

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА»

На правах рукописи

Медхн Тесфит Асрат

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ И ПОСЕВА ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ В
УСЛОВИЯХ ЭРИТРЕИ**

Специальность: 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Левшин Александр Григорьевич

Москва – 2025

Содержание

Введение	1
Глава 1: Анализ климата и производственных условий Эритреи	9
1.1. Географическое положение и агроклимат	9
1.2. Анализ скорости ветра и солнечных часов	12
1.3. Тип почвы	21
1.4. Структура сельскохозяйственного производства	22
1.5. Система земледелия в Эритрее	30
1.6. Механизация сельского хозяйства	33
1.7. Состав машинно-тракторного парка в Эритрея	37
1.8. Технологии производства зерна пшеницы	39
1.9. Технологические операции, выполняемые	40
в сельском хозяйстве Эритреи	40
1.10. Барьеры на пути эффективной механизации в Эритрее	47
1.11. Задачи исследования	49
Глава 2: Теоретические основы исследования	51
2.1. Обоснование оптимальной глубины и сроков посева	51
2.2. Теоретический анализ производительности машинно-тракторного агрегата	59
2.3. Анализ эффективного движения машинно-тракторного агрегата	73
2.4. Теоретический анализ точности работы МТА	76
2.5. Теоретический анализ производительности МТА в зависимости от	90
конфигурации поля	90
2.6. Анализ методов качественных измерений полевых операций	95
2.7. Анализ теоретического метода оптимального использования техники по	100
критерию минимальной продолжительности производственных процессов	100
2.8. Оптимизация маршрута движения сельскохозяйственной техники	102
Глава 3: Методологические основы исследований	106
3.1. Метод определения подходящих сроков сева в эритрейских хозяйствах	106
3.2. Метод проведения и анализа хронометражных наблюдений МТА	108
3.3. Метод анализа производительности МТА в зависимости от конфигурации поля	114
3.4. Метод оценки эксплуатационной точности движения пневматической сеялки	120

3.5. Методы оценки качества работы машинно-тракторных агрегатов.....	126
3.6. Оптимальное использование техники при одновременном выполнении производственных процессов	132
3.7. Оптимизация маршрутов для сельскохозяйственной техники с целью минимизации холостых поездок между полями и парками.....	136
Глава 4: Анализ результатов исследования.....	140
4.1. Метод определения подходящих сроков сева	140
4.2. Анализ хронометражных наблюдений за работой машинно-тракторных агрегатов	148
4.3. Влияние конфигурации поля на производительность МТА	163
4.4. Оценка точности работы пневматической сеялки.....	177
4.5. Методы оценки качества работы машинно-тракторных агрегатов.....	180
4.6. Оптимальное использование техники при одновременном выполнении производственных процессов:	196
4.7. Оптимизация маршрутов движения сельскохозяйственной техники	198
Заключение:	206
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	209
Приложение 1	224
Приложение 2	226
Приложение 3	227

Введение

Актуальность темы исследования. В настоящее время Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC) служит единственным поставщиком сельскохозяйственной техники как для государственных, так и для местных фермеров. Эта государственная корпорация производит различные сельскохозяйственные продукты, в первую очередь зерновые и домашний скот. Она управляет пшеничными полями на фермах Целот-Ади'гуадад и Халхале, применяя традиционные методы ведения сельского хозяйства. Полевые операции обычно выполняются традиционно, на основе методов маршрутизации, без каких-либо идей по улучшению. Слабые и сильные стороны операций не выявляются, поскольку отсутствует культура научной оценки любой операции.

Производительность машин - одна из важнейших базовых переменных для технологических операций. Практиков, похоже, не волнует ни качественный аспект полевых работ, ни производительность и эффективность используемых машин. Ни одно исследование еще не дало ценной информации о полевых работах и не выявило проблем управления и эксплуатации, которые препятствуют росту производительности. Операции выполняются без основы каких-либо надежных руководств или стандартов; скорее, они зависят от общих знаний и понимания операторов техники. Система полностью ориентирована на традиционные методы и не знает, можно ли повысить производительность даже при той же структуре управления.

Кроме того, ECLC обычно планирует посев пшеницы с учетом наступления сезона дождей, который обычно начинается в середине июня - июле. Учитывая, что почва глинистая и существует высокая вероятность того, что с началом лета дожди будут идти каждый день, это усложняет посевные работы или заставляет прибегать к традиционным методам посева, то есть к ручному высеву. В таких условиях, как в Эритрее (более короткий сезон дождей), посев является очень важной операцией. Ведь любая незначительная задержка в посевной может привести к частичной или полной

потере урожая. С другой стороны, культура, которая созревает на неделю или две раньше обычного сезона созревания, также может оказаться под угрозой потери урожая из-за дождей; таким образом, посев раньше обычного времени, просто наблюдая за осадками, также может быть риском. Поэтому для производства пшеницы в высокогорных районах Эритреи очень важно завершить посевную в оптимальное время. Определение критических дат посева помогает определить сроки выполнения других полевых операций, такие как основная обработка почвы и предпосевная обработка. Однако оптимальное распределение машин для подготовки поля (обработки почвы) и посева, исходя из размера поля и имеющихся ограничений по времени для выполнения конкретных операций, упускается из виду (ему уделяется мало внимания). Эта проблема часто связана с непредсказуемым характером осадков, что приводит к задержкам в посеве или оставлению незасеянных участков.

Решение этих проблем путем оптимизации операций по обработке почвы и посеву, а также контроля качества полевых работ может оказать значительное влияние на производительность сельского хозяйства и продовольственную безопасность Эритреи.

Степень разработанности проблемы

Анализ производительности машинно-тракторных агрегатов является ключевой областью исследований на протяжении многих лет, изучаемых различными исследователями: Н.В. Краснощеков, Ю.К. Киртбая, А.Н. Скороходов, А.А. Зангиев, О.Н. Дидманидзе, Н.И. Верещагин, А.Г. Левшин, В.А. Смелик, Л.Е. Агеев, К.С. Орманджи, A. Srivastava et al., P.I. Miu, H.D. Kutzbach; L.M. Griffel et al.; A. Janulevičius et al.; D.S. Paraforos, R. Hübner, H.W. Griepentrog. Точность вождения сельскохозяйственной техники значительно повысила эффективность сельскохозяйственных работ: К.С. Орманджи, И.Г. Смирнов, V. I. Adamchuk, P. J. Jasa; J. Conesa-Muñoz, G. Pajares, A. Ribeiro; R. D. Grisso et al.; Y. Li et al.; M. A. Munna et al.; T. Oksanen; T. Parsons et al.; E. Rodias et al.; E. Šarauskis et al.; G. Scott; N. Sharaby et al.;

J. Turan et al.; A. Utamima, T. Reiners; S. S. Virk et al.; L. Xiong et al.; J. Xu et al.; Y. A. Yuzenko et al.; Y. Zhang, Y. Hu, Y. Xu. Однако использование простого мобильного приложения для анализа точности работы машинно-тракторных агрегатов на удаленных сельскохозяйственных полях, где нет доступа к интернету и не используются современные системы наведения с корректорами, несмотря на низкую стоимость, изучено не полностью.

Влияние рельефа на производительность посевных машинно-тракторных агрегатов с учетом препятствий и других особенностей поля рассматривалось различными авторами: А. А. Зангиев, А. Н. Скороходов; M. O. Ale, S. I. Manuwa, O. Olukunle; S. A. Badua et al.; L. Benos et al.; E. M. Brandelero et al.; D. Demetriou et al.; L. M. Griffel et al.; S. Ivančan et al.; A. Janulevičius et al.; S. Kirkegaard Nielsen et al.; S. Matsuura; D. C. Montgomery; T. Oksanen; P. Toscano et al.; Y. Wang et al.; C.-W. Wu et al. Однако из-за вариативности полевых условий необходимы дальнейшие исследования. Анализ качества обработки почвы и посева был широко исследован: А. А. Зангиев, О.Н. Дидманидзе, А. Н. Скороходов; E. M. Brandelero et al.; L. Xiong, S. Sun, M. Xiao; J. Turan et al. Однако анализ в реальном времени для принятия решений - определения необходимости дополнительной обработки почвы или продолжения запланированных операций - остается недостаточно изученным.

Цель исследования: Повышение эффективности механизированных сельскохозяйственных работ за счет улучшения качества работ и увеличения производительности машин.

Задачи исследования

1) Проанализировать природно-климатические условия и эффективность механизированных сельскохозяйственных работ и определить основные направления развития по улучшению качества и повышению производительности машинно-тракторных агрегатов.

2) Оценить влияние характеристик поля на производительность МТА с целью

выработки рекомендаций по проектированию геометрии полей, повышающих эффективность выполнения механизированных работ за счет улучшения маневренности и снижения эксплуатационных затрат;

3) Определить оптимальные сроки выполнения основной и предпосевной обработки почвы и посева для южных и центральных регионов Эритреи с учетом климатических характеристик;

4) Проанализировать точность высева сеялкой Nardi Dora Air и определить частоту повторения и пропусков посева. Обосновать рекомендации по повышению точности посева за счет цифровых технологий. сравнении с современной;

5) Оценить качество основной и предпосевной обработки почвы и процесса посева для южных и центральных регионов в Эритрее и разработать рекомендации по повышению качества;

6) Оптимизация использования техники для одновременного выполнения производственных процессов, обеспечивающая комплексное выполнение всех задач в кратчайшие сроки;

7) Разработка и внедрение стратегий оптимизации маршрутов для сельскохозяйственной техники с целью минимизации холостого пробега при сохранении производительности техники на различных полевых операциях.

Объектом исследования являются машинно-тракторные агрегаты (МТА) для выполнения сельскохозяйственных работ.

Предмет исследования - оценка точности вождения, скорости работы и оптимизации глубины посева для машинно-тракторных агрегатов с учетом таких факторов, как неровность почвы, полевые препятствия и условия рельефа, а также качественный анализ работы МТА.

Научная новизна исследования заключается в разработке методики контроля точности вождения МТА с использованием цифровой карты поля, мобильного приложения к смартфону для позиционирования машинно-тракторных агрегатов в системе ГИС на удаленных сельскохозяйственных полях. Для условий фермы Целот-

Ади'Гвадад Эртреи разработана бальная система оценки качества механизированных работ для основной и предпосевной обработки почвы и посева зерновых; обоснованы агротехнические ограничения для рабочей скорости посева. Предложена оригинальная система анализа и оптимизации маршрута движения МТА, позволяющая уменьшить холостые переезды.

Теоретическая значимость – Данное исследование развивает теоретические представления о точном земледелии, представляя недорогой, основанный на мобильном приложении подход для оценки точности машинно-тракторных агрегатов в удаленных районах, где нет доступа к интернету или современных корректоров наведения. Это устраняет пробел в доступных технологиях точного земледелия. Кроме того, в исследовании уточняются существующие модели взаимодействия машины и трактора путем анализа того, как неровности почвы, полевые препятствия и различные условия местности влияют на точность высева, что расширяет знания о механических и экологических факторах, влияющих на производительность и качество высева. Кроме того, определяя оптимальные рабочие скорости с помощью экспериментов на конкретных полях в условиях Эритреи, данное исследование обогащает теоретические модели эффективности машин в полувлажных условиях, поддерживая адаптацию точного земледелия к различным агроклиматическим условиям.

