

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.331:633.11

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-21-29>

Оценка эксплуатационной точности пневматической сеялки на ферме Эритреи

Т.А. Медхн^{1✉}, А.Г. Левшин², С.Г. Теклай³^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Москва, Россия³ Колледж сельского хозяйства, потребительских и экологических наук, Университет штата Нью-Мексико; Лас-Крусес, США¹ noahtesas@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>² aevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>³ gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

Аннотация. Опыт использования современного посевного комплекса на базе сеялки Nardi Dora (DORA 600) на ферме Целот Республики Эритрея при посеве пшеницы показал большую вариацию характеристик, оценивающих точность движения агрегата: неравномерные расстояния между рядками, видимые зоны повторных посевов и зоны пропусков при посеве. Неточный высев приводит к образованию участков с повторным посевом и пропускам (незасеянной площади). При этом увеличиваются денежные затраты по причине перерасхода посевного материала и топлива, снижается производительность. Эти негативные явления стали причиной проведения исследований процесса посева и разработки рекомендаций по устранению недостатков. Исследования проведены с целью определения процента незасеянных и повторно засеянных площадей и оценки точности движения пневматической сеялки DORA 600 в сравнении с современными системами автоматизированного вождения. Эксперимент проведен в Эритрее на площади около 107 га, засеянной пшеницей. Проведена оценка точности посева по результатам отслеживания треков движения агрегата на мобильном телефоне с использованием приложения Locus GIS offline land survey, версия 1.17.0. По записи треков определены отклонения фактической рабочей ширины от требуемых значений. Произведено сравнение точности движения исследуемого агрегата с системой автовождения. Проведен анализ современных систем автовождения ведущих компаний Autopilot, Autopilot™, AutoTrac™, SteerCommand with GPS7500, AGI-4, GPS PILOT, Autosteer, Auto-Steer, F100 Auto Steer System и IntelliSteer™. По точности и универсальности управления выбран российский продукт Autopilot, обеспечивающий точность 1 см + 1 ppm. Определен рабочий диапазон скоростей – 10-12 км/ч, обеспечивающий допустимый интервал варьирования рабочей ширины захвата. Статистический анализ показал высокий уровень превосходства сеялок с GPS-наведением в сравнении с обычным посевным агрегатом. Авторы предложили применять в Эритрее передовые автоматизированные технологии.

Ключевые слова: пневматическая сеялка, повторный высев, незасеянная площадь, оценка точности посева, рабочая скорость, коэффициент рабочих ходов, статистический анализ, точность движения агрегата

Для цитирования: Медхн Т.А., Левшин А.Г., Теклай С.Г. Оценка эксплуатационной точности пневматической сеялки на ферме Эритреи // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 21-29. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-21-29>

ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of operational precision of a pneumatic seed drill used by farms in Eritrea

T.A. Medhn^{1✉}, A.G. Levshin², S.G. Teklay³^{1,2} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia³ College of Agriculture, Consumer and Environmental Sciences, New Mexico State University; Las Cruces, USA¹ noahtesas@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>² aevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>³ gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>

Abstract: The use of a contemporary sowing machinery unit – Nardi Dora (DORA 600) air drill for sowing wheat at the Tselot farm in Eritrea revealed a wide range of characteristics that trigger the assessment of the movement precision of the unit. They include uneven inter-row distances and visible over-seeded and skipped zones. Inaccurate seeding results in repeated and missed (unsown area) sowing patterns that lead to the rise of monetary expenses

owing to the overconsumption of seed and fuel while lowering production. The study sought to assess the rate of repetition and rate of miss operations to evaluate the sowing precision of the Nardi Dora Air drill and compare it with the modern automated systems. The experiment was conducted in Eritrea on a wheat-sown area of around 107 ha. Sowing precision evaluation was based on the tracked routes on a mobile phone using the Locus GIS offline land survey application version 1.17.0. Deviations of the actual working width from the required values were determined from the track records. The movement precision of the unit was compared with the auto-driving systems of the modern driving systems: Autopilot, Autopilot™, AutoTrac™, SteerCommand with GPS7500, AGI-4, GPS PILOT, Autosteer, Auto-Steer, F100 Auto Steer System и IntelliSteer™. An operating speed range of 10-12 km/h provided an acceptable range of the working width. Statistical analysis showed a high level of superiority of GPS-guided seeders over the conventional sowing units. Consequently, the authors recommend using advanced automated technologies in Eritrea.

