

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.331:338.312:631.111

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-33-41>

## Влияние конфигурации и топографических особенностей поля фермы Целот (Эритрея) на производительность посевного агрегата

*А.Г. Левшин<sup>1</sup>, Т.А. Медхн<sup>2</sup>, И.Н. Гаспарян<sup>3</sup>, С.Г. Теклай<sup>4</sup>*<sup>1,2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; г. Москва, Россия<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; г. Санкт-Петербург, Россия<sup>1</sup> [aevshin@rgau-msha.ru](mailto:aevshin@rgau-msha.ru); <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448><sup>2</sup> [noahtesas@gmail.com](mailto:noahtesas@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-4371-1323><sup>3</sup> [irina150170@yandex.ru](mailto:irina150170@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654><sup>4</sup> [gtsimon1994@gmail.com](mailto:gtsimon1994@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

**Аннотация.** Оптимальный выбор энергетического средства и подходящего комплекса технологического оборудования затруднен в связи с многообразием производственных условий (размер и конфигурация полей, энергоёмкость технологического процесса, засоренность камнями, наличие препятствий и разворотной полосы) и специфичностью природно-климатических факторов. С целью оценки влияния топографических особенностей полей фермы Целот (Эритрея) на производительность посевного агрегата, включающего в себя пневматическую сеялку Nardi Dora (DORA 600) и трактор New Holland T6090, проведено исследование 23 участков площадью около 107 га. Изучалось изменение показателя эффективности посевного агрегата в зависимости от размера и показателей формы участка (площадь, выпуклость, отношение периметра к площади, индекс компактности, индекс квадратного периметра, прямоугольность и шероховатость профиля поверхности поля). Площадь поля определялась с помощью ArcGIS10.7.1, пространственная информация о рельефе – с использованием Locus GIS offline land survey. Полученные данные обрабатывались в приложении Google Earth Pro и ArcGIS. Взаимосвязь индексов изучалась с помощью многомерного регрессионного анализа. Для выяснения влияния индексов размера и формы поля на производительность посевного агрегата проведено двумерное исследование параметров, реагирующих на эти индексы. Эксперимент показал варьирование коэффициента эффективности использования времени смены от 30,1 до 65,7% при низких и переменных показателях использования времени смены. Топографические особенности поля существенно влияют на коэффициент эффективности использования времени в полевых условиях. При проектировании полей рекомендовано учитывать топографические особенности, создавать подходящие полосы поворота для маневрирования, устранять препятствия в пределах рабочей зоны.

**Ключевые слова:** производительность посевного агрегата, коэффициент эффективности использования времени, топографические особенности, площадь поля, ArcGIS, рельеф

**Для цитирования:** Левшин А.Г., Медхн Т.А., Гаспарян И.Н., Теклай С.Г. Влияние конфигурации и топографических особенностей поля фермы Целот (Эритрея) на производительность посевного агрегата // *Агроинженерия*. 2024. Т. 26, № 2. С. 33-41. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-33-41>

ORIGINAL PAPER

## Effect of field configuration and topographical features on the performance of the seeding unit of the Tselot farm (Eritrea)

*A.G. Levshin<sup>1</sup>, T.A. Medhn<sup>2</sup>, I.N. Gasparyan<sup>3</sup>, S.G. Teklay<sup>4</sup>*<sup>1,2</sup> Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; Moscow, Russia<sup>3</sup> All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry; D.N. Pryanishnikov; Moscow, Russia<sup>4</sup> St. Petersburg State Agrarian University; St. Petersburg, Russia<sup>1</sup> [aevshin@rgau-msha.ru](mailto:aevshin@rgau-msha.ru); <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448><sup>2</sup> [noahtesas@gmail.com](mailto:noahtesas@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-4371-1323><sup>3</sup> [irina150170@yandex.ru](mailto:irina150170@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654><sup>4</sup> [gtsimon1994@gmail.com](mailto:gtsimon1994@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

**Abstract.** It is difficult to choose an optimal energy means and a suitable set of technological equipment due to the diversity of production conditions (size and configuration of fields, energy intensity of technological

process, presence of stones, obstacles and a headland) and specific natural and climatic factors. In order to assess the influence of topographical features of the fields of the Celot farm (Eretria) on the performance of a seeding unit, including a pneumatic seeder Nardi Dora (DORA 600) and a tractor New Holland T6090, the authors studied 23 plots of about 107 ha. They analyzed variations of the seeding unit efficiency index depending on the size and shape indices of the plot (area, convexity, perimeter-to-area ratio, compactness index, square perimeter index, rectangularity and roughness of the field surface profile). Field area was determined with ArcGIS10.7.1, Locus GIS offline land survey was used to obtain spatial information. The obtained data were exported to the Google Earth Pro and ArcGIS software for further processing. The relationship between indices was studied using the multivariate regression analysis. A bivariate study of parameters responding to these indices was carried out to find out the effect of field size and shape indices on the seeding unit performance. The conducted experiment showed variation in the shift time efficiency ratio from 30.1 to 65.7% for low and variable shift time indices. Topographical features of the field significantly affect the field time efficiency factor. When designing fields it is recommended to take into account topographical features to provide suitable turn lanes for maneuvering and eliminate obstacles within the working area.