Практическая значимость работы. Практическая значимость исследования заключается в его непосредственном применении для повышения производительности МТА, особенно в отдаленных сельскохозяйственных районах с ограниченной технологической инфраструктурой. Внедрение недорогого мобильного приложения для оценки точности машинно-тракторных агрегатов предоставляет фермерам и агрономам доступный инструмент для оценки производительности, снижая зависимость от дорогостоящих систем наведения. Уточненное понимание неровностей почвы, препятствий на поле и изменчивости рельефа позволяет лучше настроить и отрегулировать машины, что ведет к повышению точности и эффективности посева.

Кроме того, определение оптимальной рабочей скорости для условий Эритреи позволяет фермерам повысить качество выполнения технологических операций, увеличить производительность, минимизируя расход топлива.

Методология и методы исследования: Полевые эксперименты проводились в соответствии с установленными научными принципами и стандартными процедурами. Методика включала в себя проведение полевых наблюдений, хронометражные измерения и сбор соответствующих пространственных данных, связанных с полем, с использованием современных инструментов, таких как мобильные приложения и GPS-устройства. Кроме того, полевые наблюдения проводились через несколько дней после посева для подтверждения пространственных данных, полученных в ходе эксперимента. Для поддержки исследования также были собраны дополнительные данные, включая историческую климатическую, почвенную и сельскохозяйственную информацию. Для обработки и анализа собранных данных использовалось статистическое программное обеспечение, такое как JMP Trial, а также инструменты пространственного анализа, такие как ArcGIS и другие прикладные программы, написанные на языке программирования Python.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод обоснования сроков сева и минимизации сроков выполнения комплекса механизированных работ машинно-тракторными агрегатами (МТА);
2. Метод анализа влияния конфигурации поля и топографических особенностей на производительность сеялки;
3. Метод оценки точности движения пневматической сеялки;
4. Результаты оценки качества работы машинно-тракторных агрегатов на комплексе операций;
5. Методика оптимизации маршрутов движения сельскохозяйственной техники с целью минимизации холостых поездок между полями и парками.
6. Методика статистического обоснования параметров качества технологического

процесса на примере глубины посева.

Степень достоверности – исследования основаны на результатах экспериментальных исследований, которые проводились с использованием хорошо известных математических моделей. Теоретическая основа исследования базируется на общепризнанных достижениях как фундаментальных, так и прикладных научных дисциплин, обеспечивая прочную базу для анализа. Экспериментальная составляющая еще более усиливается благодаря включению статистических данных из авторитетных источников, таких как национальное министерство сельского хозяйства, что подкрепляет выводы и повышает достоверность результатов. Кроме того, методы, использованные в исследовании, тщательно протестированы и проверены с помощью расчетов, адаптированных к конкретным задачам исследования. Внедрение рекомендаций, полученных в результате данного исследования, может значительно повысить эффективность и производительность машинно-тракторных агрегатов (МТА), что в конечном итоге будет способствовать достижению более широкой цели – увеличению сельскохозяйственного производства и поддержке устойчивых методов ведения сельского хозяйства.

Внедрение результатов исследования. Результаты исследования, способны значительно улучшить эффективность использования машинно-тракторных агрегатов в производственных условиях фермерских хозяйств Эретреи. Интегрируя передовые аналитические методы и современные технологические решения, исследование направлено на оптимизацию эффективности, точности и производительности МТА. Внедрение этих результатов может привести к существенному улучшению традиционных операций МТА, способствуя более устойчивому и точному ведению сельского хозяйства в Эритрее.

Использование результатов исследования в учебном процессе повысит качество теоретической и практической подготовки выпускников Инженерного и технологического колледжа Майнефи, Асмэра, Эритрея

Апробация работы. Материалы исследований по теме диссертации докладывались на международных научных конференциях: научно-практической конференции, посвященный 90-летию Шарова Николая Михайловича «Анализ эффективности сеялки с использованием данных мобильного отслеживания: ферма целот, эритрея», (г. Москва, 2024 гг.); Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича «Оценка производительности техники при посеве пшеницы по равномерности распределения растений на ферме «целот», эритрея» (г. Москва, 2024 гг.); Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича «Evaluating the Performance of Wheat Drills by Seed Distribution Metrics: Case of Tselot Farm, Eritrea» (г. Москва, 2024 гг.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева «Анализ взаимосвязи между мощностью и шириной захвата жатки и эффективности автоматизации рабочего процесса зерноуборочного комбайна» (г. Москва, 2023 гг.); Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева «Analyzing some design and performance parameters of a combine harvester in terms of its automation» (г. Москва, 2023 гг.); научно—практической конференции с международным участием «Наука без границ и языковых барьеров» «Анализ условий и технологий выращивания зерновых в Эритрее» (г. Орёл, 2023 гг.).

Публикации результатов исследования. По материалам диссертационной работы опубликовано 10 научных статей, из них 2 в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 публикация в изданиях, рецензируемых Scopus, 6 публикаций на научных конференциях и 1 публикация в рецензируемых научных изданиях.

Структура и объем работы. Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав основной части, заключения, списка. Диссертация изложена на 230 страницах. Текст включает введение, основную часть (содержит 46 таблиц и 107 рисунков), заключение, список литературы (145 наименований) и 3 приложения.

Глава 1: Анализ климата и производственных условий Эритреи

1.1. Географическое положение и агроклимат

Эритрея служит мостом между остальной Африкой, Ближним Востоком и странами Персидского залива. Она расположена на Африканском Роге между 120 22' и 180 02' северной широты и 360 26' и 430 13' восточной долготы. Граничит с Красным морем на востоке, Суданом на западе, Эфиопией на юге и Джибути на юго-востоке. При общей географической площади 124300 км² Эритрея имеет береговую линию (материковое побережье), протянувшуюся на 1900 км вдоль ключевого морского и нефтяного пути через Красное море, соединяющего Средиземное море с Индийским океаном. Рельеф, количество осадков и климат страны разнообразны, высота над уровнем моря колеблется от 60 метров до более чем 3000 метров [57].

В различных статьях климат Эритреи подразделяется на разные классы, однако, несмотря на разные способы выражения, они передают одну и ту же информацию. Климат Эритреи варьируется от жаркого и засушливого вдоль Красного моря до умеренного в высокогорьях и субгумидного в отдельных микрорайонах восточного уступа. Большая часть территории страны (70%) классифицируется как жаркая или очень жаркая со среднегодовой температурой более 27°C; около 25% классифицируется как теплая или умеренная со среднегодовой температурой около 22°C; а остальные районы (5%), которые классифицируются как прохладные, имеют среднегодовую температуру менее 19°C [57]. Другими словами, Эритрея - это в основном тропическая пустыня на побережье и на восточной равнине, умеренная полувлажная зона в горных районах и тропическая полувлажная зона на юго-западе [90, 95]. Агроэкологически Эритрея классифицируется на шесть основных зон, а именно: влажное нагорье, засушливое нагорье, влажная низменность, засушливая низменность, полупустыня и субгумид [57, 96].

От северо-западных низменностей до юго-западных общая годовая сумма осадков увеличивается от 200 мм до 700 мм и более. Кроме того, интенсивность

осадков увеличивается с высотой над уровнем моря. На восточном уступе в некоторых местах выпадает больше осадков, чем на прибрежных низменностях, которые чрезвычайно сухие. Что касается площадей, на которых выпадают различные осадки, то примерно 50% территории страны получает менее 300 миллиметров осадков в год, 40% - от 300 до 600 мм, а 10% - более 600 мм [91].

На северном побережье Красного моря выпадает в среднем 180 миллиметров осадков в год, в то время как на южном побережье - 60 миллиметров. Благодаря высоте над уровнем моря и умеренному количеству осадков в центре и на юге горного пояса Эритреи, идущего с севера на юг, климат мягкий, тогда как на севере страны - пустынный. Ежегодно выпадает в общей сложности 500 мм осадков; с октября по март дождей почти не бывает, а с апреля по июнь и снова в сентябре - несколько кратковременных ливней. В некоторых горных районах к северо-востоку от Асмары есть леса, которые получают больше осадков и, соответственно, более зеленые.

Климат западного региона Эритреи - пустынный на севере и полупустынный или полусасушливый на юге, с некоторыми дождями, выпадающими с июня по сентябрь из-за летнего муссона. В Агордате, расположенном в юго-центральной части региона, ежегодно выпадает 260 миллиметров осадков, в основном с июня по сентябрь.

На юго-западе страны все еще сохраняется пустынная местность, хотя летние ливни здесь случаются чаще и приносят более 600 миллиметров осадков в год. Тропические штормы с Аравийского моря могут обрушиваться на крайний юг Эритреи (Ассаб), но это происходит реже и с меньшей силой, чем в Сомали и Йемене, поскольку циклоны обычно теряют силу по мере приближения к Аденскому заливу. Тем не менее, остатки циклонов иногда проникают сюда и вызывают проливные дожди, как это было с тропическим штормом 1А в мае 1984 года и циклоном Сагар в мае 2018 года. С мая по декабрь могут возникать циклоны, однако в начале сезона (май-июнь) они встречаются чаще, чем в конце (октябрь-декабрь) [52].

Эритрея уязвима к изменению климата, и это негативно сказывается как на морских, так и на наземных экосистемах. За последние 60 лет температура повысилась примерно на $1,7^{\circ}\text{C}$, что оказало огромное влияние на потерю биоразнообразия, повышение уровня моря и обесцвечивание кораллов из-за повышения температуры морской воды, снижение производства продуктов питания, потерю биоразнообразия и общую потерю устойчивости экосистемы. Большая часть территории Эритреи относится к жаркому пустынному климату (BWh), а небольшая ее часть (центральное и южное нагорье) к жаркому полупустынно-полупустынному климату (BSh). Климатический класс Эритреи, основанный на методах классификации климата Коппена-Гейгера [51] (рис. 1.1). Изменение распределения средней приземной температуры воздуха за последние 30 летние периоды (1951-1980; 1971-2000 и 1991-2020) приведены на рисунке 1.2 [51].

