости частиц почвогрунта

На основе анализа перемещения похожих фрагментов изображения потока почвогрунта от кадра к кадру построена картограмма распределения абсолютного значения скорости частиц почвогрунта (фото 4).

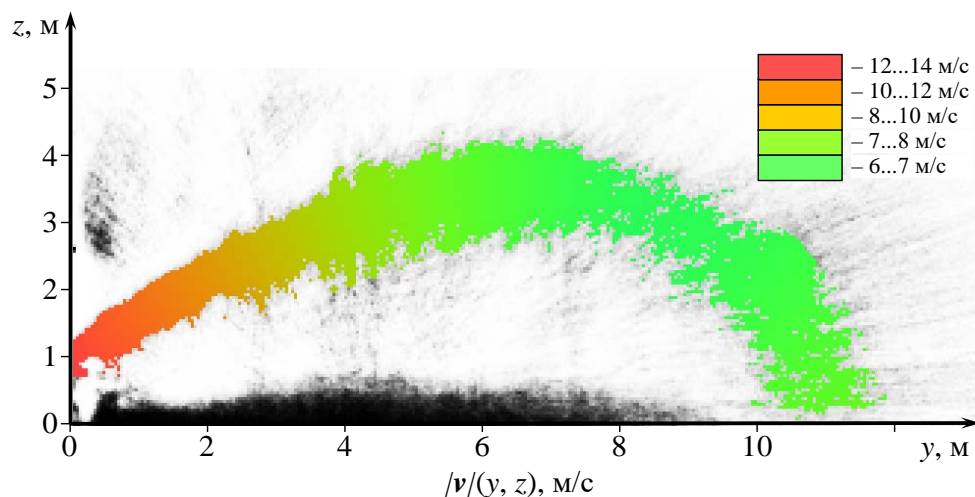


Фото 4. Картограмма распределения абсолютного значения скорости $|v|$ потока почвогрунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

Photo 4. Cartogram of the distribution of the absolute value of the soil flow speed $|v|$ in the vertical transverse plane YZ

По мере движения потока почвогрунта скорость сначала снижается с 14 до 6 м/с из-за полёта почвогрунта вверх и перехода кинетической энергии в потенциальную, затем увеличивается с 6 до 8 м/с по мере падения почвогрунта на поверхность за счёт перехода потенциальной энергии в кинетическую.

3.8. Картограмма распределения в вертикальной поперечной плоскости вектора скорости частиц почвогрунта

Тем же методом анализа движения фрагментов изображения получена картограмма распределения направления вектора скорости частиц почвогрунта (фото 5). Данная картограмма позволила определить угол оседания частиц почвогрунта на поверхность: он составляет около 73° к горизонту. При выбросе поток почвогрунта движется почти по горизонтальной траектории, а при достижении поверхности почвогрунт оседает ближе к вертикальной траектории, что благоприятствует тушению пожара.

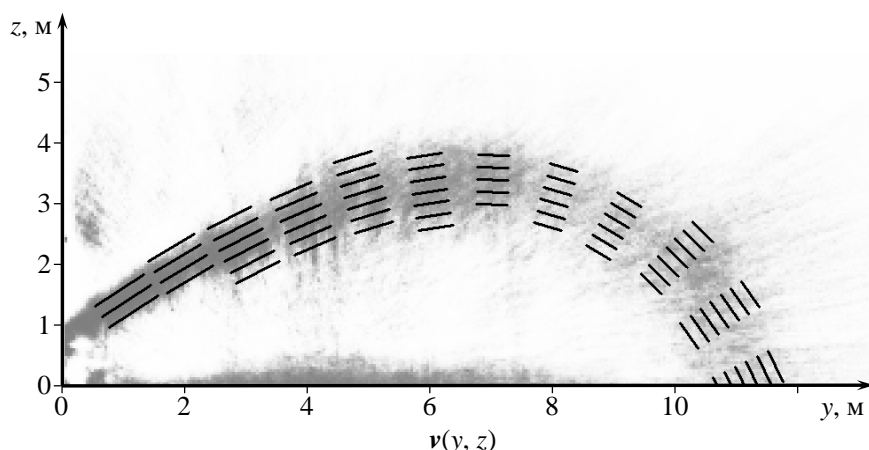


Фото 5. Картограмма распределения вектора скорости v частиц почвогрунта в вертикальной поперечной плоскости YZ

Photo 5. Cartogram of the distribution of the velocity vector v of soil particles in the vertical transverse plane YZ

3.9. Эюра углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) плотности метания почвогрунта

По картограмме распределения плотности потока почвогрунта построена эюра углового распределения плотности метания почвогрунта в начальной части траектории (рисунок 1).