**Keywords:** seeding unit productivity, time efficiency factor, topographic features, field area, ArcGIS, field relief

**For citation:** Levshin A.G., Medhn T.A., Gasparyan I.N., Teklay S.G. Effect of field configuration and topographical features on the performance of the seeding unit of the Tselot farm (Eritrea). *Agricultural Engineering (Moscow)*, 2024;26(2): 33-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-2-33-41>

### Введение

Механизация сельскохозяйственного производства способствует увеличению производства сельскохозяйственной продукции за счет повышения производительности, своевременности и качественного выполнения технологических операций, что приводит к росту урожайности [1]. Кроме того, снижается пиковая потребность в рабочей силе и минимизируются тяжелые ручные работы [2]. Производительность сельского хозяйства и уровень механизации имеют положительную взаимосвязь [3, 4].

Эффективность сельскохозяйственного производства и производительность труда зависят от эффективного использования сельскохозяйственной техники. С учетом многообразия производственных условий (размеры и конфигурация полей, энергоёмкость технологического процесса, засоренность камнями, наличие препятствий) и специфических природно-климатических факторов затрудняется оптимальный выбор энергетического средства и подходящего комплекса технологического оборудования. Соответствие конкретным производственным условиям параметров и режимов работы оборудования с точки зрения производительности и эффективного использования рабочего времени [2] имеет прямое отношение к качественному выполнению технологических операций.

В общем случае производительность – это объем работы, выполняемый машинно-тракторным агрегатом (МТА) за единицу времени (га/ч или т/ч – для транспортных работ) с заданным качеством [2, 5-7]. Элементарный объем работы за определенный

промежуток времени  $T_p$  равен произведению конструкционной ширины захвата  $B_k$  на пройденный путь  $S_p$ , и тогда потенциальная производительность агрегата  $W_o$  будет составлять<sup>1</sup>

$$W_o = (B_k \cdot S_p) / T_p. \quad (1)$$

Конструкционная ширина захвата зависит от тягового усилия, создаваемого трактором на конкретном агрофоне, и удельной энергоёмкости технологического процесса<sup>2</sup>. Пройденный путь зависит от рабочей скорости  $v_p$  и длины гона  $L_p$ . Для обработки всей площади заданного поля агрегат в конце гона необходимо развернуться за время  $t_{пов}$  и в зависимости от выбранного способа движения двигаться в обратном направлении. При этом образуется стыковая граница, и в зависимости от вида операции рабочая ширина захвата будет больше или несколько меньше конструкционной:

$$B_p = \beta \cdot B_k,$$

где  $\beta$  – коэффициент использования ширины захвата ( $\beta = 0,94 \dots 1,16$ )<sup>3</sup>.

Для эффективного использования рабочего времени ширина поля должна быть кратной рабочей ширине захвата, а рабочая длина гона должна быть наибольшей. В условиях ограниченного размера полей и их сложной геометрии возникают холостые переезды (развороты, заезды на обработку клиньев). Кроме того, в течение рабочей смены возникает

<sup>1</sup> Сергеева З.В., Химченко Г.Т. Справочник нормировщика. М.: Россельхозиздат, 1983. 367 с.

<sup>2</sup> Там же.

<sup>3</sup> Там же

необходимость ежесменного технического обслуживания агрегата, технологического обслуживания, устранения технологических отказов, регулировки и контроля качества работы, перевода машины в рабочее и транспортное положение, агрегатирования сельскохозяйственной машины с энергосредством, отдыха, переезда к месту работы и обратно в начале и в конце смены, переезда с поля на поле<sup>4</sup>.

Рабочее время  $T_p$  представляет собой сумму времени рабочих ходов. Долю рабочего времени в продолжительности времени смены оценивают коэффициентом использования рабочего времени смены  $\tau_{см} = \frac{T_p}{T_{см}}$ , и тогда производительность за 1 ч сменного времени с учетом размерного коэффициента будет составлять<sup>5</sup>

$$W_{см} = 0,36 \cdot V_p \cdot v_p \cdot \tau_{см} \quad (2)$$

Эффективная эксплуатация агрегата данного размера зависит от оптимального использования рабочего времени. Чтобы максимально увеличить время, затрачиваемое на эффективную работу, время простоя должно быть сведено к минимуму [8]. На нерабочее время, время холостого хода и остановки в пути [9] влияет множество факторов: например, размер и форма участков (полей) [7, 10-12]; топографические особенности, неровности [13] и препятствия [14]; состояние оператора машины (психическое и физическое); обслуживающий и технический персонал; другие дополнительные факторы.

Частота поворотов на длинном поле меньше по сравнению с более короткими полями той же площади [2, 9]. Поля сложной конфигурации имеют более высокую частоту поворота и изменения ориентации вождения в соответствии с шириной, длиной и предпочтительным направлением движения, чем обычные прямоугольные поля, что снижает эффективность работы [15].

Типовые условия работы агрегата при нормировании механизированных работ при длине гона 600...800 м характеризуются следующими показателями: поля правильной конфигурации (прямоугольной формы); рельеф ровный (уклон не более 1°; высота над уровнем моря до 500 м; каменистость и препятствия отсутствуют; почвы со средней прочностью несущей поверхности и влажностью до 22%. Если агрегат работает в более сложных условиях, то вводятся поправочные коэффициенты на производительность. Производительность

агрегата в заданных условиях определяется из равенства<sup>6</sup>:

$$W_{см} = W^T \cdot K_{об} = 0,36 \cdot K_{об} \cdot V_p \cdot v_p \cdot \tau_{см}, \quad (3)$$

где  $W^T$  – производительность агрегата в типовых условиях, га/ч;  $K_{об}$  – обобщенный поправочный коэффициент на местные условия;

$$K_{об} = K_k K_h K_c K_n K_p, \quad (4)$$

где  $K_k$ ,  $K_h$ ,  $K_c$ ,  $K_n$ ,  $K_p$  – частные поправочные коэффициенты, учитывающие соответственно, каменистость, высоту над уровнем моря, сложность конфигурации полей, изрезанность полей препятствиями, рельеф. Несколько иной подход к оценке агроландшафта используется в методике ASABE.