Keywords: pneumatic seed drill, resowing, unsown area, sowing precision assessment, working speed, run coefficient, statistical analysis, machinery movement precision

For citation: Medhn T.A., Levshin A.G., Teklay S.G. Evaluation of operational precision of a pneumatic seed drill used by farms in Eritrea. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(2):21-29 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-2-21-29>

Введение

Уровень механизации сельского хозяйства страны обуславливает эффективность сельскохозяйственного производства и уровень национального валового дохода [1, 2]. Особенно это актуально для стран с экономикой, в значительной степени зависящей от сельского хозяйства, характеризующихся неопределенными климатическими условиями, прогрессивным ростом населения и скудными пахотными землями. Сельскохозяйственная механизация, снижая долю человеческого труда на ферме, повышает производительность, ускоряет процессы посадки и сбора урожая, тем самым снижая пиковые потребности в рабочей силе в сезонный период [1].

Оценка эффективности сельскохозяйственных операций позволяет скорректировать планировку полей, выбрать методы и организацию работ. При этом можно применить множество подходов – например, оценить эффективность использования времени, производительность, потребление энергии и качество работы.

Высокопроизводительные и точные сеялки обеспечивают оптимальную норму высева, точное расстояние между семенами и рядами и высева на нужной глубине [2, 3]. Автоматизированные машины, использующие RTK и GPS, отличаются точностью работы и минимумом ошибок. Высокопроизводительные сеялки в отличие от небольших агрегатов обеспечивают своевременность работы [4], однако могут быть нерентабельными по причине их высокой первоначальной стоимости. Выбор оптимального размера сеялки является необходимым.

Количественная характеристика сеялки (производительность) определяется размером обрабатываемой площади за единицу времени, в то время как для

качественной характеристики (точность размещения семян в трехмерном пространстве) свойственна равномерность распределения семян вдоль, поперек рядов и по глубине посадки. Точность высева достигается минимизацией ошибок маршрута следования машинно-тракторного агрегата (МТА). Для поддержания параллельности маршрутов МТА на заданных интервалах отслеживаются записи их передвижения [5]. Эксплуатационная точность МТА определяется степенью незасеянной площади или частичным либо полным перекрытием маршрутов [6].

Несколько лет назад в Эритрее начали внедрять механизированную технологию посева для многих богарных культур, в том числе для пшеницы. Богарная пшеница – одна из основных культур в Эритрее¹, выращиваемая в основном в горных районах на территории около 30000 га. Для эффективной организации работы, оптимизации используемых ресурсов и повышения урожайности необходимо провести оценку эксплуатационной точности пневматической сеялки.

Цель исследований: оценка точности пневматической сеялки путем анализа отклонений рабочей ширины от требуемых значений и расчета площади незасеянных и повторно засеянных участков; сравнение эффективности обычной пневматической сеялки с автоматизированными системами посева; определение предельного диапазона скорости движения сеялки на основе соотношения погрешностей рабочей ширины, зафиксированных в ходе эксперимента.

¹Eritrea: ongoing research produces six high yield wheat varieties. ICARDA. [Electronic resource]. URL: <https://www.icarda.org/media/news/eritrea-ongoing-research-produces-six-high-yield-wheat-varieties> (accessed: 15.12.2023).

Материалы и методы

Исследования проводились в Целоте, Асмара, Эритрея (широта $15^{\circ}17'6.4''$, долгота $38^{\circ}56'59''$, высота 2341 м над уровнем моря) на площади около 107 га, засеянной пшеницей с помощью тракторной пневматической сеялки Nardi Dora Air Drill². Пневматическая сеялка DORA 600, имеющая 40 сошников, рабочую ширину 6 м, была оснащена трактором New Holland T6090 мощностью 152 лошадиные силы. Сеялка, оснащенная стандартным бункером емкостью 800 л (общим для всех моделей), механическими маркерами колеи, сошниками типа Suffolk и стандартным вентилятором с приводом от ВОМ, весит 1090 кг и работает с междурядьем 15,3 см.

Выпадение и распределение осадков в Эритрее являются непредсказуемыми и нестабильными. Во время проведения эксперимента (между предпосевной и посевной фазами) не было ни одного дождя, в результате чего почва осталась сухой и пыльной. Это затрудняло наблюдение оператора за линиями маркеров, сделанными МТА, поэтому на линии находились люди, указывавшие оператору направление (рис. 1).

Посев проводился в течение 8 дней, с 3 по 10 июля 2023 г. включительно. Для отслеживания маршрутов МТА использовалось автономное приложение Locus GIS offline land survey – data collector, mapper, area calculator, and SHP editor version 1.17.0. Для большей точности отслеживания маршрутов мобильный телефон с включенным приложением располагался вдоль центральной линии трактора. Запись маршрутов следования экспортировалась в Google Earth Pro и ArcGIS для дальнейшей обработки.

Для оценки точности маршрутов и результатов посадочных работ, выполненных МТА, проведено однодневное полевое обследование всходов на выбранных участках. В мобильном приложении исследовались промежутки между маршрутами, ширина которых в идеале должна составлять 6,15 м. На рисунке 2 отображены пространственная запись участка 11, выполненная в приложении, и реальная фотография. В точке, где лежит линейка 50 см, расстояние между рядами составляло 0,8 м вместо 0,15 м.