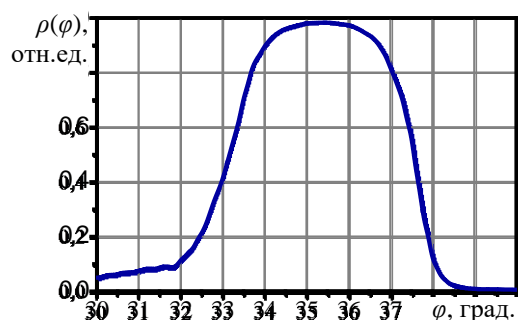


Рисунок 1. Эюра углового распределения плотности метания почвогрунта

Figure 1. Diagram of the angular distribution of the throwing soil density

Эюра имеет не гауссову форму, а практически прямоугольную форму, что свидетельствует о хорошей фокусировке потока почвогрунта. Грунтомёт позволяет сформировать узкий поток с малым угловым разбросом 5° (от 33° до 38° на эюре).

3.10. Эюра углового распределения (в вертикальной поперечной плоскости) скорости метания почвогрунта

На основе картограммы распределения скорости частиц почвогрунта построена эпюра распределения скорости частиц почвогрунта в начальной части траектории (рисунок 2).

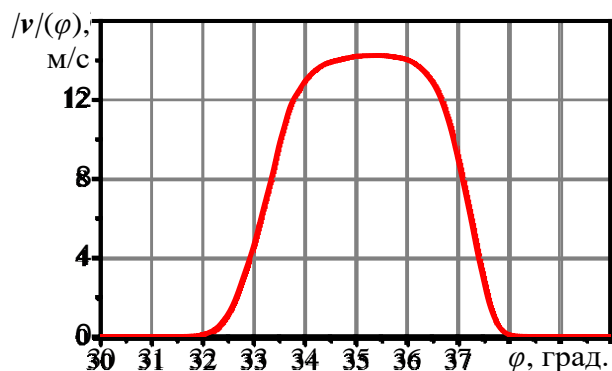


Рисунок 2. Эпюра углового распределения скорости частиц почвогрунта

Figure 2. Diagram of the angular distribution of the soil particles velocity

Эпюра имеет выраженную прямоугольную форму (не гауссову); в угловом диапазоне $34,3—36,5^\circ$ скорость частиц составляет одну и ту же величину — 14. Эпюра несимметрична: больший разброс по скоростям имеет нижний фронт эпюры: это обусловлено оседанием мелких частиц (пыли) под основным потоком почвогрунта.

3.11. Эпюра распределения плотности оседания почвогрунта на поверхности

Для оценки кучности осаждения почвогрунта в месте тушения пожара построена эпюра распределения плотности потока почвогрунта перед осаждением на поверхность. Для этого картограмма распределения плотности потока почвогрунта усреднена по высоте 1 м над поверхностью (рисунок 3).

Как видно из эпюры, основная масса почвогрунта (около 60 %) оседает в полосе шириной 1,0 м (от $-0,4$ до $0,6$ м), а из остальной массы почвогрунта около 30 % оседают в полосе шириной 2,0 м (от $-0,8$ до $1,2$ м). Таким образом, грунтомёт формирует достаточно узкую полосу, что способствует тушению пожара.

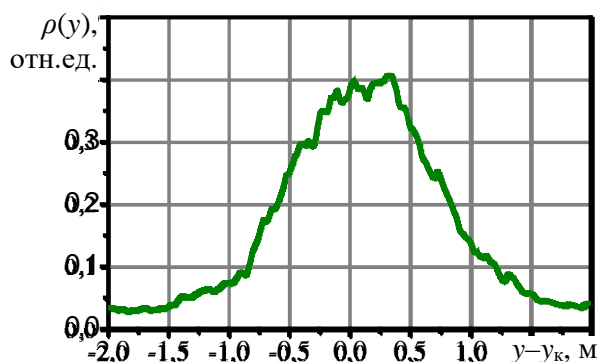


Рисунок 3. Эпюра распределения плотности потока почвогрунта перед осаждением на поверхность

Figure 3. Diagram of the distribution of soil flow density before its deposition on the surface

3.12. Характер движения потока почвогрунта в горизонтальной плоскости

Аналогичным образом получены характеристики потока почвогрунта в горизонтальной плоскости. На видеокадрах (фото 6) цвето-яркостным способом выделялся поток почвогрунта (фото 7).