Обработка поля с препятствиями усложняет процесс управления агрегатом и снижает производительность [15]. Размер поворотной полосы зависит от ширины захвата, скорости движения и от способов поворота, что приводит к различному времени поворота [8]. Важна выравненность поля, ограничивающая рабочую скорость. Работа на неровном поле при высокой рабочей скорости увеличивает вибрацию рабочих органов, что приводит к отказам и увеличению времени на устранение технических отказов. Анализ этих факторов имеет решающее значение для выявления основных барьеров, которые необходимо устранить, чтобы эффективность использования сельскохозяйственной техники была максимальной. Эти факторы никогда не изучались в эритрейском контексте.

**Цель исследований:** оценка влияния топографических свойств полей фермы Целот (Эритрея) на производительность посевного агрегата.

## Материалы и методы

*Условия исследований.* Исследования проводились в Целоте, Асмэра, Эритрея (рис. 1), во время выполнения операции по посеву пшеницы. Тип почвы по механическому составу – насыщенная глиной (обычно варьирующаяся от глинистой до супесчаной) – влияет на дренаж и пригодность для механической обработки. Более суглинистые почвы расположены на склонах холмов. Глинистые почвы известны плохим внутренним дренажем, что затрудняет эксплуатацию техники во время обильных осадков. Подземный дренаж повышает своевременность полевых работ. Кроме того, глинистые почвы часто создают дополнительную проблему с точки зрения дренажа и уплотнения, поскольку они остаются в пластичном состоянии

<sup>4</sup> Зангиев А.А., Скороходов А.Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 464 с.

<sup>5</sup> Там же.

<sup>6</sup> Сергеева З.В., Химченко Г.Т. Справочник нормировщика. М.: Россельхозиздат, 1983. 367 с.; Зангиев А.А., Скороходов А.Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 464 с.

после высыхания верхнего слоя почвы, становясь барьером для дальнейшего испарения влаги. Этот барьер удерживает подстилающий грунт в пластичном состоянии, предотвращая его обработку без чрезмерного размазывания и повреждения при уплотнении.

Для анализа линий стока атмосферных осадков (на рисунке 1 – красные линии) использовали программу ModelBuilder, входящую в состав платформы ArcGIS. ModelBuilder – это визуальный язык программирования, который позволяет создавать рабочие процессы геообработки. Модели геообработки автоматизируют и описывают процессы географического анализа и управления данными. Приведенные линии стока позволяют выбрать направление движения МТА для снижения водной эрозии (рис. 1).

*Описание объекта исследований.* Целот, Асмэра, Эритрея, расположен на широте 15°17'6,4», долготе 38°56'59" и на высоте 2341 м над уровнем моря, на одной из высокомеханизированных ферм в стране. Проведено обследование 23 участков на площади около 107 га.

Проведен 8-дневный эксперимент с использованием пневматической сеялки Nardi Dora (DORA 600)

в агрегате с трактором New Holland T6090. В течение всего периода работы проводился хронометраж по ГОСТ 24055-2016. При проведении эксперимента за весь рабочий день анализировались: данные по движению агрегата от начальной точки до точки его остановки, в которой изменялось направление (рабочий проход); время, необходимое для изменения направления; направление и время, требуемое для обслуживания или проверки агрегата (при необходимости).

В статье основное внимание уделяется параметрам, определяющим производительность: продолжительность каждого посевного прохода (рис. 2); продолжительность накладных затрат времени [8] (поворот, проверка трубки подачи семян и сошника, обслуживание трубки и сошника при подозрении на неисправности, проверка уровня семян в бункере); обрабатываемая площадь.

*Оценка условий работы посевного агрегата.* Эффективность МТА оценивалась по данным статистического анализа. Учитывалось влияние на производительность конфигурации полей: размер и форма полей, топографические особенности и другие природные или искусственные факторы. В качестве