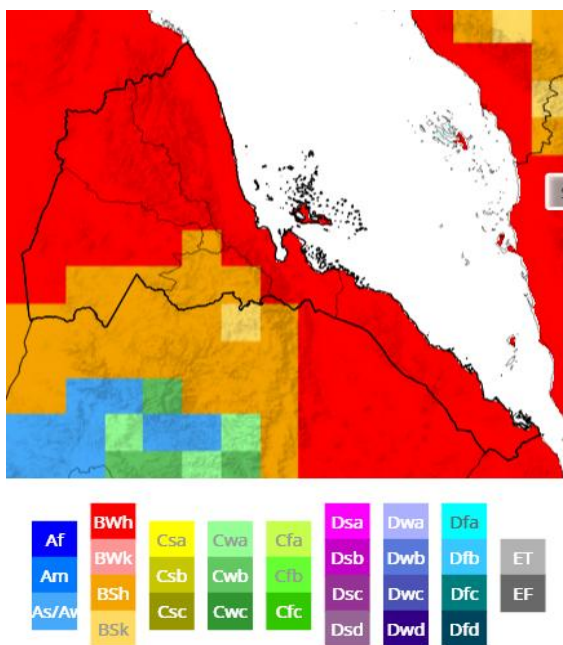


Рисунок 1.1 Климатический класс Эритреи

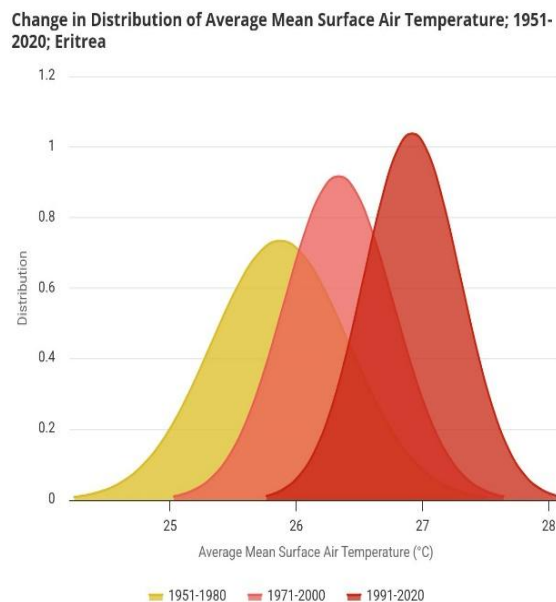


Рисунок 1.2 Изменение распределения средней приземной температуры воздуха

Средняя приземная температура воздуха по десятилетиям (в годовом исчислении), 1971-2020 приведена на рис. 1.3 [51]. Изменчивость и тенденции средней приземной температуры воздуха по сезонному циклу, 1951 - 2020 гг. приведены на рисунке 1.4 [51].

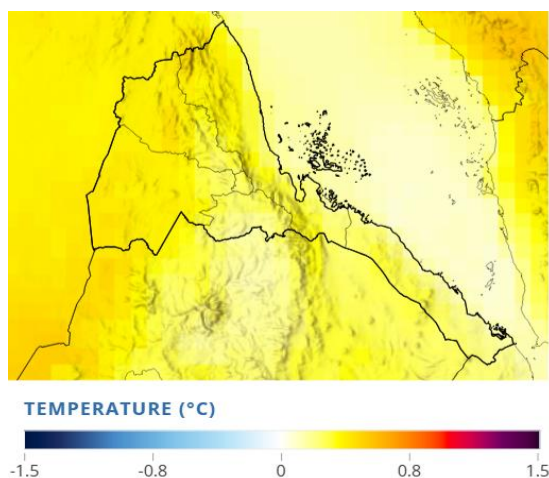


Рисунок 1.3 Средняя приземная температура воздуха по десятилетиям

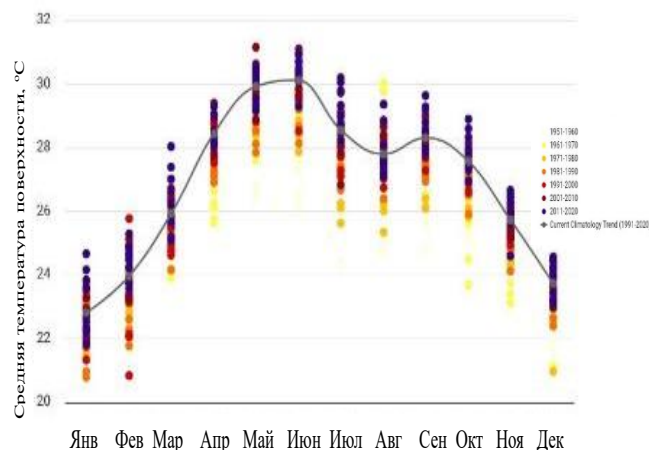


Рисунок 1.4 Изменчивость и тенденции средней приземной температуры воздуха по сезонному циклу

Наблюдательные исторические данные подготовлены Отделом климатических исследований Университета Восточной Англии. Данные представлены с разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (50 км x 50 км).

1.2. Анализ скорости ветра и солнечных часов

Климатические данные были получены из Министерства сельского хозяйства Эритреи и национальной метеорологической станции, расположенной в международном аэропорту в Асмаре, Эритрея. В Эритрее Сложно получить исторически достоверные данные о климате на месте. Однако, по крайней мере, Национальный институт сельскохозяйственных исследований (NARI) и международный аэропорт в Асмаре регистрировали указанные выше температуру, скорость ветра, часы солнечного сияния и другие климатические переменные. Эти учреждения предоставили исчерпывающие данные, необходимые для анализа региональных погодных условий и их влияния на сельское хозяйство. Данные, собранные из этих источников, включают данные по различным регионам страны, достоверные части которых были отобраны для анализа в данном разделе.

Однако из-за нехватки данных анализ этих переменных в этих регионах будет

ограничен. Национальный институт сельскохозяйственных исследований (NARI) расположен там, где находится Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC), а международный аэропорт Асмэры находится менее чем в километре от фермы Целот-Ади'Гвадад. Таким образом, данные представляют собой точные сведения о местоположении.

NARI, основанный в 2003 году, является национальным сельскохозяйственным научно-исследовательским институтом, расположенным в 35 км от Асмэры на широте $15,5^{\circ}$ северной широты, долготе $38,9^{\circ}$ восточной долготы и высоте около 2200 м над уровнем моря в Халхале, Эритрея. Институт был создан для расширения исследований в области сельского хозяйства и развития в Эритрее, сменив предыдущий Департамент сельскохозяйственных исследований и развития человеческих ресурсов. Институт уделяет особое внимание улучшению урожая, управлению природными ресурсами и животноводством, а также сельскохозяйственной инженерии для удовлетворения национальных сельскохозяйственных потребностей. С момента своего открытия он ставит перед собой задачу повышения производительности сельского хозяйства и продовольственной безопасности посредством прикладных исследований и сотрудничества с международными организациями по сельскохозяйственным исследованиям и играет важную роль в расширении прав и возможностей эритрейцев и улучшении условий жизни местных фермеров, несмотря на ограниченность средств.

В анализируемом регионе климат от теплого до жаркого, с относительно стабильными температурами, о чем свидетельствует низкое стандартное отклонение как максимальной, так и минимальной температур. Средняя максимальная температура составляет $23,48^{\circ}\text{C}$, в то время как минимальная составляет в среднем $20,18^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о незначительных колебаниях температуры (табл. 1.1). Продолжительность солнечного сияния относительно высока и составляет в среднем 7,73 часа в сутки, хотя и колеблется от 1,14 до 10,48 часов, главным образом из-за

облачного покрова. Скорость ветра, как правило, низкая и стабильная, в среднем составляет 1,77 м/с, что указывает на минимальный эффект охлаждения, обусловленный ветром (рис. 1.5 и 1.6;).

Таблица 1.1. Сводная статистика максимальной и минимальной температуры, скорости ветра и продолжительности солнечного сияния в NARI

Показатель	Температура, °C		Часы солнечного света, час	Скорость ветра, м/с
	Минимум	Максим		
Максимальная температура	23,48	36,62	10,48	2,65
Минимальная температура	15,94	29,30	1,14	1,02
Среднее	20,18	33,12	7,73	1,77
Стандартное отклонение	2,70	2,33	1,82	0,31
Стандартная ошибка среднего	0,78	0,67	0,12	0,02
Верхняя граница 95% среднего	21,89	34,60	7,96	1,81
Нижняя граница 95% среднего	18,47	31,64	7,49	1,73
Количество измерений	12	12	236	272

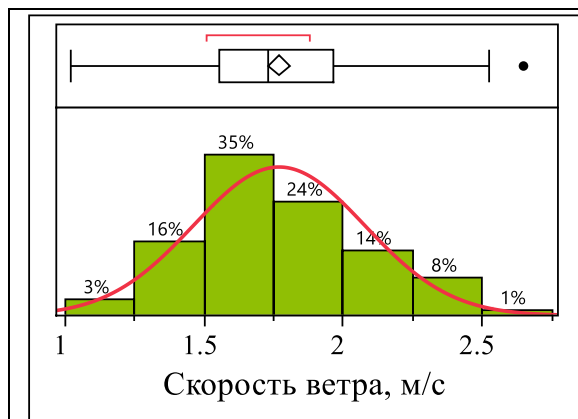


Рисунок 1.5 Скорость ветра м/с

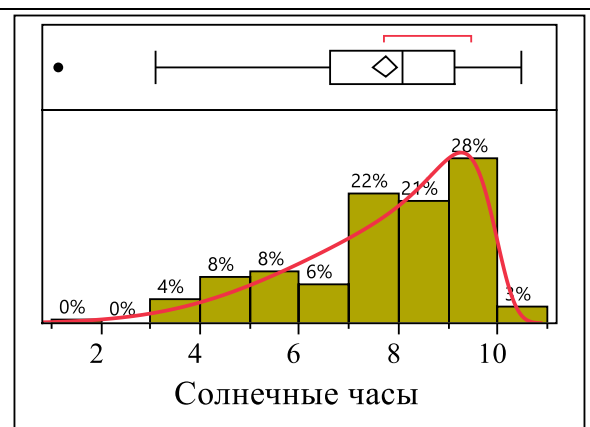


Рисунок 1.6 Солнечные часы

Эти характеристики указывают на преимущественно теплую окружающую среду с достаточным количеством солнечного света и низкой активностью ветра, что может повлиять на продуктивность сельского хозяйства, энергоэффективность и комфорт людей.

Временной ряд скорости ветра: с помощью программы JMP Trial был

проведен анализ временных рядов для наблюдения за тенденцией и сезонностью скорости ветра во времени. При анализе временных рядов для проверки того, являются ли данные стационарными или нет, используется следующая гипотеза:

1. Нулевая гипотеза (H_0): Временной ряд нестационарен.
2. Альтернативная гипотеза (H_1): Временной ряд нестационарен.

Чтобы выбрать подходящую модель теста ADF, сначала изучите график временного ряда. Если ряд не имеет дрейфа или тренда, используйте модель нулевого среднего, хотя она редко применима в реальных данных. Если ряд колеблется вокруг постоянного среднего значения без тренда, лучше всего использовать модель единичного среднего. Однако если данные демонстрируют тенденцию к росту или снижению с течением времени, следует использовать модель тренда.