Фото 6. Исходное изображение потока почвогрунта сверху, полученное с видеокамеры беспилотного воздушного судна

Photo 6. The original image of the flow of soil from above, obtained from the unmanned aerial vehicle video camera

По картограмме распределения плотности потока почвогрунта (фото 8) определено, что угол отклонения потока почвогрунта от поперечного направления составляет $15,4^\circ$.

Дисперсия (разброс по углам метания) потока в горизонтальной плоскости примерно на 20 % выше, чем в вертикальной плоскости, но в целом достаточно мала ($6—7^\circ$).



Фото 7. При увеличении цветовой насыщенности видеокadra поток почвогрунта может быть отделён от фона по цвето-яркостному принципу

Photo 7. Increasing color saturation of the video frame allows the soil flow to be separated from the background according to the color-brightness principle

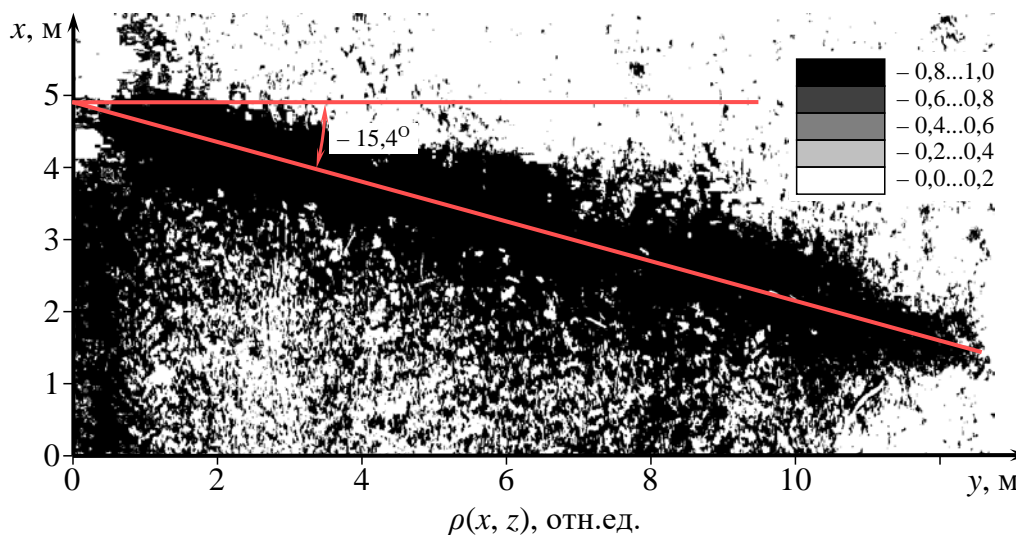


Фото 8. Картограмма распределения плотности ρ потока почвогрунта в горизонтальной плоскости XY (вид сверху)

Photo 8. Cartogram of the distribution of soil flow density ρ in the horizontal plane XY (top view)

Таким образом, с помощью изложенного выше математического аппарата и программной реализации получены характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтометом: картограммы и эпюры распределения плотности и скорости потока в вертикальной поперечной и горизонтальной плоскостях. Результаты обработки экспериментальных

видеозаписей подтверждают, что грунтомет имеет достаточно высокую дальность метания почвогрунта (10—20 м) и высокую кучность его осадения (2—4 м).

4. Обсуждение и заключение

Произведён анализ эффективности пяти методов оптического распознавания потока почвогрунта на видеоряде, полученном в ходе полевых исследований. Цвето-яркостное отделение потока почвогрунта оказалось наиболее надёжным для фона, представляющего собой ветви деревьев лесного массива, движимые ветром. Разработаны методика и компьютерная программа для цвето-яркостного отделения потока почвогрунта, формируемого грунтометом, от фона на кадрах видеоряда и определения характеристик потока почвогрунта. При помощи разработанного математического аппарата и программы реализации получены характеристики потока почвогрунта, формируемого грунтометом: картограммы и эпюры распределения плотности и скорости потока в вертикальной поперечной и горизонтальной плоскостях.