Записи маршрутов МТА показаны на рисунке 3, на котором темными линиями обозначены границы четырех участков, а сиреневым цветом – отслеживаемые



Рис. 1. Люди, находящиеся на сделанной маркером МТА линии, направляющие оператора

Fig. 1. People standing on the line made by the machinery unit marker and guiding the operator



Рис. 2. Фотография участка 11 с мобильного приложения и его натуральный увеличенный фрагмент

Fig. 2. Photo of plot 11 from the mobile application and its enlarged section

² AMIA. Nardi Dora Air Drill. AMIA. [Electronic resource]. AMIA Online Shop. 2021. URL: <https://www.agrimarketia.com/product/nardi-dora-air-drill/> (accessed: 15.12.2023).

маршруты, записанные во время полевых работ с использованием приложения Locus GIS.

На всех участках, перпендикулярно направлению движения МТА, измеряли расстояние между линиями маршрутов: например, вдоль линий В – В, С – С, А – А и D – D (рис. 3). Количество повторных сечений на всех полях – 5.

Отклонение ширины от идеального значения использовали для количественной оценки площадей ошибок (площадь повторно засеивалась или оставалась незасеянной). В этих целях размер идеальной площади математически определяется по уравнению 1:

$$S = \sum_{i=1}^n a_i = \frac{B_0}{2}(L_0 + L_n) + \frac{B_1}{2}(L_0 + L_1) + \frac{B_2}{2}(L_1 + L_2) + \dots + \frac{B_n}{2}(L_{n-1} + L_n), \quad (1)$$

где S – общая площадь, обработанная за время работы рассматриваемого участка, м^2 ; a_i – площадь между двумя последовательными отслеживаемыми маршрутами, м^2 ; B_0 – фактическая ширина, м, пройденная за один проход орудия (рис. 4а); B_i – расстояние между двумя последовательными записанными маршрутами, м; $L_0, L_1 \dots L_n$ – длины отдельных маршрутов, м, пройденных техникой между поворотными

остановками (рис. 4а); $i = 1, 2 \dots n$ – количество отдельных маршрутов.

По причине неточности вождения, особенностей рельефа местности и других факторов участки могут засеиваться повторно (RP) или оставаться незасеянными между проходами (MP). Значения RP и MP можно определить по формулам [6]:

$$RP = \frac{S_R}{S - S_R} \cdot 100; \quad (2)$$

$$MP = \frac{S_M}{S - S_R + S_M} \cdot 100; \quad (3)$$

$$S_R = B_{ov}; \quad (4)$$

$$S_M = B_{us} \cdot L_i, \quad (5)$$

где S_R – повторно засеянная площадь, м^2 ; S_M – незасеянная площадь, м^2 ; B_{ov} и B_{us} – ширина (м), перекрытая и оставшаяся незасеянной, соответственно (рис. 4б).

Коэффициент рабочих ходов оценивается отношением расстояния рабочего маршрута к сумме рабочих и холостых ходов³:

$$\varphi_{PO} = \frac{S_P}{S_P + S_{XO}} \cdot 100, \quad (6)$$

где S_{XO} и S_P – длина холостого и рабочего пути агрегата.