В качестве модели использовалось простое скользящее среднее для 5-летнего окна (рис. 1.7)

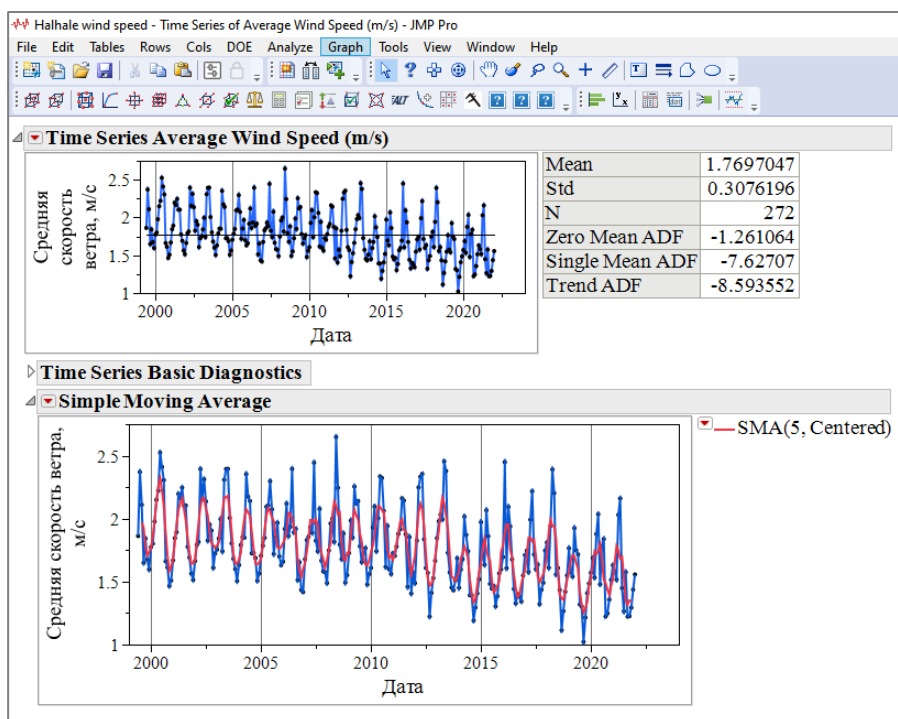


Рисунок 1.7 Суточная скорость ветра (м/с), зарегистрированная на станции NARI за 1999-2022 гг. (синяя линия — исходные данные, красная линия — 5-дневное среднее скользящее среднее)

Анализ временных рядов скорости ветра (в м/с) позволяет получить несколько ключевых сведений о ее статистических свойствах и стационарности. Средняя скорость ветра составляет 1,77 м/с, что указывает на умеренные ветровые условия в наблюдаемом месте. Изменчивость, отражаемая стандартным отклонением, относительно невелика и составляет 0,31 м/с, что свидетельствует о минимальных колебаниях относительно среднего значения. Набор данных включает 272 наблюдения, что обеспечивает достаточный объем выборки для надежной статистической интерпретации.

Тесты на стационарность с использованием расширенного метода Дики-Фуллера (ADF) позволяют получить более подробную информацию о поведении рядов данных о скорости ветра. Если учитывать одно среднее значение, статистика ADF падает до -7,63 (критическое значение при 5% уровне значимости = -2.88 [19, 28, 60], что значительно ниже критического значения, подтверждая стационарность. Кроме того, включение тренда дает статистику ADF, равную -8,59 (критическое значение при 5% уровне значимости = -3.43 [19, 28, 60], что подтверждает стационарность ряда при учете детерминированного тренда.

В заключение отметим, что данные о скорости ветра демонстрируют умеренную изменчивость и становятся стационарными, когда в анализ включается среднее значение или тенденция, что указывает на наличие базовых детерминированных тенденций в наборе данных.

Хотя солнечные часы в международном аэропорту Асмары отсутствуют, разница в солнечных часах с Халхале невелика. Распределение скорости ветра (А) и анализ временных рядов (Б) представлены в Рисунок 1.8.

Сводные статистические данные анализа, скорости ветра, и относительной влажности представлены в Таблица 1.2.

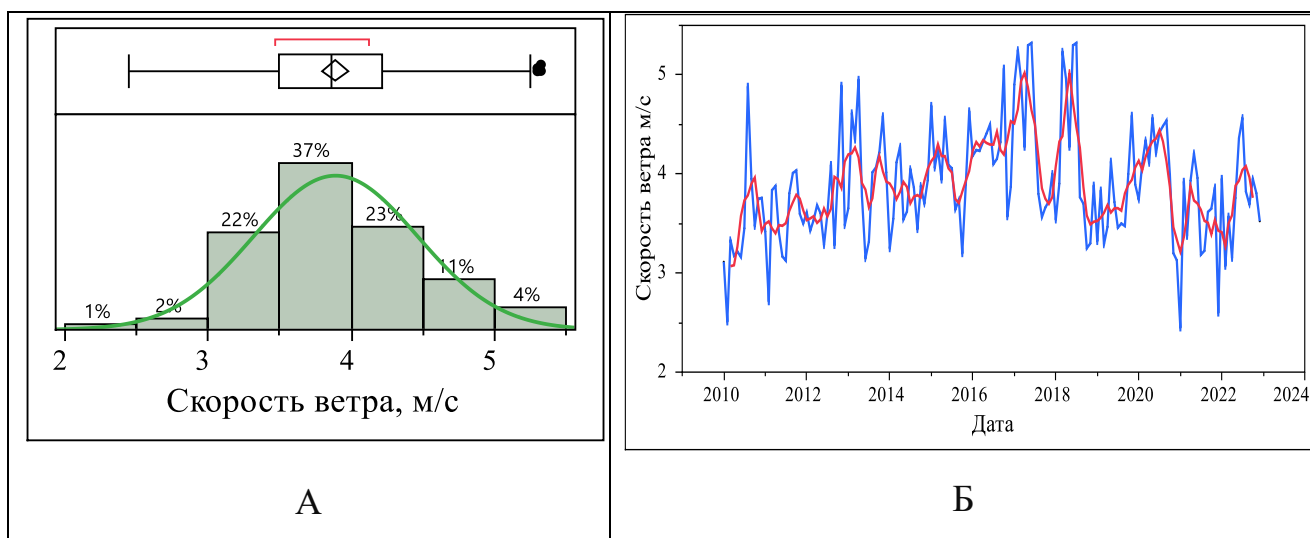


Рисунок 1.8 Скорость ветра, зарегистрированная на станции Асмэра за гг.1999-2022
(А) распределение и (Б) временной ряд
(синяя линия — исходные данные, красная линия — 5-дневное среднее скользящее среднее)

Распределение и временной ряд для относительной влажности воздуха (ОВ, %), зарегистрированной в 1999-2022 годах, приведены на рис. 1.9.

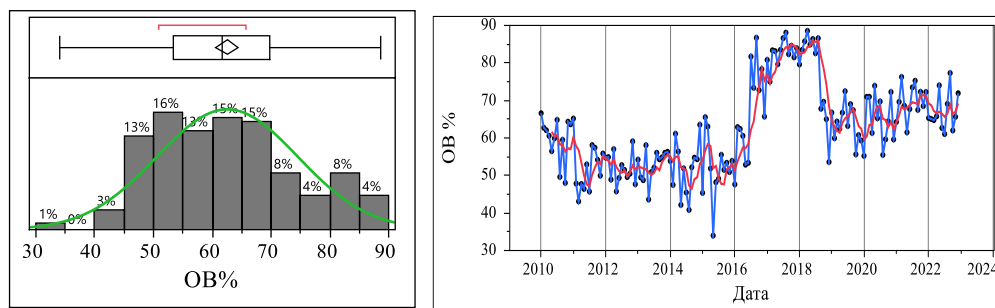


Рисунок 1.9 Относительная влажность, зарегистрированная в 1999-2022 годах
(синяя линия - исходные данные, красная линия - 5-дневное скользящее среднее).

Анализ временных рядов климатических параметров станции позволяет получить ценную информацию о скорости ветра и относительной влажности воздуха. Средняя скорость ветра составляет 3,89 м/с, характеризуется низкой изменчивостью (стандартное отклонение составляет 0,57 м/с), что отражает относительно стабильный характер ветра. Между тем, средняя относительная влажность воздуха составляет 62,55% с умеренной изменчивостью (стандартное отклонение составляет 11,93%), что указывает на меняющиеся, но в целом умеренные условия влажности.

Таблица 1.2. Сводка результатов анализа временных рядов скорости ветра и относительной влажности воздуха на станции

Параметры	Скорость ветра, м/с	ОВ%	критическое значение при 5% уровне значимости [19, 28, 60]
Среднее значение	3,89	62,55	
Стандартное отклонение	0,57	11,93	
Количество наблюдений	156	156	
Нулевое среднее значение ADF	-0,85	-0,73	-1.95
Единичное среднее значение ADF	-7,16	-4,42	-2.89
Трендовый ADF	-7,16	-5,43	-3.45

Анализ стационарности, выполненный с использованием расширенного теста Дикки-Фуллера (ADF), показал, что данные временных рядов являются стационарными (значение h_0 отклонено). Нулевое среднее значение скорости ветра и относительной влажности превышает критические пороговые значения, что подтверждает наличие трендов или сезонных эффектов. Учитываются единичные средние значения или компоненты тренда; значения ADF значительно ниже критического значения на уровне значимости 5%, что свидетельствует о стационарности данных (табл.1.2).

В целом, результаты показывают, что климатические переменные станции демонстрируют долгосрочные закономерности и тенденции, которые влияют на их поведение с течением времени. Эти результаты подчеркивают важность устранения тенденций или корректировки с учетом сезонности при моделировании или прогнозировании этих параметров. Наблюдаемая изменчивость относительной влажности также подчеркивает динамичный характер климатических условий на станции, что следует учитывать при проведении будущих анализов или оперативном планировании.

Распределение осадков в каждой зоне страны показано на рисунке (Рис. 1.10). Здесь показано среднеемесячное количество осадков (мм), которому должны соответствовать минимальное количество осадков и количество дней, необходимых для успешного выращивания сельскохозяйственных культур. Большая часть

сельскохозяйственного производства зависит от такого распределения среднемесячного количества осадков. Это среднемесячное количество осадков за период с 1992 по 2020 год. Это количество может колебаться в разные годы.

Количество осадков в Эритрее практически соответствует аналогичной схеме, с повторяющимися пиками и минимальными значениями почти через равные промежутки времени. Поэтому для проверки сезонности осадков был проведен анализ временных рядов. Данные были проверены на стационарность и сезонность. Скорректированная модель сезонного экспоненциального сглаживания для общего количества осадков, мм, показана на рисунке 1.11 (А), а автокорреляция - на рисунке 1.11 (Б). Таким образом, исходя из этого контекста, количество осадков проявляло сезонные характеристики (рис. 1.11 Б).