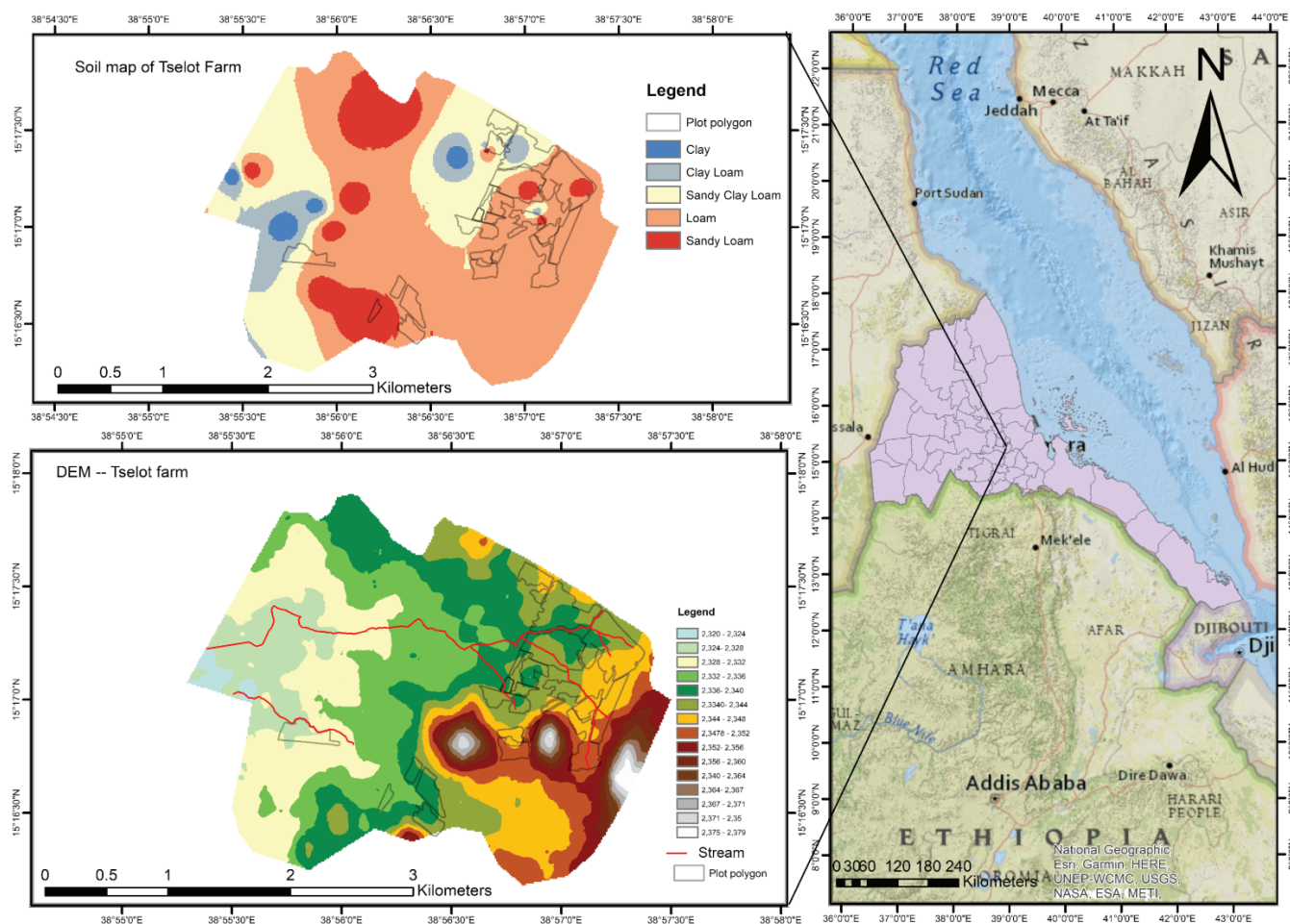


Рис. 1. Топографическая карта района исследований и карта текстуры почвы

Fig. 1. Topographic map of the study area and soil texture map

параметра производительности в исследованиях выступал коэффициент эффективности использования времени ( $\eta$ ) в полевых условиях (1) [7]:

$$\eta = \frac{T}{T_{total}}, \tag{5}$$

где  $T$  – общее время основной работы, ч;  $T_{total}$  – суммарное время, затраченное на основную работу и развороты, ч;

$$T = \sum_{j=1}^n t_j;$$

$$T_{total} = \sum_{i=1}^n t_i, \tag{6}$$

где  $t_j$  – рабочее время непрерывного прохода от точки А до точки В (рис. 2) [9];  $t_p$  – время, затраченное на выполнение рабочего хода  $t_j$ , и время поворота агрегата до начала следующего прохода  $j + 1$  (С – на рисунке 2).

Предполагается, что расстояние между последним рядом первого прохода и первым рядом последующего прохода (стыковочное междурядье) было точно таким же, как расстояние между двумя рядами одного прохода, то есть 15,4 см.

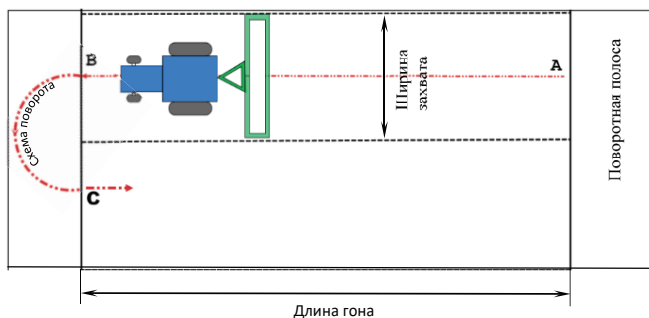


Рис. 2. Схема движения посевного агрегата:

- А – точка начала рабочего хода;
- В – точка окончания рабочего хода;
- С – точка завершения поворота

Fig. 2. Seeding unit movement diagram:

- A – beginning point of the working stroke;
- B – end point of the working stroke; C – end point of the turn

При посеве и непрерывном перемещении из точки А в точку В машиной затрачивается время  $t_j$  (при условии, что машина не останавливается, в противном случае эта остановка будет конечной точкой измерения времени  $t_j$ ). При вынужденной остановке агрегата фиксируется время на разворот ( $t_1$ ), установку пневматической трубки в разобранном корпусе сошника ( $t_2$ ), проверку засоренности трубок подачи семян и их разблокировку (очистку) ( $t_3$ ), проверку бункера на наличие семян и его заполнение ( $t_4$ ), и  $t_i$  может быть задано, соответственно, следующим образом:  $t_i = t_j + t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ , количество проходов.

*Пространственный и статистический анализ полей.* В качестве индексов, характеризующих размеры и форму поля, рассматривались площадь ( $A$ ), выпуклость (значок), отношение периметра к площади ( $P/A$ ), индекс компактности ( $I_{con}$ ), индекс квадратного периметра ( $I_{sp}$ ) и прямоугольность ( $I_r$ ) [6, 9, 16]. Эти показатели определялись по выражениям:

$$I_{con} = \frac{A}{A_{coh}}; \tag{7}$$

$$P / A_{ratio} = \frac{P}{A}; \tag{8}$$

$$I_{con} = 4\pi \frac{A}{P^2}; \tag{9}$$

$$I_{sp} = \frac{4\sqrt{A}}{P}; \tag{10}$$

$$I_r = \frac{A}{A_{mbr}}, \tag{11}$$

где  $A$  – фактическая площадь поля;  $A_{coh}$  – площадь выпуклой оболочки;  $A_{mbr}$  – площадь минимального ограничивающего прямоугольника;  $P$  – периметр обрабатываемого поля.