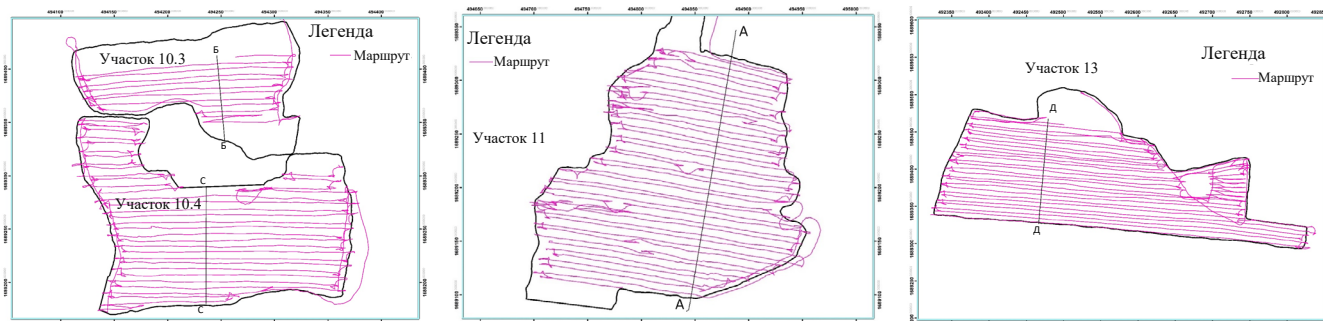


Рис. 3. Отслеживаемые маршруты оцениваемых участков

Fig. 3. Tracked routes of the assessed plots

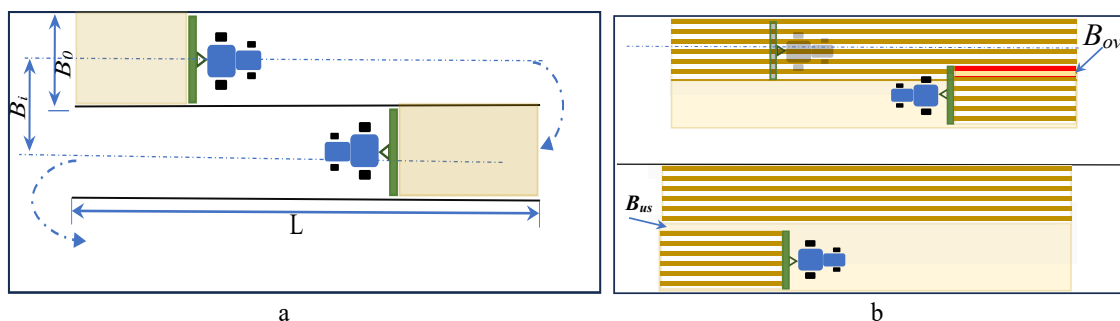


Рис. 4. Идеальная ширина, расстояние между маршрутами (а) и возможные отклонения (б)

Fig. 4. Ideal width and distance between routes (a) and possible deviations (b)

³ Зангиев А.А., Скороходов А.Н. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 464 с.

Значения φ_{po} лежат в диапазоне 0...100%. Значения, близкие к единице, указывают на меньшую дальность холостого хода, и наоборот.

Повышение точности и эффективности движения агрегатов возможно за счет применения систем автоматического управления. Различные компании-производители сельскохозяйственной техники предлагают системы с разным уровнем точности и услуг по настройке (табл. 1).

Точность высева, контролируемую человеком по сравнению с автоматизированными системами, и количественную оценку производительности определяли с помощью t-теста.

Ошибку МТА (ε) определили как абсолютное значение разницы между фактическими (B_{ui}) и теоретическим (B_t) расстоянием между последующими

проходами (уравнение 8). Ссылаясь на значения в таблице 1, выполнили одновыборочный t-тест (уравнение 9) при сравнении ошибки МТА и уровня точности автоматизированной системы:

$$\varepsilon_{i(T6090)} = |B_{ui} - B_t|;$$

(8)

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}},$$

(9)

где $\bar{x}$ – среднее значение выборки; μ – идеальное значение ширины между двумя проходами; s – стандартное отклонение выборки; n – размер выборки.

Рабочая скорость пневматической сеялки существенно влияет на расстояние между семенами, качество посева и урожайность биомассы. Идеальная скорость зависит от вида культуры, состояния почвы

Сравнительный обзор систем автоматического вождения агрегата

Таблица 1

Comparative overview of automated machinery unit guidance systems

Table 1

Компания <i>Company</i>	Система <i>System</i>	Точность, см <i>Accuracy, cm</i>	Коррекционные услуги <i>Correction services</i>
ИТЭЛМА СП	Autopilot ⁴	1 см + 1 ppm	RTK
John Deere	AutoTrac™ ⁵	±2,5 (RTK), ±3 (SF3)	StarFire™ RTK, SF3, SF2, SF1
Trimble	Autopilot™ ⁶	±2,5 (RTK)	RTK, CenterPoint® RTX, RangePoint® RTX, ViewPoint™ RTX
Ag Leader	SteerCommand® with GPS7500 ⁷	±2,5 (RTK)	RTK, TerraStar-C Pro, TerraStar-L
Topcon	AGI-4 ⁸	±2 (RTK)	RTK, TopNET Global D, SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS)
CLAAS	GPS PILOT ⁹	±2-3 (RTK)	RTK, EGNOS, other regional correction services
FieldBee	Autosteer ¹⁰	±2,5	RTK
FJDynamics	Auto-Steer ¹¹	±2,5	GPS, GLONASS, Beidou, Galileo
Sveaverken ¹²	F100 Auto Steer System	±2,5	GPS, GLONASS
NewHolland	IntelliSteer™	±1-2 (RTK)	RTK, WAAS, EGNOS ¹³

⁴ Itelma: сайт. <https://www.itelma-sp.ru/produkty/gidravlicheskiy-avtopilot>. [Electronic resource].

⁵ Precision Ag Technology. Guidance Solutions | John Deere US. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/guidance/> (accessed: 05.06.2024).

⁶ Trimble RTX Frequently Asked Questions TRANSFORMING THE WAY THE WORLD WORKS. [Electronic resource]. 2019.

⁷ SteerCommand® Z2. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.agleader.com/guidance-and-steering/steercommand-z2/> (accessed: 05.06.2024).

⁸ AGI-4. Topcon Positioning Systems, Inc. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://mytopcon.topconpositioning.com/support/products/agi-4> (accessed: 05.06.2024).