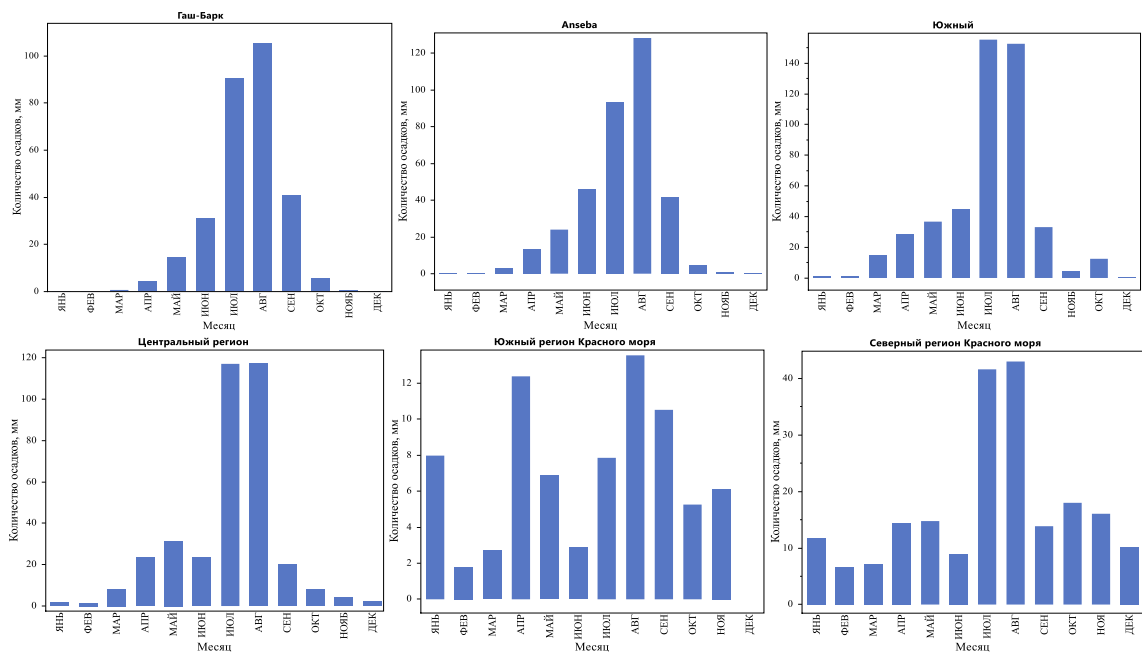


Рисунок 1.10 Региональное распределение среднемесячных осадков для регионов Ансеба, Гаши-Барка, Южного, Центрального, Северного и Южного Красного моря.

Среднее стандартное отклонение и стандартная ошибка данных составляют 1671 мм, 314 мм и 58,3 мм соответственно. Сезонность определяется путем оценки того, значительно ли отклоняются значения автокорреляции от нуля при определенных задержках. Задержки, которые выходят за пределы доверительных интервалов, указывают на наличие автокорреляции, тем самым указывая на сезонность.

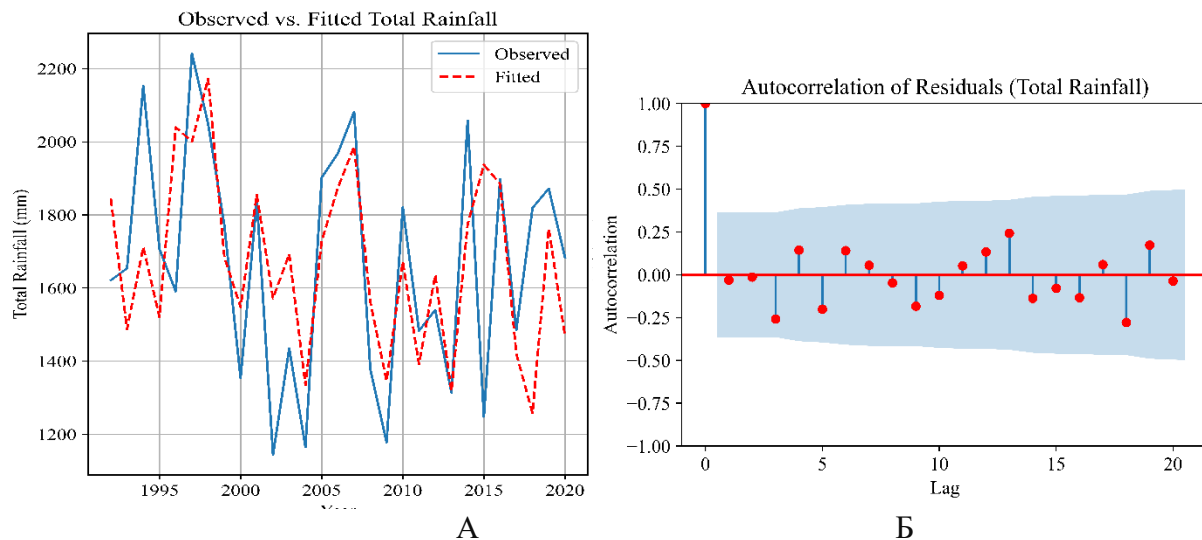


Рисунок 1.11 Установлены фактические и прогнозируемые значения общего количества осадков (мм/год) (А) и автокорреляция остаточных значений общего количества осадков (мм/год) (Б).

По результатам теста дополненного Дикки-Фуллера (ADF) для $N=29$, тестовая статистика для ADF одиночного среднего $(-5,26)$ и ADF тренда $(-5,28)$ более отрицательна, чем их соответствующие 5% критические значения $(-3$ для одиночного среднего и $-3,5$ для тренда). Это указывает на то, что мы можем отвергнуть нулевую гипотезу. Таким образом, временной ряд является стационарным на 5% уровне значимости, независимо от того, включена ли в него константа или тренд [28, 60, 19].

Среднее значение, средняя абсолютная погрешность (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE) составляют 1670,96 мм, 345,11 мм и 432,21 мм соответственно. По сравнению со средним значением общего количества осадков, значение MAE относительно невелико, что означает, что модель дает хорошие прогнозы в пределах разумного диапазона фактических значений. Соответственно, значение RMSE достаточно мало, что указывает на относительно более высокую точность прогноза модели. Визуально большинство пиков и спадов фиксируются в процессе прогнозирования; таким образом, на основе этих результатов можно с уверенностью прогнозировать будущие тенденции. На основании этого аргумента было спрогнозировано количество осадков на период до 2030 года (рис.1.12).

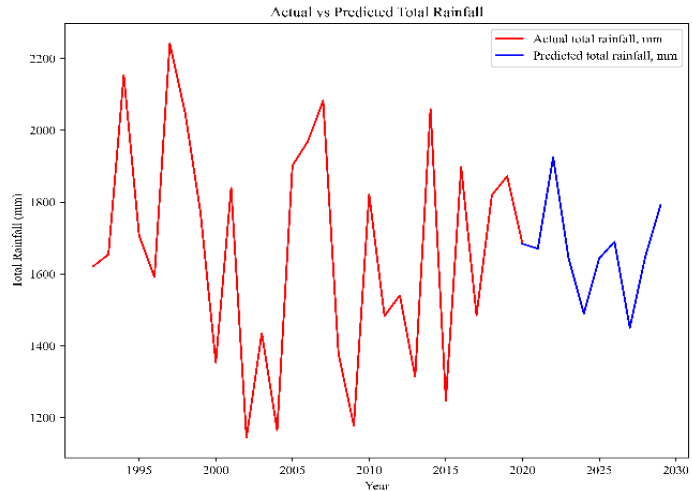


Рисунок 1.12 Фактическое общее количество осадков (мм/год) с соответствующими прогнозируемыми значениями до 2030 года

1.3. Тип почвы

Данные о почве были собраны по всей стране из министерства сельского хозяйства Эритреи. Данные о почве были предварительно обработаны (очищены, отсортированы и отфильтрованы в соответствии с требованиями). ArcGIS 10.7 использовался для разработки карты почв всей страны и исследуемой территории в частности. Рисунок 1.13 (А) показывает карту типа почвы и рисунок 1.13 (Б)

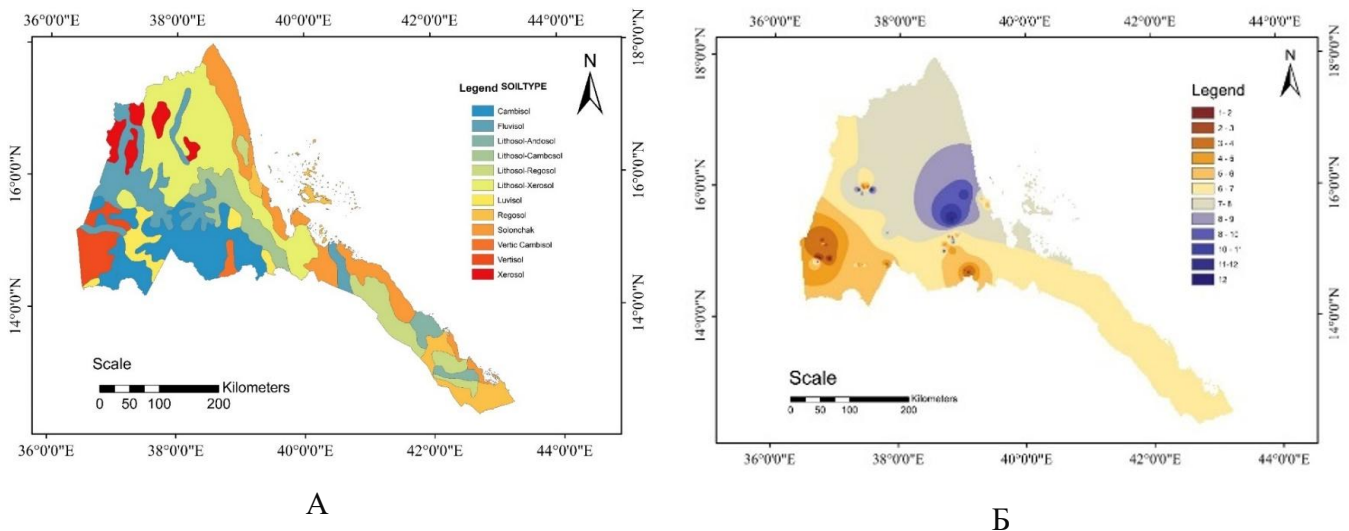


Рисунок 1.13 Карта типов (А) и структурного класса (Б) почв Эритреи

показывает класс текстуры почв Эритреи. Таблица 1.3 указывает стандартную

номенклатуру классов почв, % и текстурный код класса почвы Эритреи. Рисунок 1.14 показывает класс текстуры почв фермы Целот-Адигуэдад (место исследования).