Площади выпуклой оболочки и минимального ограничивающего прямоугольника полей были рассчитаны с помощью ArcGIS10.7.1 (рис. 3).

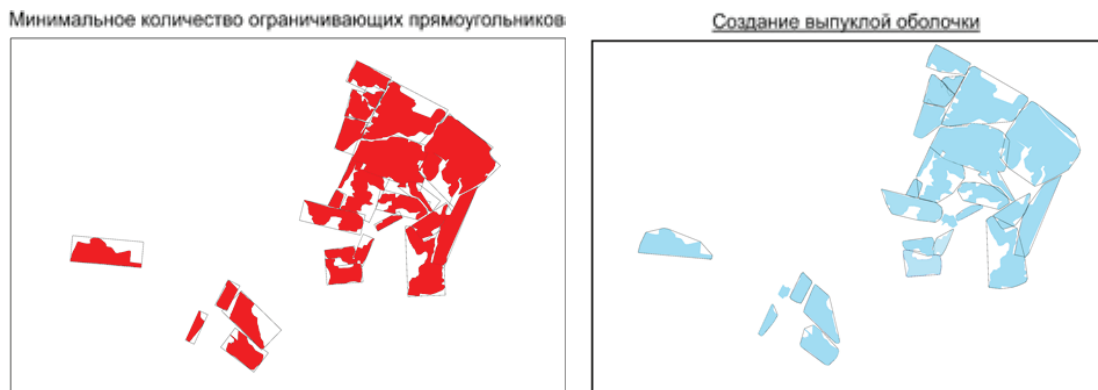


Рис. 3. Минимальные ограничивающие прямоугольники (слева) и выпуклые оболочки (справа)

Fig. 3. Minimum bounding rectangles (left) and convex hulls (right)

Для навигации и расчета границ каждого поля применялись мобильное приложение и GPS Garmin в активном режиме. Расчет площади отдельного поля осуществлялся с помощью автономной геодезии Locus GIS, представляющей собой автономный сборщик данных, картограф, калькулятор площади и редактор SHP версии 1.17.0. Файл формы экспортировался в Google Earth Pro и ArcGIS для дальнейшей обработки. Площади, рассчитанные с помощью Locus GIS, сверялись с площадями, рассчитанными с помощью GPS Garmin, и площадями, полученными путем оцифровки границ отдельных полей в Google Earth Pro, который затем был признан надежным для использования. Значения индексов полей приведены в таблице.

Взаимосвязь индексов оценена с помощью многомерного корреляционного анализа. В качестве меры связи использовалась степень корреляции.

Влияние индексов размера и формы на параметры работы МТА протестировано с помощью JMP 16 Pro. Затем проведен двумерный анализ, чтобы выяснить, как эффективность ( $\eta$ ) МТА реагировала на размер поля и индексы формы.

*Анализ влияния полевых топографических особенностей.* В ходе исследований изучены особенности полей: наличие электрических столбов, ям, скоплений камней и естественных дренажных каналов, изменчивость длины поля и условий на разворотах. Исследование показало, что особенности рельефа местности и различные условия на поворотной полосе отражаются на выборе метода поворота, учитывающего длину поворота, время, скорость и количество остановок, тем самым влияющего на производительность агрегата. В ходе исследований определен коэффициент снижения эффективности каждого поля на основе

Таблица

Значение индексов отдельного поля

Table

Values of individual field indices

Поле <i>Field</i>	Индексы, характеризующие размер и форму поля / <i>Indices characterizing the size and shape of the field</i>				
	Выпуклость <i>Convexity</i> $I_{con}$	Отношение периметра к площади <i>Perimeter to area ratio</i> P/A	Компактность <i>Compactness</i> $I_{com}$	Квадратный периметр <i>Square perimeter</i> $I_{sp}$	Прямоугольность <i>Rectangularity</i> $I_r$
P1	0,95	0,03	0,55	0,83	0,76
P2	0,98	0,02	0,28	0,59	0,79
P3	0,78	0,02	0,36	0,68	0,56
P4	0,88	0,01	0,32	0,63	0,76
P5	0,90	0,02	0,38	0,69	0,67
P6	0,87	0,03	0,48	0,78	0,65
P7A	0,74	0,04	0,28	0,59	0,61
P(7B + 7C)	0,65	0,04	0,17	0,46	0,50
P8A	0,86	0,03	0,48	0,78	0,63
P8A'	0,86	0,05	0,57	0,85	0,58
P8B	0,89	0,03	0,52	0,82	0,72
P9	0,96	0,05	0,72	0,95	0,82
P10.1	0,82	0,03	0,37	0,68	0,69
P10.3	0,86	0,04	0,53	0,82	0,64
P10.4	0,77	0,03	0,48	0,78	0,65
P10,5	0,82	0,05	0,38	0,70	0,59
P10,7	0,95	0,05	0,50	0,80	0,79
P11	0,63	0,02	0,29	0,61	0,52
P12.1	0,97	0,03	0,70	0,94	0,86
P12.2	0,90	0,02	0,50	0,80	0,56
P12.3	0,85	0,03	0,47	0,78	0,71
P12.4	0,95	0,05	0,48	0,78	0,69
P13	0,83	0,02	0,42	0,73	0,61

данных источников литературы и проанализирована реакция производительности на эти факторы. Коэффициенты рассчитывались по уравнению 3.