⁹ CEMIS1200 becomes the new standard for precision farming applications at CLAAS – Press releases. CLAAS Group. [Electronic resource]. 2021. URL: <https://www.claas-group.com/press-group-communications/press-releases/cemis-1200-becomes-the-new-standard-for-precision-farming-applications-at-claas/2693590> (accessed: 05.06.2024).

¹⁰ FieldBee – GPS tractor systems. Precision farming tools. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.fieldbee.com/> (accessed: 05.06.2024).

¹¹ FJDynamics auto-steering kit: Your experienced assistant in precision farming – Future Farming. [Electronic resource]. 2021. URL: <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/fjdynamics-auto-steering-kit-your-experienced-assistant-in-precision-farming/> (accessed: 05.06.2024).

¹² F100 AUTOMATIC CONTROL SYSTEM. Sveaverken. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://www.sveaverken.com/ru/products/f100-auto-steer-system> (accessed: 05.06.2024).

¹³ PLM GUIDANCE. NHAG. [Electronic resource]. 2024. URL: <https://agriculture.newholland.com/apac/th-th/equipment/products/agricultural-tractors/t7-tier-4a/detail/plm-guidance> (accessed: 05.06.2024).

и типа сеялки. Для участков 10.4, 11 и 13 время прохождения маршрута определяли по записи трека движения, скорость МТА вычисляли по формуле:

$$v_i = \frac{l_i}{t_i}, \quad (7)$$

где v_i – скорость, м/с; l_i – длина отдельного маршрута, м; t_i – время, с, необходимое для завершения маршрута l_i .

Результаты и их обсуждение

Отклонение фактического расстояния между маршрутами от требуемой ширины 6,15 м и повторный высев площадей отражены на рисунке 5.

На рисунке показаны средняя ширина и количество операций на четырех участках. Отметим, что непараллельные маршруты сопровождаются высокой частотой повторно засеянных площадей. Кроме того, нельзя исключить вероятность, что между маршрутами останется незасеянное пространство.

Количество незасеянных и повторно засеянных участков определяли путем нахождения разницы между требуемой шириной (интервал между последовательными трассами, равный 6,15 м) и фактической шириной.

Чем меньше расстояние ниже контрольной линии, тем больше ширина перекрытия и тем больше размер повторно засеянной области; чем выше точка над контрольной линией, тем больше площадь, оставшаяся незасеянной (рис. 5).

Установлено, что 79% интервалов между последовательными маршрутами были меньше 6,15 м (идеальной ширины), а 21% превысил ее.

Значения площади незасеянных участков (RM) и имеющих повторный высев (RP) и коэффициент рабочих ходов (ϕ_{PO}) приведены в таблице 2. В идеальных ситуациях RP и MP должны быть как можно ближе к нулю. Средневзвешенные значения RP и MP составили 16,05 и 2,38% соответственно,