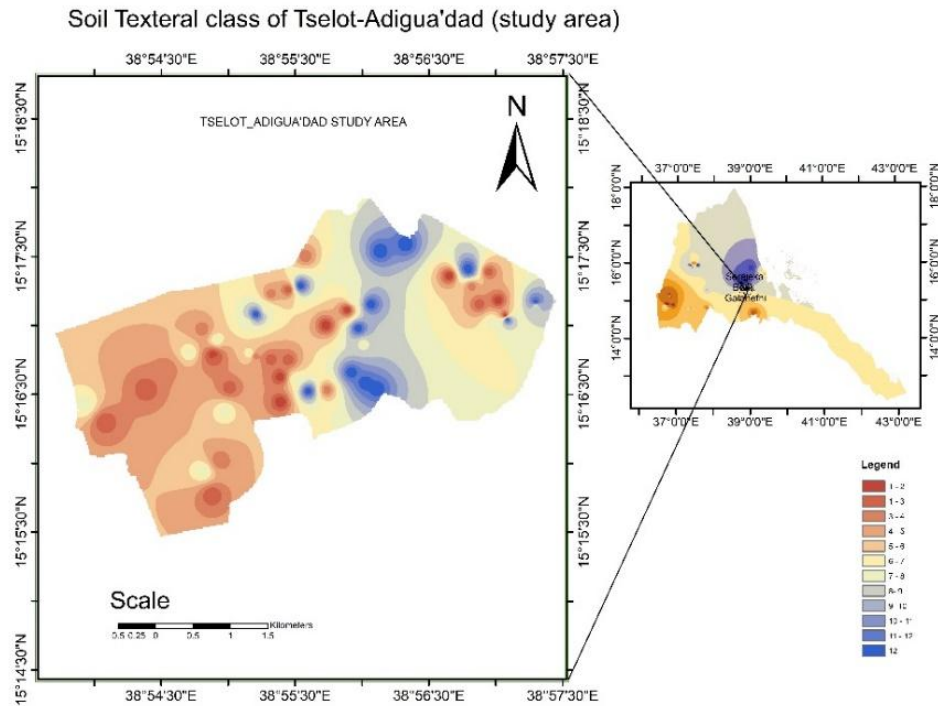


Рисунок 1.14 Класс текстуры почвы исследуемой территории (ферма Целот-Адигуэдад)

Таблица 1.3. Классы структуры почв Эритреи

Текстурный класс	Считать	%	Текстурный код класса
Супесь	131	19,41%	11
Суглинок	122	18,07%	2
Глина	113	16,74%	1
Суглинок	107	15,85%	6
Суглинок илистый	67	9,93%	9
Суглинок илистый	54	8,00%	5
Супесчаный суглинок	48	7,11%	3
Суглинок	11	1,63%	7
Иловая глина	10	1,48%	4
Иловая глина	6	0,89%	12
Суглинок илистый	4	0,59%	10
Песок	2	0,30%	8

1.4. Структура сельскохозяйственного производства

Сельское хозяйство - основной вид экономической деятельности в Эритрее, в

нем занято около 60% рабочей силы. Преобладают смешанное и богарное земледелие, где выращиваются такие культуры, как сорго и просо. Орошаемые культуры включают хлопок и томаты. Животноводство сталкивается с такими проблемами, как болезни и нехватка воды. Несмотря на все усилия, внутреннее производство удовлетворяет лишь 60% потребностей в продовольствии в хорошие годы, что приводит к необходимости импорта. Эритрея стремится повысить уровень продовольственной безопасности с помощью современных технологий, таких как механизация и ирригация, чтобы уменьшить зависимость от осадков. Отсутствие продовольственной безопасности остается серьезной проблемой, голод случается примерно каждое десятилетие.

Годовая урожайность сельскохозяйственных культур зависит от количества осадков, которое варьируется и распределяется неравномерно из года в год. Поэтому основной задачей Эритреи является обеспечение продовольственной безопасности путем внедрения современных технологий, таких как механизация, ирригация, сохранение почвы и снижение зависимости от осадков [110].

Систему сельскохозяйственного производства Эритреи можно проанализировать в двух временных рамках: до и после 2017 года. До 2017 года сельское хозяйство было преимущественно традиционным и мелкомасштабным, с акцентом на выращивание зерновых, садоводство, овощи, фрукты и животноводство. Министерство сельского хозяйства поддерживало садоводство и обеспечивало ирригационную инфраструктуру, такую как плотины и колодцы. Фермеры получали семена, саженцы и кредиты на развитие производства.

Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC) была создана в 2017 году и играет важнейшую роль в управлении национальными сельскохозяйственными обязанностями, уделяя особое внимание производству зерновых, молока и мяса для удовлетворения потребностей общества. Для этого ECLC увеличивает производство молока, строя крупные ранчо и выводя новые породы

скота. Она также оказывает поддержку фермерам, предоставляя им контейнеры для молока и доильные аппараты. Для производства мяса ECLC улучшает породы скота и предоставляет обогащенные пастбища. Кроме того, компания развивает рынки, чтобы фермеры могли продавать свою продукцию напрямую, и ищет возможности для экспорта, чтобы упростить цепочку поставок.

ECLC построила новые и реконструировала существующие молочные заводы, чтобы обеспечить высокое качество молока. Корпорация уделяет особое внимание справедливому ценообразованию и эффективной доставке продукции на рынки. ECLC использует ирригацию и атмосферные осадки для обработки больших площадей земли под различные культуры, включая зерновые и корма для животных. Она стремится увеличить производство за счет модернизации ирригации, внедрения качественных семян и улучшения агромеханизации. В целом усилия ECLC направлены на стабилизацию местных рынков и, в конечном счете, на удовлетворение региональных потребностей за счет расширения сельскохозяйственной деятельности.

После 2017 года система также функционировала на двух уровнях: мелкие традиционные фермерские хозяйства и крупные корпоративные фермерские хозяйства. Традиционная система сохранялась, полагаясь на человеческий труд и тягловых животных, с низкой производительностью из-за ограниченных ресурсов. Появление в 2017 году Эритрейской корпорации растениеводства и животноводства (ECLC) несколько изменило положение дел в секторе, взяв под контроль национальное производство. Несмотря на эти усилия, такие проблемы, как засухи и короткие сезоны дождей, продолжают влиять на производительность сельского хозяйства [123].

Производство скота и птицы. Производство скота и птицы на протяжении многих лет практически не увеличивалось (Рис. 1.15). Основная причина заключается в том, что около 99% скота выращивается традиционным способом, что приводит к снижению производства молока, которое едва превышает местное потребление

домохозяйств в течение короткого периода года (с конца лета до поздней осени). Такие методы разведения скота приносят доход в основном за счет использования животных в качестве источника энергии для различных видов сельскохозяйственной деятельности и основного источника денег при продаже в случае необходимости.

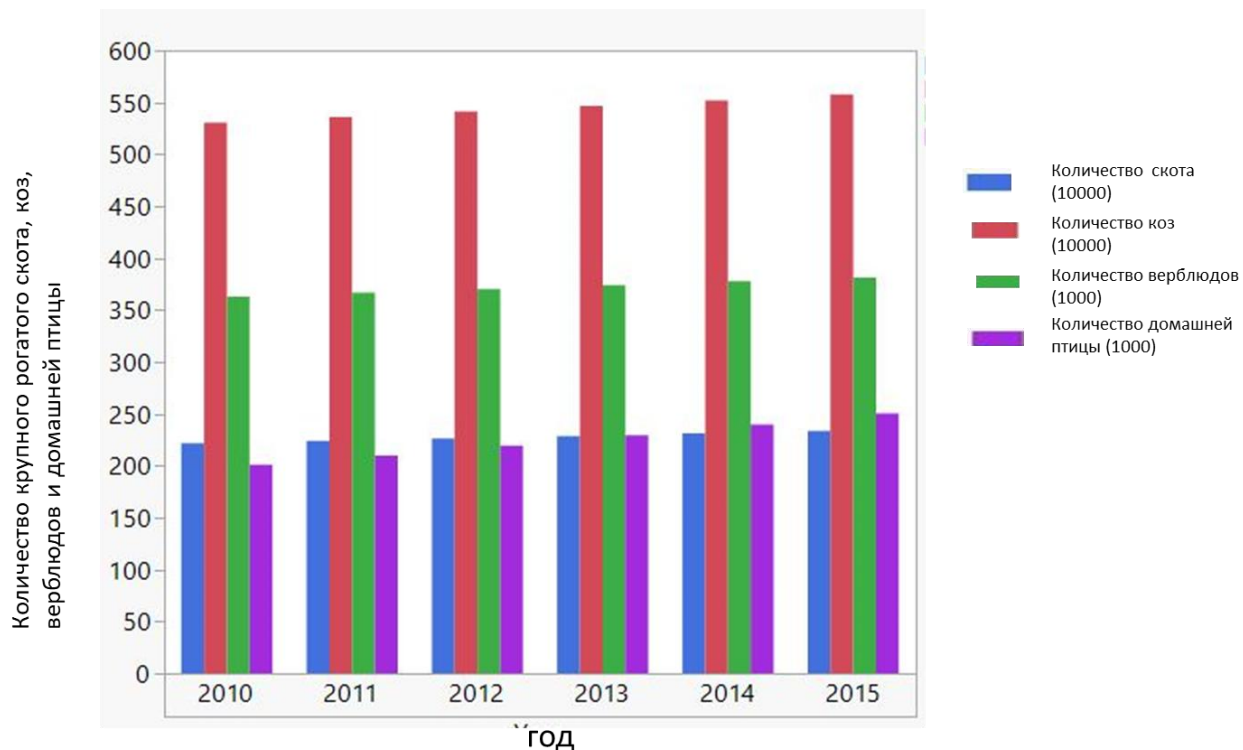


Рисунок 1.15 Животноводство и птицеводство

Значительная часть продукции возвращается в оборот в суровые засушливые сезоны года, которые наблюдаются практически всегда, и в сложные годы, связанные с повторением засух, которые случаются чаще, чем раз в пять-шесть лет. Такой старомодный способ разведения скота привел к медленному росту производства молока. Козы и верблюды пока не являются объектом интенсивного управления.

Характеристики производства овощей и фруктов. Производство овощей и посевные площади демонстрируют нестабильный рост, поскольку сильно зависят от различных условий, включая климатические факторы (такие как осадки, влияющие на доступность воды), рыночный спрос, экономическое положение людей и страны, что приводит к изменениям в предпочтениях. Однако очевидно, что производство

садоводческих культур в большей степени зависит от площади, чем от количества осадков (Рис. 1.16). Общий объем производства садоводства в целом соответствует площади возделывания. С увеличением площади увеличивается и производство. Чтобы зафиксировать данные трех различных масштабов, они нормализуются на основе: $\text{Нормализованное значение} = (\text{значение} - \text{Мин}) / (\text{Макс} - \text{Мин})$.

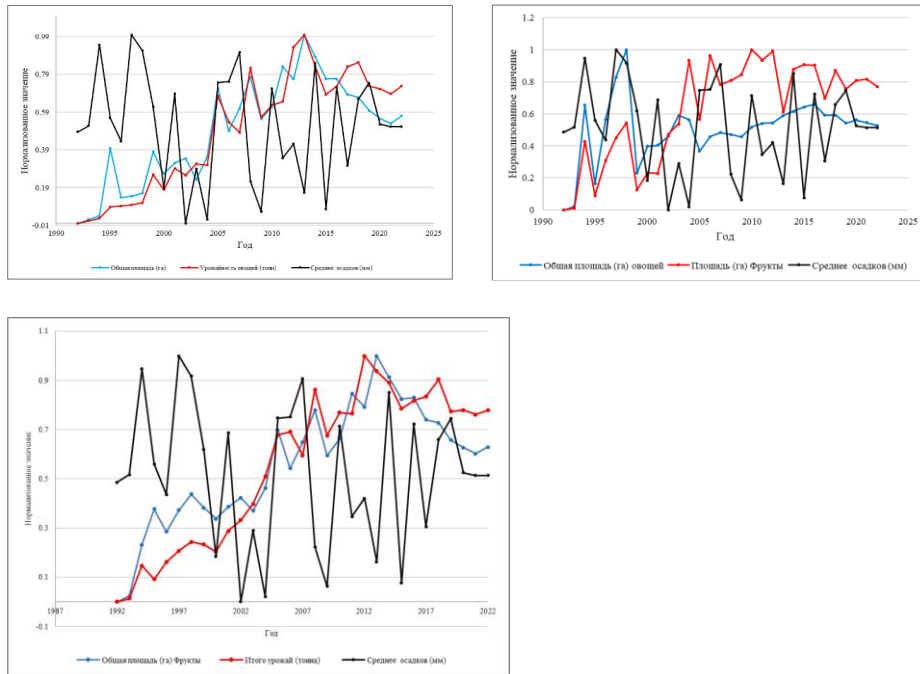


Рисунок 1.16 Ежегодные данные по садоводству (выращиванию овощей и фруктов), посевным площадям и характеру выпадения осадков за 1992-2022 годы.