Результаты обработки экспериментальных видеозаписей подтверждают, что грунтомет обладает достаточно высокими дальностью метания почвогрунта (10—20 м) и кучностью его осадения (2—4 м). Исходя из формы траектории движения потока почвогрунта установлено, что грунтомет подаёт поток почвогрунта под углом 35° к горизонту с начальной скоростью 14 м/с; дальность метания почвогрунта составляет 11 м. По мере движения потока почвогрунта скорость сначала снижается с 14 до 6 м/с из-за полёта почвогрунта вверх и перехода кинетической энергии в потенциальную, затем увеличивается с 6 до 8 м/с по мере падения почвогрунта на поверхность за счёт перехода потенциальной энергии в кинетическую. Угол оседания частиц почвогрунта на поверхность составляет около 73° к горизонту. Несмотря на то, что при выбросе поток почвогрунта движется, скорее, горизонтально, чем вертикально, при достижении поверхности почвогрунт оседает, вероятнее всего, вертикально, чем горизонтально, что благоприятствует тушению кромки лесного низового пожара.

Эпюра углового распределения плотности потока почвогрунта имеет не гауссову форму, а практически прямоугольную форму, что свидетельствует о хорошей фокусировке потока почвогрунта. Грунтомет позволяет сформировать узкий поток с малым угловым разбросом — 5° . На начальной части траектории в угловом диапазоне $34,3\text{—}36,5^\circ$ скорость частиц почвогрунта составляет одну и ту же величину — 14 м/с, что свидетельствует о хорошей фокусировке потока.

Большой разброс по скоростям наблюдается в нижней части потока, что обусловлено оседанием мелких частиц (пыли) под основным потоком почвогрунта. Основная масса почвогрунта (около 60 %) оседает в полосе шириной 1,0 м (от $-0,4$ до $0,6$ м), а из остальной массы почвогрунта около 30 % — в полосе шириной 2,0 м (от $-0,8$ до $1,2$ м). Таким образом, грунтомет формирует достаточно узкую полосу, что способствует тушению кромки лесного низового пожара. Поток почвогрунта отклонён назад на $15,4^\circ$

от перпендикулярного к траектории трактора направления. Грунтомет формирует достаточно узкий поток почвогрунта не только в вертикальной, но и в горизонтальной плоскости (угловой разброс не превышает 7°).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-60041.

Список литературы

1. *Lysych M. N., Shabanov M. L., Bukhtoyarov L. D.* Research of process overcoming obstacles by tillage tools // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the Forestry Complex (Forestry-2018)», Voronezh, 04—05 октября 2018 года. Voronezh: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012045.
2. *Shanin I. I., Shtondin A. A., Lysych M. N.* Improvement of automation process of forest resources renewal using innovative landing material // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 12—14 декабря 2018 года. Novosibirsk: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012091. DOI: 10.1088/1757-899X/560/1/012091.
3. *Драпалюк М. В., Коротких В. Н.* Определение энергетических показателей лесного дискового плуга в лабораторных условиях // Лесотехнический журнал. 2011. № 1 (1). С. 21—28.
4. *Драпалюк М. В.* Математическое моделирование рабочего процесса рычажного корчевателя // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 75. С. 156—165.
5. Комбинированный лесопожарный грунтомет и рекомендации по его применению / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, П. Э. Гончаров [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 84. С. 174—184.
6. *Беляев Д. А., Федорченко И. С.* Малогабаритный переносной грунтомет // Экология. Риск. Безопасность. 2020. С. 332—333.
7. *Есков Д. В., Внуков Е. В., Ескова В. С.* Фрезерный грунтомет для борьбы с природными пожарами на землях сельскохозяйственного назначения и высокозадернелых пастбищах // Аграрная наука — сельскому хозяйству. 2019. С. 32—34.
8. Перспективные направления совершенствования рабочих органов пожарных грунтометов / Д. В. Есков [и др.] // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2, № 2-2. С. 214—219.
9. Simulation modeling of the soil flow movement process in the air, supplied by a ground gun while extinguishing a forest fire / М. А. Gnusov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 1001, no. 1. P. 012057.
10. *Горячкин Б. С., Китов М. А.* Компьютерное зрение // E-Scio. 2020. № 9 (48). С. 317—345.
11. *Манюкова Н. В.* Компьютерное зрение как средство извлечения информации из видеоряда // Математические структуры и моделирование. 2015. № 4 (36). С. 123—128.
12. *Гороховатский В. А.* Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении. Харьков: Компания СМИТ, 2014.
13. Выделение границ на изображениях на основе модели энергетических признаков вейвлет-преобразования / М. П. Шлеймович [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 21. С. 103—107.