**Результаты и их обсуждение**

Экспериментально установлен диапазон  $\eta$  МТА 65,7...30,1% (рис. 4). Данные были проанализированы на предмет распределения по скорректированному информационному критерию Акайке (AICc) и байесовскому критерию (BIC), позволяющими оценить наилучшее соответствие модели:

$$AICc = n \ln \left( \frac{SSE}{n} \right) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} + n \ln(2\pi) + n;$$

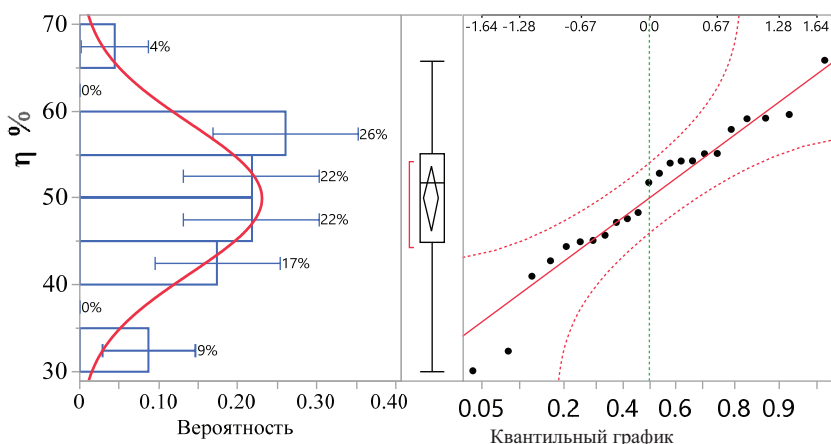
$$BIC = n \ln \left( \frac{SSE}{n} \right) + k \ln(n) + n \ln(2\pi) + n;$$

$$AICc_{weight} = \frac{\exp[-0,5(AICc - \min(AICc))]}{\sum(\exp[-0,5(AICc - \min(AICc))])}$$

где  $k$  – количество оцененных параметров в модели;  $n$  – количество наблюдений, используемых в модели; SSE – сумма квадратов ошибок в модели, которые в данном случае являются средним значением ( $\mu$ ) и стандартным отклонением ( $\sigma$ ), следовательно,  $k = 2$ .

Модель с наименьшим значением AICc и BIC и наибольшим значением AICcWeight считается наиболее подходящей<sup>7</sup>. Для анализируемых данных AICc = 167,96; BIC = 169,63; AICcWeight = 0,25. Установлено, что наилучшей моделью является закон нормального распределения (рис. 4).

Из таблицы квантилей анализа: максимальное значение – 65,74%; первый квантиль – 55,04%; медиана – 51,71%; третий квантиль – 44,91%; минимум – 30,1%. Из сводных статистических данных следует,



**Рис. 4. Распределение  $\eta$  (нормальное распределение) и квантильный график**

**Fig. 4. Distribution of  $\eta$  (normal distribution) and quantile plot**

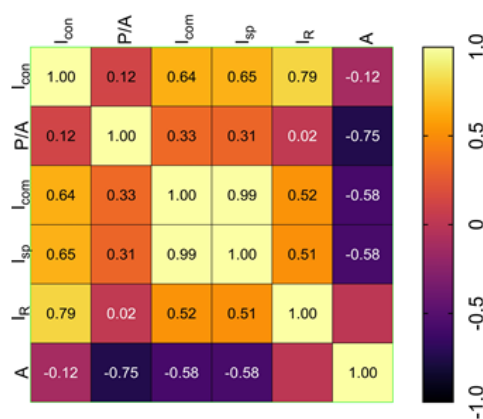
что среднее значение составляет 49,9, стандартное отклонение выше и ниже 95%: соответственно 8,62; 53,6; 46,15.

Диапазон между максимумом и минимумом является довольно высоким (35,64), а коэффициент вариации составляет 17,3%, указывая на относительно высокую дисперсию  $\eta$ . Среднее значение составляет около 50%. С одной стороны, это показывает 50%-ную потерю времени во время операции, а с другой стороны, значение 95%-ного доверительного интервала также отражает 90% операций, в которых потери времени составляли от 54 до 46%.

*Анализ индексов.* Значения индексов определены для каждого поля (табл. 1). Минимальные ограничивающие прямоугольники и выпуклые оболочки результатов ArcGIS приведены на рисунке 5.

По данным многомерного корреляционного анализа,  $I_{com}$  и  $I_{sp}$  высокозначимо (положительно) коррелировали (Pearson  $r = 0,99$ ); за ними следовали  $I_r$  и  $I_{con}$  ( $r = 0,79$ ),  $I_{con}$  и  $I_{sp}$  ( $r = 0,65$ ),  $I_{com}$  и  $I_{con}$  ( $r = 0,64$ ), тогда как  $A$  (га) отрицательно коррелирует с  $P/A$  ( $r = -0,75$ ),  $I_{com}$  ( $r = -0,58$ ) и  $I_{sp}$  ( $r = -0,58$ ). Остальные показатели формы и размера лежат в диапазоне меньшей значимости и являются некоррелированными.

Чтобы предотвратить столкновение модели с парадоксом мультиколлинеарности и обеспечить надежность коэффициентов, связанных с двумя сильно коррелирующими переменными,  $I_{com}$  исключается из дальнейшего анализа, так как очень сильно коррелирует с  $I_{sp}$ , в то время как другие индексы сохраняются. Подход двумерной регрессии использовался при оценке 5 индексов ( $I_{con}$ ,  $P/A$ ,  $I_{sp}$ ,  $I_r$  и  $A$ ) для выявления индекса, имевшего наиболее сильную корреляцию с  $\eta$  МТА.