Зерновые, масличные и бобовые культуры в соотношении с посевными площадями. Общий объем производства зерновых, бобовых и масличных культур за 1992-2020 годы, полученный от национального министерства сельского хозяйства, был предварительно обработан и представлен на рисунках ниже (Рис. 1.17). Для лучшего анализа и визуализации данные представлены в разбивке по зонам.

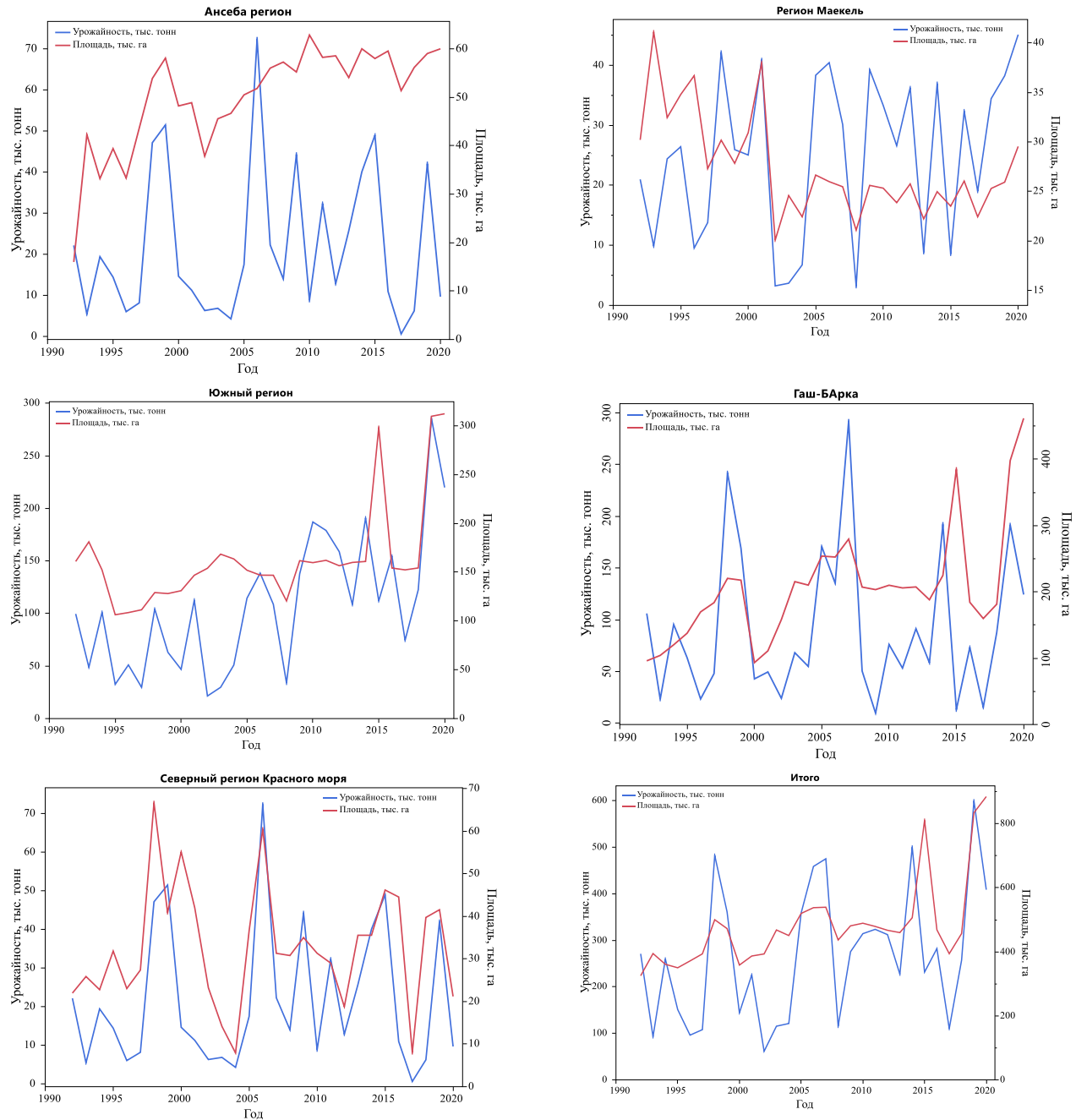


Рисунок 1.17 Общий урожай (тонн/год) по регионам и посевные площади (га/год)

Производство зерновых, бобовых и масличных культур в Эритрее, как видно из приведенных выше цифр по зонам, не отличается стабильностью. Однако большее внимание можно уделить периодам между пиками и минимумами производства, которые, похоже, повторяются в течение одного и того же количества лет. В целом, урожайность колеблется в течение почти одних и тех же лет во всех пяти зонах страны. Но самое главное - нет тенденции к росту, а если она и есть, то очень слабая

(как это видно в южной зоне).

Несмотря на постепенное увеличение посевных площадей в целом по стране, колебания урожайности, похоже, в большей степени зависят от колебаний количества осадков (Рис. 1.18). Пиковые и низкие точки урожайности следуют за пиками и минимумами осадков с регулярными сезонными закономерностями. Поэтому был проведен бивариационный анализ, чтобы понять реакцию производства на осадки.

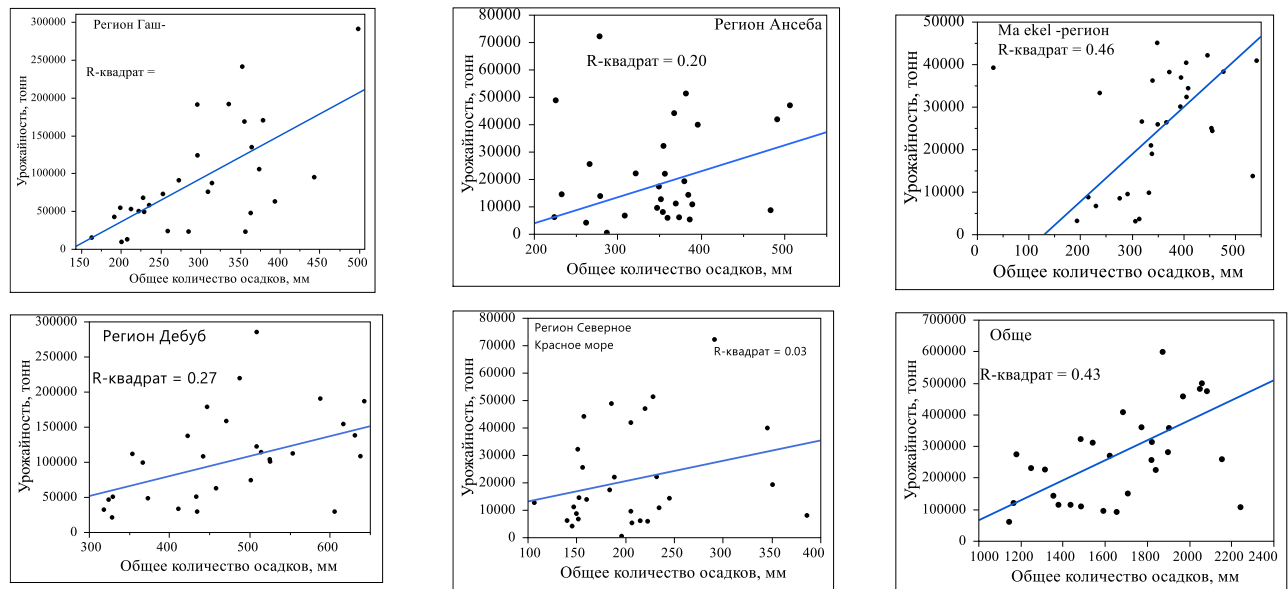


Рисунок 1.18 Соотношение общего урожая (тонн в год) в каждой зоне к общему количеству осадков (мм/год)

Среди пяти зон наиболее сильная корреляция наблюдается в регионе Маекель (0,46), это означает, что на долю осадков приходится 46% изменения урожайности в этом регионе. Это говорит о том, что количество осадков является важным фактором, определяющим урожайность. Аналогичным образом, в регионе Гаш-Барка (0,44) наблюдается сильная корреляция, указывающая на то, что количество осадков играет решающую роль в повышении продуктивности сельского хозяйства и в этой зоне. Остальные три региона демонстрируют более слабую корреляцию, что говорит о том, что, хотя количество осадков и влияет на урожайность, это не является основным определяющим фактором. В целом, общее значение R^2 , равное 0,43, указывает на умеренную взаимосвязь между количеством осадков и урожайностью.

сельскохозяйственных культур во всех зонах. Это означает, что, хотя количество осадков и играет определенную роль в определении урожайности, более половины изменений в продуктивности сельского хозяйства зависит от других факторов, таких как состояние почвы, методы возделывания сельскохозяйственных культур и климатические изменения, а не только от количества осадков. Таким образом, полагаться исключительно на данные об осадках для прогнозирования результатов урожайности может быть недостаточно.

Эти взаимосвязи могут показаться слабыми, но, если проанализировать картину общей урожайности и общего количества осадков по годам, мы увидим явное сходство. Хотя они и не идентичны, оба показателя имеют пиковые и низкие значения в одни и те же годы (Рис. 1.19).

Кроме того, на сельскохозяйственное производство влияет не только количество осадков, но и ежемесячное распределение осадков в течение вегетационного периода, это играет жизненно важную роль в производстве сельскохозяйственных культур. Высокое годовое количество осадков может быть накоплено за короткий период времени, в то время как критическое время вегетационного периода не хватает осадков. Напротив, меньшее количество общего количества осадков может иметь хорошее распределение в течение вегетационного периода и обеспечивать оптимальное количество воды, необходимое для сельскохозяйственных культур. Другим очень важным аргументом является классификация страны всего на шесть регионов несмотря на то, что осадки в стране крайне непредсказуемы по возникновению и распределению.