14. Манюкова Н. В. Компьютерное зрение как средство извлечения информации из видеоряда // Математические структуры и моделирование. 2015. №. 4 (36). С. 123—128.
15. Форсайт Д. А., Понс Д. Компьютерное зрение. Современный подход Computer Vision: A Modern Approach. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
16. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. СПб.: Питер, 2018. 400 с.
17. Траск Э. Грожаем глубокое обучение. СПб.: Питер, 2019. 352 с.
18. Николенко С., Кадурын А., Архангельская Е. Глубокое обучение. СПб.: Питер, 2020. 480 с.
19. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение Computer Vision. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
20. Bishop Ch. M. Pattern recognition and machine learning. New York: Springer, 2006. 738 p.
21. Потапов А. С. Распознавание образов и машинное восприятие. СПб.: Политехника, 2007. 548 с.
22. Фомин Я. А. Распознавание образов: теория и применения. 2-е изд. М.: ФАЗИС, 2012. 429 с.
23. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. 4-е изд. М.: Высш. шк., 2004. 262 с.
24. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
25. Адамов В. Е., Вергилес Э. В. Статистика промышленности: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2005. 326 с.
26. Орлов А. И. Прикладная статистика. М.: Экзамен, 2006. 671 с.
27. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. М.: Финансы и статистика, 2003. 415 с.
28. Дуброва Т. А. Статистические методы прогнозирования. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 133 с.
29. Новиков А. С., Фокин А. Г., Чубукина Т. С. Оптимизация распознавания объекта на изображении методом адаптивного движения сканирующего окна // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 9. С. 203—209.
30. Головки А. В. Модели и методы обработки и передачи цифровой фото- и видеоинформации для принятия решений в автоматизированных информационных системах: спец. 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: Дис. ... канд. техн. наук. Николаев, 2012. 141 с.
31. Теория распознавания образов // Википедия (wikipedia.org). URL: <https://ru.wikipedia.org/> (дата обращения: 18.05.2022). Текст: электронный.
32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617714 РФ. Программа для определения характеристик потока почвогрунта, формируемого грунтомётом-полосопрокладывателем, на основе оптического распознавания: № 2022617207: заявл. 25.04.2022: опубл. 25.04.2022 / М. В. Драпалюк, Д. Ю. Дручинин, М. А. Гнусов, В. В. Посметьев; заявитель: Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова».

References

1. Lysych M. N., Shabanov M. L., Bukhtoyarov L. D. Research of process overcoming obstacles by tillage tools. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Jubilee Scientific and Practical Conference «Innovative Directions of Development of the*