**Рис. 5. Корреляционная матрица показателей размера и формы**

**Fig. 5. Correlation matrix of size and shape indices**

<sup>7</sup> Model Comparison Report. Accessed: Feb. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.jmp.com/support/help/en/17.2/index.shtml#page/jmp/model-comparison-report-2.shtml>.

Реакция параметров работы МТА на индексы размера и формы. Результаты корреляционной значимости показали, что реакция  $\eta$  на индексы была незначительной (рис. 6). Однако отметим, что некоторые индексы размера и формы демонстрируют степень влияния, которая могла быть уменьшена другими влияющими переменными.

Эффективность показала положительную реакцию на «P/A», отрицательную реакцию на «A» и отсутствие реакции на «I<sub>con</sub>». В связи с этим открытием потребовалось дополнительное исследование для выявления других влияющих переменных.

Влияние встроенных топографических барьеров на производительность МТА. Чтобы определить реакцию на топографические особенности, проведен двумерный анализ обобщенного поправочного коэффициента  $K_{об}$  и коэффициента эффективности использования времени в полевых условиях  $\eta$ . Коэффициент детерминации был относительно выше ( $R^2 = 0,79$ ), показывая, что факторы внесли значительный вклад в снижение производительности МТА (рис. 7). Уравнение большой оси эллипса рассеивания представлено прямой  $\eta\% = -37.037 + 105.07K_{об}$ , а синяя пунктирная линия представляет эллипс плотности 90%.

Результаты исследований указывают на то, что топографические особенности фермы оказывают негативное влияние на производительность техники. Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства активно развивает ферму, и большая часть работ уже завершена. Однако незавершенная отделка полей приводит к снижению производительности сельскохозяйственной техники. Важно осознавать значительное влияние этих препятствий на производительность техники, поскольку любой фактор, снижающий производительность посевной техники, аналогичным образом повлияет на другие операции.

Снижение эффективности приводит к росту общих производственных затрат, поскольку способствует увеличению эксплуатационных расходов ввиду простоев и потери времени, а также к более высокому риску задержек в других операциях, что приводит к нарушениям своевременности в производственной системе. Задержки в предпосевных операциях задерживают посева. В странах с короткими сезонами дождей – таких, как Эритрея, задержка с посевом может привести к частичному или полному неурожаю.

### Выводы

1. Топографические особенности (барьеры) играют доминирующую роль в снижении эффективности использования МТА. Конфигурация поля оказывает

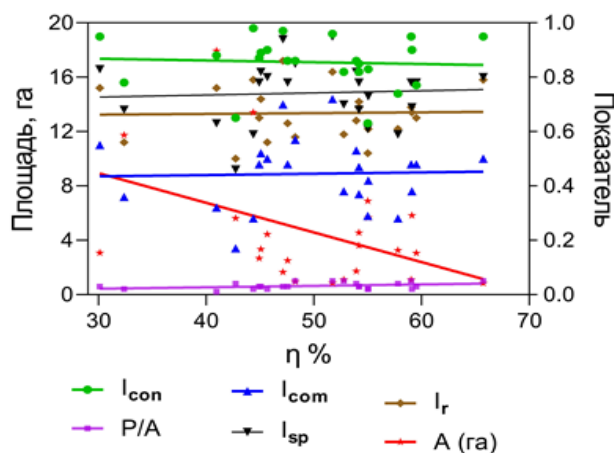


Рис. 6. График зависимости уровня  $\eta$  от показателей размера и формы

Fig. 6. Relationship graph between  $\eta$  level and size and shape indices

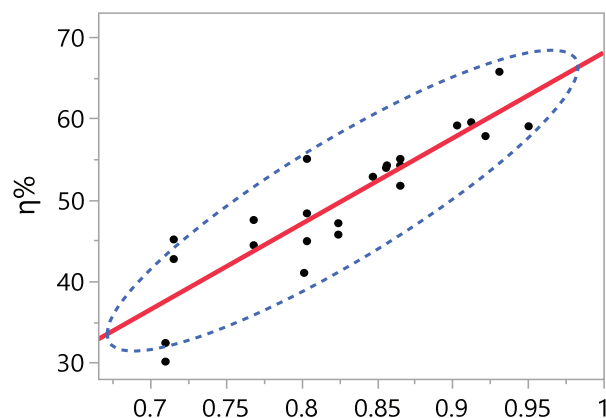


Рис. 7. Корреляция между коэффициентом снижения эффективности ( $K_{об}$ ) и  $\eta$  МТА

Fig. 7. Correlation between the efficiency reduction factor ( $K_{об}$ ) and the  $\eta$  value of the implement-and-tractor unit

значительное влияние на снижение производительности машинного агрегата. Коэффициент эффективности использования времени в полевых условиях  $\eta$  является весьма чувствительным по отношению к топографическим особенностям поля.

2. Наличие большого количества препятствий на поле увеличивает количество поворотов и остановок, продлевает непроизводительное время и, следовательно, снижает эффективность.

3. Не обнаружено существенное влияние индексов размера и формы на рабочие параметры МТА, однако степень влияния некоторых индексов уменьшена другими влияющими переменными.

4. При проектировании и землеустройстве полей следует учитывать оптимальные условия для использования техники, уделяя особое внимание созданию подходящих полос поворота для маневрирования и устранения препятствий в пределах рабочей зоны.