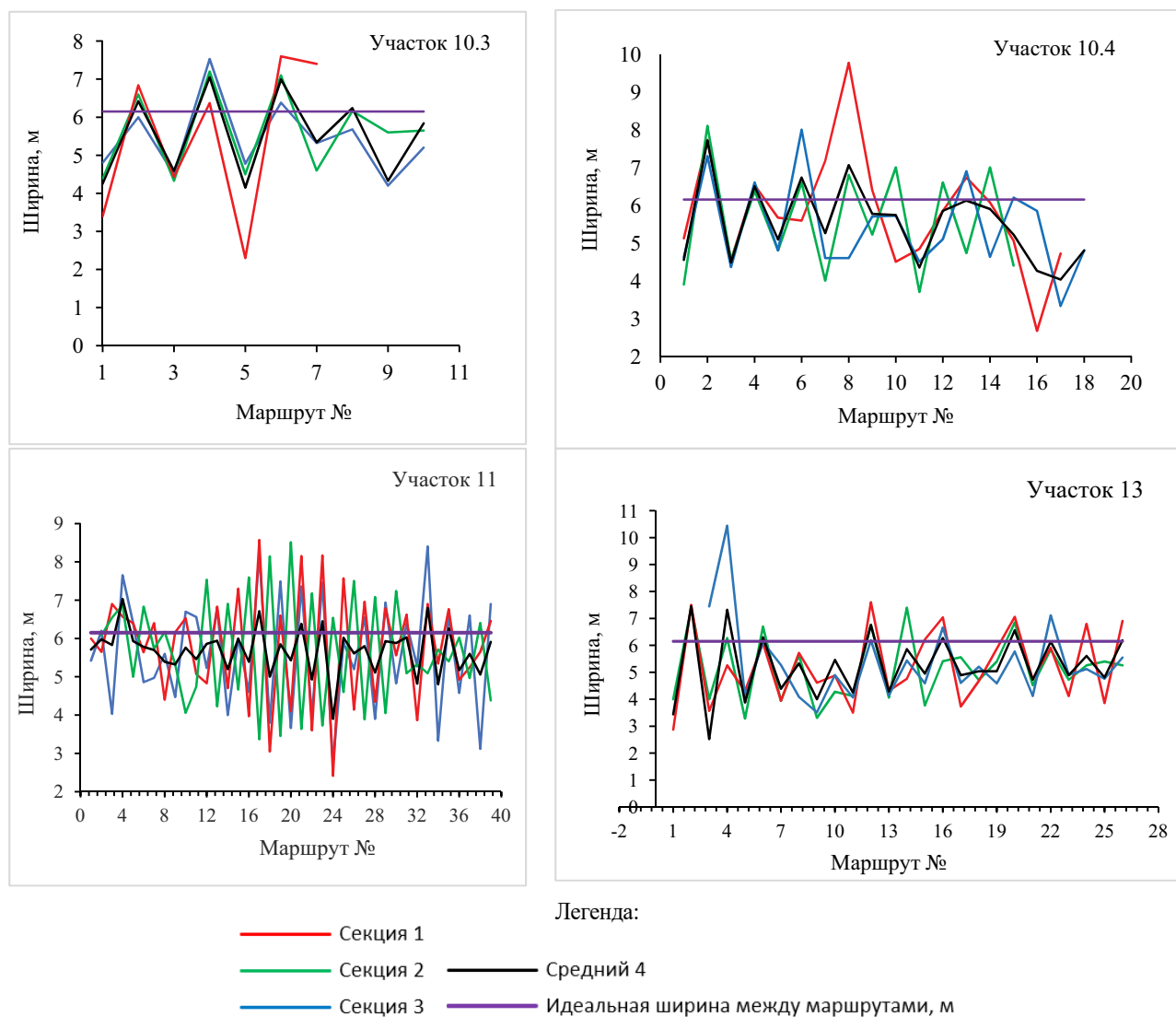


Рис. 5. Фактическое расстояние между маршрутами

Fig. 5. Actual distance between routes

что указывает на процент повторно засеянной и незасеянной площади. Тот же процент семян и энергии, использованной МТА, был убыточно растрочен. Кроме того, 16,05% от общей площади участков продемонстрировали удвоенную плотность растений, что приведет к снижению урожайности и чрезмерному истощению питательных веществ в почве. Около 2,38% пахотных земель участков остались незасеянными несмотря на ограниченное количество пахотных земель в центральной зоне Эритреи.

Из общей площади, обработанной во время эксперимента (107 га), около 17 га повторно засеяны и около 3 га остались незасеянными. При средней урожайности пшеницы в стране¹⁴ 1,1 т/га с 3 га незасеянной площади можно получить 3300 кг, что может удовлетворить потребность в зерновых более 34 чел. (при годовой потребности в зерновых 96 кг/чел.¹⁵). При точном высеве 107 га будут обработаны за 6,7 дня вместо 8.

Самый низкий уровень коэффициента рабочих ходов МТА (52,3%) наблюдали на неровном и очень

маленьком участке 10.4, на котором длины рабочих проходов МТА короткие и, соответственно, выше доля холостого хода. Это означает, что менее 60% было потрачено на продуктивные ходы. В целом на участках 10.4 и 10.3 МТА продемонстрировал умеренный уровень производительности с соответствующими значениями 52,3 и 62%. Однако холостой ход по-прежнему значителен по причине сложной формы полей и относительно короткой длины хода. Значение находится в пределах, указанных в стандарте ASAE D497.7 (2011)¹⁶. Эксплуатационные характеристики выше на участках 11 (73,2%) и 13 (74,1%) с большей длиной гона, где у МТА были более длинные рабочие ходы (доля рабочих ходов выше холостых). Средневзвешенное значение коэффициента рабочих ходов МТА (66,9%) соответствует стандарту ASAE D497.7 (2011)¹⁷, но есть возможность его повышения.

Точность и согласованность МТА оценивали по статистическим показателям: среднему значению, стандартному отклонению и коэффициенту

Площадь незасеянных и повторно засеянных участков и коэффициент рабочих ходов МТА

Таблица 2

Unsown and resown area and the ratio of machine runs

Table 2

Параметр <i>Parameter</i>	Участок / Plot				Среднее значение, % <i>Average value, %</i>
	10.3	10.4	11	13	
Повторно засеянная площадь, (РР), % / Resown area, (RP), %	14,64	15,09	10,52	21,15	16,05
Незасеянная площадь (МР), % / Unseeded area (MP), %	2,34	3,75	1,27	2,51	2,38
Средняя длина гона, м / Average chase length, m	156,6	197,6	184,9	344,6	220,7
Коэффициент рабочих ходов (φ_{PO}), % / Run ratio (φ_{PO}), %	62,00	52,30	73,20	74,10	66,90