- Forestry Complex (Forestry-2018)», Voronezh, 04—05 октября 2018 года. Voronezh, Institute of Physics Publishing, 2019, pp. 012045. doi: 10.1088/1755-1315/226/1/012045. (In Russ.)*
2. Shanin I. I., Shtondin A. A., Lysych M. N. Improvement of automation process of forest resources renewal using innovative landing material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Novosibirsk, 12—14 декабря 2018 года. Novosibirsk, Institute of Physics Publishing, 2019, pp. 012091. doi: 10.1088/1757-899X/560/1/012091. (In Russ.)*
 3. Drapalyuk M. V., Korotkikh V. N. Determination of the energy performance of a forest disc plow in laboratory conditions. *Forestry journal*, 2011, no. 1 (1), pp. 21—28. (In Russ.)
 4. Drapalyuk M. V. Mathematical modeling of the working process of a lever puller. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 75, pp. 156—165. (In Russ.)
 5. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Goncharov P. E. [et al.]. Combined forest fire soil thrower and recommendations for its use. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2012, no. 84, pp. 174—184. (In Russ.)
 6. Belyaev D. A., Fedorchenko I. S. Small portable ground thrower. *Ecologia. Risk. Security*, 2020, pp. 332—333. (In Russ.)
 7. Eskov D. V., Vnukov E. V., Eskova V. S. A milling ground thrower for fighting natural fires on agricultural lands and high-grass pastures. *Agrarian Science — agriculture*, 2019, pp. 32—34. (In Russ.)
 8. Eskov D. V. [et al.]. Perspective directions for improving the working bodies of fire ground throwers. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 2-2, pp. 214—219. (In Russ.)
 9. Gnusov M. A. [et al.]. Simulation modeling of the soil flow movement process in the air, supplied by a ground gun while extinguishing a forest fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing*, 2020, vol. 1001, no. 1, pp. 012057.
 10. Goryachkin B. S., Kitov M. A. Computer vision. *E-Scio*, 2020, no. 9 (48), pp. 317—345. (In Russ.)
 11. Manyukova N. V. Computer vision as a means of extracting information from a video sequence. *Mathematical Structures and Modeling*, 2015, no. 4 (36), pp. 123—128. (In Russ.)
 12. Gorokhovatsky V. A. *Structural analysis and intelligent data processing in computer vision. Kharkov, SMITH Company*, 2014. (In Russ.)
 13. Shleimovich M. P. [et al.]. Edge detection in images based on the model of energy features of the wavelet transform. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2017, vol. 20, no. (21), pp. 103—107.
 14. Manyukova N. V. Computer vision as a means of extracting information from a video sequence. *Mathematical Structures and Modeling*, 2015, no. 4 (36), pp. 123—128. (In Russ.)
 15. Forsyth D. A., Pons J. *Computer vision. Modern Approach Computer Vision: A Modern Approach. Moscow, Williams*, 2004. 928 p. (In Russ.)
 16. Chollet F. *Deep Learning with Python. St. Petersburg, Piter*, 2018. 400 p. (In Russ.)
 17. Trask E. *Grokay deep learning. St. Petersburg, Piter*, 2019. 352 p. (In Russ.)
 18. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep learning. St. Petersburg, Peter*, 2020. 480 p. (In Russ.)
 19. Shapiro L., Stockman J. *Computer Vision. Moscow, Binom, Knowledge Laboratory*, 2006. 752 p. (In Russ.)
 20. Bishop Ch. M. *Pattern recognition and machine learning. New York, Springer*, 2006. 738 p.
 21. Potapov A. S. *Pattern recognition and machine perception. St. Petersburg, Polytechnic*, 2007. 548 p. (In Russ.)
 22. Fomin Ya. A. *Pattern recognition: theory and applications. 2nd ed. Moscow, FAZIS*, 2012.

- 429 p. (In Russ.)
23. Gorelik A. L., Skripkin V. A. *Recognition methods*. 4th ed. Moscow, Higher school, 2004. 262 p. (In Russ.)
 24. Osovsky S. *Neural networks for information processing*. Moscow, Finance and statistics, 2004. 344 p. (In Russ.)
 25. Adamov V. E., Vergiles E. V. *Industry Statistics: Proc. Settlement*. Moscow, Finance and statistics, 2005. 326 p. (In Russ.)
 26. Orlov A. I. *Applied statistics*. Moscow, Exam, 2006. 671 p. (In Russ.)
 27. Lukashin Yu. P. *Adaptive methods of short-term forecasting of time series*. Moscow, Finance and statistics, 2003. 415 p. (In Russ.)
 28. Dubrova T. A. *Statistical forecasting methods*. Moscow, UNITI-DANA, 2003. 133 p. (In Russ.)
 29. Novikov A. S., Fokin A. G., Chubukina T. S. Optimization of object recognition in the image by the method of adaptive movement of the scanning window. *Izvestiya Tula State University. Technical science*, 2015, no. 9, pp. 203—209. (In Russ.)
 30. Golovko A. V. *Models and methods of processing and transmission of digital photo and video information for decision-making in automated information systems: specialty 05.13.06 «Automation and control of technological processes and industries (by industry)»: Dissertation for the degree of candidate technical sciences*. Nikolaev, 2012. 141 p. (In Russ.)
 31. Theory of pattern recognition. Wikipedia ([wikipedia.org](https://ru.wikipedia.org/)). Available at: <https://ru.wikipedia.org/> (accessed: 18.05.2022). Text. Image: electronic. (In Russ.)
 32. Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu., Gnusov M. A., Posmetiev V. V. Certificate of state registration of the computer program No. 2022617714 RF. A program for determining the characteristics of the flow of soil, formed by a soil thrower-strip-laying machine, based on optical recognition: No. 2022617207: Appl. 04/25/2022: publ. April 25, 2022; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Voronezh State Forest Engineering University named after G. F. Morozov». (In Russ.)

© Гнусов М. А., Драпалюк М. В., Попиков П. И., Дручинин Д. Ю., Бухтояров Л. Д.,
Ступников Д. С., 2022