## Список источников / References

1. Medhn T.A., Teklay S.G., Mengstu M.T. Analysis of the Level of Agricultural Mechanization in Eritrea Based on USDA Data Sources. *European Journal of Agriculture and Food Sciences*. 2023;5(6):62-69. <https://doi.org/10.24018/ejfood.2023.5.6.664>
2. Srivastava A., Goering C., Rohrbach R., Buckmaster D. Engineering principles of agricultural machines. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. 559 p.
3. Shinde G.U. et al. Farm Mechanization. In Trajectory of 75 years of Indian Agriculture after Independence, Springer, Singapore, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-7997-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-19-7997-2_18)
4. Diao X., Takeshima H., Zhang X. An evolving paradigm of agricultural mechanization development: How much can Africa learn from Asia? Synopsis, IFPRI synopsis 1224277378, International Food Policy Research Institute (IFPRI).
5. Kutz M. Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering. Second edition. New York: Elsevier, 2013. 760 p.
6. Griffel L.M., Vazhnik V., Hartley D., Hansen J.K., Richard T.L. Machinery maneuvering efficiency and perennial crops: field shape complexity defines the efficiency. *ASABE Annual International Meeting*. 2018:1800440. <https://doi.org/10.13031/aim.201800440>
7. Janulevičius A., Šarauskis E., Čiplienė A., Juostas A. Estimation of farm tractor performance as a function of time efficiency during ploughing in fields of different sizes. *Biosystems Engineering*. 2019;179:80-93. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.01.004>
8. Paraforos D.S., Hübner R., Griepentrog H.W. Automatic determination of headland turning from auto-steering position data for minimising the infield non-working time. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;152:393-400. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.035>
9. Oksanen T. Shape-describing indices for agricultural field plots and their relationship to operational efficiency. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2013;98:252-259. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.014>
10. Sklenicka P., Janovska V., Salek M., Vlasak J., Molnarova K. The Farmland Rental Paradox: Extreme land ownership fragmentation as a new form of land degradation. *Land use policy*. 2014;38:587-593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.01.006>
11. Shi Y., Yang Q., Zhou L., Shi S. Can moderate agricultural scale operations be developed against the background of plot fragmentation and land dispersion? *Evidence from the Suburbs of Shanghai. Sustainability*. 2022;14(14):8697. <https://doi.org/10.3390/su14148697>
12. Zeng L., Li X., Ruiz-Menjivar J. The effect of crop diversity on agricultural eco-efficiency in China: A blessing or a curse? *Journal of Cleaner Production*. 2020;276:124243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124243>
13. Habib M. Quantifying topographic ruggedness using principal component analysis. *Advances in Civil Engineering*. 2021;3311912. <https://doi.org/10.1155/2021/3311912>
14. Toscano P., Cutini M., Filisetti A., Premoli E., Porcu M., Catalano N., Bisaglia C., Brambilla M. Workability assessment of different stony soils by soil-planter interface noise and acceleration measurement. *AgriEngineering*. 2022;4(4):1139-1152. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4040070>
15. Zhou K., Jensen L.A., Sørensen C.G., Busato P., Bothtis D.D. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2014;109:12-22. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.013>
16. Demetriou D., See L., Stillwell J. A parcel shape index for use in land consolidation planning. *Transactions in GIS*. 2013;17(6):861-882. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2012.01371.x>

## Сведения об авторах

**Александр Григорьевич Левшин**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор; [alevshin@rgau-msha.ru](mailto:alevshin@rgau-msha.ru); <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

**Тесфит Асрат Медхн**<sup>2</sup>, аспирант; [noahtesas@gmail.com](mailto:noahtesas@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-4371-1323>

**Ирина Николаевна Гаспарян**<sup>3</sup>, д-р с.-х. наук, доцент, главный научный сотрудник; [irina150170@yandex.ru](mailto:irina150170@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654>

**Симон Гебрехивет Теклай**<sup>4</sup>, магистрант, [gtsimon1994@gmail.com](mailto:gtsimon1994@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

<sup>1,2</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Прянишникова, 31

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2

## Вклад авторов

А.Г. Левшин – концептуализация, руководство исследованием  
Т.А. Медхн – формальный анализ, ресурсы  
И.Н. Гаспарян – верификация данных  
С.Г. Теклай – создание черновика рукописи, перевод с английского языка на русский

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 29.01.2024, после рецензирования и доработки – 05.03.2024, принята к публикации 11.03.2024

## Author Information

**Aleksandr G. Levshin**<sup>1</sup>, DSc (Eng), Professor, [alevshin@rgau-msha.ru](mailto:alevshin@rgau-msha.ru); <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>

**Tesfit A. Medhn**<sup>2</sup>, postgraduate student; [noahtesas@gmail.com](mailto:noahtesas@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0002-4371-1323>

**Irina N. Gasparyan**<sup>3</sup>, DSc (Ag), Professor, [irina150170@yandex.ru](mailto:irina150170@yandex.ru); <https://orcid.org/0000-0001-7161-3654>

**Simon G. Teklay**<sup>4</sup>, MSc student, [gtsimon1994@gmail.com](mailto:gtsimon1994@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

<sup>1,2</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

<sup>3</sup> All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov; 31 Pryanishnikova Str., Moscow, 127434, Russian Federation

<sup>4</sup> St. Petersburg State Agrarian University; 196601, Russian Federation, St. Petersburg, Pushkin, Peterburgskoe Ave., 2

## Author Contribution

A.G. Levshin – conceptualization, research supervision  
T.A. Medhkn – formal analysis, resources  
I.N. Gasparyan – data verification  
S.G. Teklay – original draft preparation, translation of literature sources from English into Russian

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 29.01.2024; Revised 05.03.2024; Accepted 11.03.2024