Таблица 3

Сводные статистические данные о точности посева на всех участках

Table 3

Summary statistics on sowing precision at all plots

Метрическая <i>Metric</i>	Участок / Plot			
	10.3	10.4	11	13
Количество измерений / Number of measurements	10	18	39	26
Средняя ширина захвата, см / Average working width, cm	550,0	551,90	568,10	514,70
Стандартное отклонение, см / Standard deviation, cm	114,60	104,0	60,20	124,10
Стандартная ошибка среднего значения / Standard error of the mean value	36,2	24,5	9,6	24,3
Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	20,80	18,90	10,60	24,10

¹⁴ Eritrea: ongoing research produces six high yield wheat varieties. ICARDA. [Electronic resource]. URL: <https://www.icarda.org/media/news/eritrea-ongoing-research-produces-six-high-yield-wheat-varieties> (accessed: 15.12.2023).

¹⁵ Отчет национального министерства сельского хозяйства за 2016 год. Planning and Statistics Division. Ministry of Agriculture Annual Report 2015. Asmara, 2016.

¹⁶ James Condra C. Influence of Planter Width, Planting Speed, and Perimeter-to-area Influence of Planter Width, Planting Speed, and Perimeter-to-area ratio on Field Efficiency for Row Crop Planters ratio on Field Efficiency for Row Crop Planters. 2017.

¹⁷ Там же.

вариации (табл. 3). Наилучшие результаты по посевному агрегату были получены на участке 11 (наименьшая стандартная ошибка среднего значения – 9,6, стандартное отклонение – 60,2 см, наименьший коэффициент вариации – 10,6%). Наибольшая вариация движения МТА была на участке 13 (стандартная ошибка среднего значения – 24,3 см, стандартное отклонение – 124,1 см, наибольший коэффициент вариации – 24,1%).

Статистический анализ показал высокий уровень превосходства сеялок с GPS-наведением в сравнении с обычным посевным агрегатом. Средняя ошибка GPS-наведения составляет 2,2 см, что отвечает агротехническим требованиям. Общая тестовая статистика $t_p = 7,02$ существенно больше критического значения $t_{кр} = 1,98$ для доверительной вероятности

0,05 и объема выборки $n = 100$, что указывает на значительную разницу.

Точность управления во многом зависит от скорости агрегата. По причине неправильной формы участков и чрезвычайно изменчивой топографии рабочая скорость МТА сильно варьировалась (2...20 км/ч) со средним и стандартным отклонением 10,66 и 4,84 км/ч соответственно (рис. 6).

При работе без навигационной системы для обеспечения допустимого диапазона варьирования рабочей ширины захвата $6,15 \pm 7$ см рекомендуемый диапазон рабочих скоростей составляет 10...12 км/ч. При использовании систем автоматизированного вождения рабочая скорость может быть увеличена до рекомендуемых изготовителем максимальных значений – до 15 км/ч.

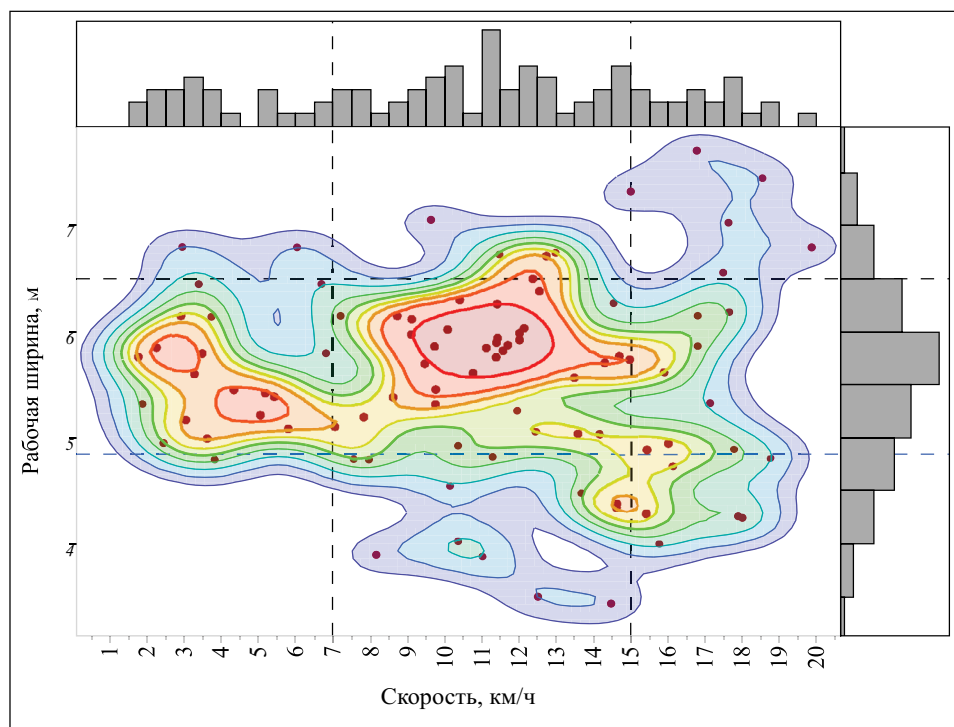


Рис. 6. Плотность контуров рабочей скорости в зависимости от рабочей ширины

Fig. 6. Density of working speed contours as a function of working width

Выводы

1. При посеве пшеницы в Эритрее пневматической сеялкой Nardi Dora без внедрения современных технологий навигации при вождении агрегата среднее отклонение от требуемого уровня равно 71 см, в результате чего площадь повторно засеянных участков составила около 17 га, площадей незасеянных пахотных земель – около 3 га.

2. Результаты статистического анализа показали высокий уровень превосходства сеялок с GPS-наведением в сравнении с обычным посевным агрегатом. Средняя ошибка GPS-наведения

составляет 2,2 см, что отвечает агротехническим требованиям. Общая тестовая статистика $t_p = 7,02$. Это существенно больше критического значения при доверительной вероятности 0,05 и объеме выборки $n = 100$, $t_{кр} = 1,98$, что указывает на значительную разницу.

3. При работе без навигационной системы для обеспечения допустимой точности вождения (варьирования рабочей ширины захвата $6,15 \pm 7$ см) рекомендуемый диапазон рабочих скоростей составляет 10...12 км/ч. При использовании систем автоматизированного вождения рабочая скорость может составлять 15 км/ч.

4. Коэффициент рабочих ходов МТА значительно варьировался на участках (52,3...74,1%): наименьшее значение наблюдали на участке 10.4, (длина гона – 197,6 м), наибольшее – на участке 13 (длина гона – 344,6 м). Среднее значение коэффициента рабочих ходов МТА (66,9%) при средней длине гона составляет 220,7 м.

5. Для повышения точности посевных работ и эффективного расхода ресурсов, повышения производительности машин и урожая необходимо внедрение передовых автоматизированных технологий.

Список источников / References

1. Shinnars K.J. Engineering principles of silage harvesting equipment. *Silage Science and Technology*. 2003;42:361-403.
2. Sharaby N., Doroshenko A., Butovchenko A., Legkonogih A. A comparative analysis of precision seed planters. *E3S Web of Conferences*. 2019;135:01080. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501080>
3. Laryushin N.P., Shukov A.V., Kiryukhina T.A., Yashin A.V. Innovative seed planter implements for resource-saving sowing technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;953:012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/953/1/012012>
4. Srivastava A. et al. Engineering principles of agricultural machines. Second edition. Peg McCann. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. 559 p.
5. Yuzenko Y.A., Tarkivsky V.E., Ivanov A.B. et al. Method for assessing the performance of agricultural machinery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022;1045:012086. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1045/1/012086>
6. Li Y., Zhao B., Zhang W. et al. Evaluation of agricultural machinery operational benefits based on semi-supervised learning. *Agriculture (Switzerland)*. 2022;12(12):2075. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122075>

Информация об авторах

- ¹Медхн Тесфит Асрат, аспирант; noahtesas@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>; SPIN-код: 9344-9472, AuthorID: 1264463
- ²Левшин Александр Григорьевич, д-р техн. наук, профессор; alevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>; SPIN-код: 1428-5710, AuthorID: 366502
- ³Теклай Симон Гебрехивет, магистрант; gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>
- ^{1,2}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
- ³Колледж сельского хозяйства, потребительских и экологических наук, Университет штата Нью-Мексико; Лас-Крусес, NM 88003-8001, США

Author Information

- Tesfit A. Medhn¹, postgraduate student; noahtesas@gmail.com[✉]; <https://orcid.org/0009-0002-4371-13233>
- Aleksandr G. Levshin², DSc (Eng), Professor; alevshin@rgau-msha.ru; <http://orcid.org/0000-0001-8010-4448>
- Simon G. Teklay³, MSc student, gtsimon1994@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3336-0523>
- ^{1,2}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russia
- ³College of Agriculture, Consumer and Environmental Sciences, New Mexico State University; Las Cruces, NM 88003-8001, USA

Вклад авторов

Т.А. Медхн – проведение исследований, выбор методики исследований, обработка результатов, статистический анализ, визуализация, написание статьи и внесение изменений;
А.Г. Левшин – руководство проведением исследований, верификация данных, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
С.Г. Теклай – оказание помощи в проведении исследований и обработке результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 21.10.2024, после рецензирования и доработки 21.02.2025; принята к публикации 24.02.2025

Author Contribution

T.A. Medhn – investigation, research methodology, data curation, statistical analysis, visualization, writing – original draft, review and editing;
A.G. Levshin – supervision, data verification, writing – manuscript review and editing;
S.G. Teklay – investigation, data curation

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Received 21.10.2024; Revised 21.02.2025; Accepted 24.02.2025