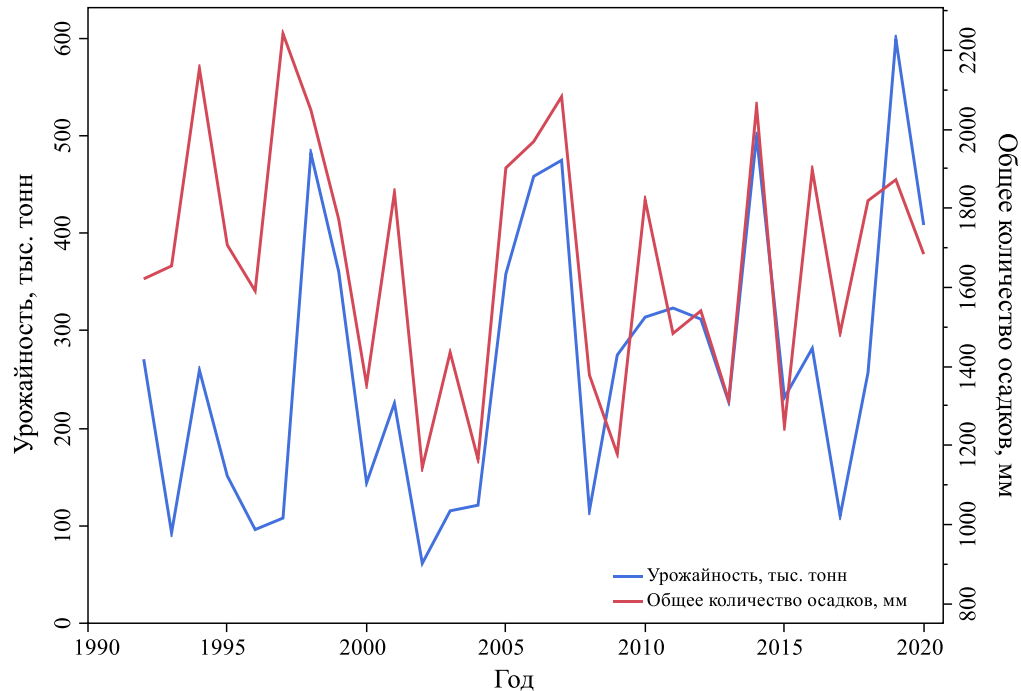


Рисунок 1.19 Урожайность и суммарное количество осадков по годам.

Основная проблема заключается в том, что количество осадков постоянно подвержено сезонным колебаниям, что приводит к постоянному росту урожайности без заметного роста. Для максимального использования осадков - не только для стабилизации колебаний урожайности, но и для улучшения условий производства - необходимо внедрение современных систем механизации.

1.5. Система земледелия в Эритрее

Эритрейские фермеры используют гибкую систему земледелия, чтобы справиться с частыми неурожаями, вызванными засухой, наводнениями или нападением насекомых. В начале сезона они высаживают позднеспелые культуры, а затем раннеспелые сорта. Это позволяет получить урожай, даже если первый урожай не удастся собрать. Повторяющаяся нехватка осадков приводит к постепенному изменению предпочтений в выращивании культур, при этом некоторые культуры перестают выращиваться. Эти стратегии варьируются по зонам из-за разнообразия климата Эритреи.

Традиционно фермеры практикуют хорошо организованный севооборот и меры по сохранению почвы и воды, чтобы обеспечить непрерывную продуктивность земли, особенно в высокогорьях. Типичный метод севооборота, обычно применяемый в высокогорных районах Эритреи, представлен в рисунок 1.13, взятый (с изменениями) из работы [63, 141]. Типичными культурами в севообороте являются зерновые (пшеница и ячмень) и бобовые (конские бобы, льняное семя и чечевица). Обратите внимание, что эта практика является репрезентативной, где правила не являются жесткими и неизменными для каждого фермера или деревни, часть может быть пропущена или периоды проведения работ могут отличаться от фермера к фермеру или от деревни к деревне. Время обработки почвы также синхронизировано с дождями, чтобы максимально сохранить воду в почве, что очень важно, учитывая низкий и нерегулярный уровень осадков в регионе (Табл. 1.4).

Таблица 1.4. Календарь сельскохозяйственных работ для типичного четырехлетнего цикла возделывания (применимо для пшеницы и ячменя, конских бобов, льна и чечевицы) [63, 141].

Календарные сроки, месяц												
	01	02	03	04	05	06.	07.	08	09.	10	11.	12.
Пар	Закрытие				Выпас скота (другие виды деятельности)				1-я обработка почвы	2-я обработка почвы	3-я обработка почвы	
1-й год выращивания	Мелиоративные работы	4-я обработка почвы	Мелиоративные работы	5-я обработка почвы	6-я обработка почвы	7-я обработка почвы	прополка		Уборка урожая			
2-й год выращивания	Мелиоративные работы	Однократная обработка почвы и уход за почвой и водоохранными сооружениями				дополнительная вспашка; традиционный посев		прополка		Уборка урожая		
3-й год выращивания	Мелиоративные работы	Однократная обработка почвы и уход за почвой и водоохранными сооружениями				необязательная обработка почвы; традиционный посев		прополка		Уборка урожая		

Традиционная практика севооборота является доминирующей системой в стране, даже в государственных сельскохозяйственных секторах. По всей стране

фермеры следуют местным методам ведения хозяйства в зависимости от местных требований и ограничений. Согласно данным [62], фермеры центрального нагорья обычно используют четырехлетний цикл севооборота для оптимизации восполнения питательных веществ в почве и борьбы с вредителями и болезнями. Пшеница, ячмень и бобовые (конские бобы, льняное семя и чечевица) являются одними из основных культур севооборота для обеспечения баланса питательных веществ в почве (особенно азота).

Четырехлетний цикл севооборота начинается с периода залежи и сменяется последующими годами возделывания. В течение каждого года севооборота вспашка, посев и сбор урожая тщательно приурочиваются к дождям, чтобы обеспечить оптимальную влажность для прорастания и роста. Общий цикл показан на рисунке 1.20.

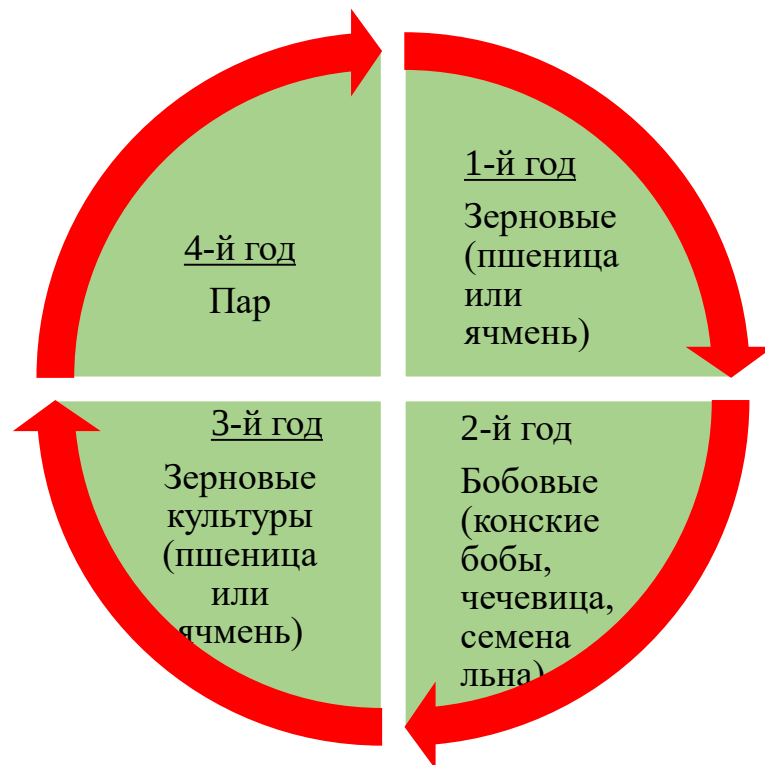


Рисунок 1.20 Типичная система земледелия в высокогорных районах Эритреи

Научно-исследовательский институт NARI при министерстве сельского хозяйства следит и продвигает научно обоснованную практику севооборота, а также внедряет улучшенные сорта семян.

1.6. Механизация сельского хозяйства

Механизация сельского хозяйства превратила традиционное земледелие в современную эффективную деятельность, позволяющую удовлетворить растущий мировой спрос на продовольствие в связи с ростом населения, урбанизацией и изменчивостью климата [80]. Механизация оптимизирует производительность, снижает зависимость от трудовых ресурсов и повышает устойчивость [2, 18, 36, 65]. Достижения в области обработки почвы, посадки, управления посевами и уборки урожая позволили повысить урожайность при минимизации неэффективности, энергопотребления и воздействия на окружающую среду [71].

Исторически земледелие зависело от труда человека и животных, но в результате индустриализации появились тракторы, сеялки, химические опрыскиватели и комбайны, что повысило эффективность и сократило трудозатраты [26, 38, 68, 103, 121]. Обработка почвы развивалась от плугов, запряженных животными, до современных орудий, таких как отвальные плуги и дисковые бороны, обеспечивая баланс между здоровьем почвы и эффективностью.

Точный посев с использованием сеялок и систем GPS-наведения повысил точность посева, сократил потери семян и оптимизировал густота растений [36, 44, 48, 114]. Исследования машин John Deere, Trimble, Ag Leader и Topcon выявили различия в точности посева, что подчеркивает необходимость ее оптимизации [35].

Управление посевами выигрывает от дистанционного зондирования и автономных решений для орошения, внесения удобрений и борьбы с вредителями [35]. Уборка урожая продвигается благодаря современным комбайнам и автоматизации, что повышает производительность и качество зерна. Беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и спутниковые снимки помогают в картировании

урожая и логистике, сокращая послеуборочные потери. Такие страны, как Россия, Аргентина и Украина, инвестировали в высокопроизводительную уборочную технику для крупномасштабного производства.

Система механизации сельского хозяйства Эритреи претерпела ряд изменений. Для удобства, она рассматривается как существовавшая до 2017 года (до появления ECLC) и после 2017 года (до настоящего времени). Передача технологий механизации сельского хозяйства в Эритрее происходила медленно. Во время колонизации было импортировано несколько машин, но до 1941 года они предназначались исключительно для крупных ферм с обширными прилегающими землями, принадлежавшими крупным итальянским предприятиям.

Во время британского колониального периода (1942-1952) коммерческие фермы были укреплены для производства товарных культур на экспорт, и импорт новой техники стал приоритетом. В период федерации с Эфиопией (1952 г.) коммерческое сельское хозяйство расширилось как в высокогорьях, так и в низменностях, и яркими примерами этого являются штаты Элаберед и Алигидер, садоводческие фермы в регионе Гаш-Барка, а также инициативы по расширению садоводческого производства в районе Гиндае и высокогорьях. Однако во время колонизации Эфиопии большинство крупных коммерческих ферм перешли под управление правительства, и производство значительно ухудшилось, а большая часть инфраструктуры, включая сельскохозяйственную технику, была повреждена или демонтирована (см. отчет министерства сельского хозяйства).

После обретения страной независимости в 1991 году Народно-освободительный фронт Эритреи начал восстанавливать сельскохозяйственный сектор с нуля, создав Сельскохозяйственную комиссию, которая позже, в 1992 году, стала Министерством сельского хозяйства. Впоследствии, в 1993 году, Министерство сельского хозяйства было преобразовано в Министерство сельского хозяйства, а деятельность по механизации фермерских хозяйств контролировалась Департаментом механизации

сельского хозяйства Министерства сельского хозяйства.

В задачи Отдела механизации сельского хозяйства входило внедрение и расширение использования современной сельскохозяйственной техники с механическим приводом при одновременной оптимизации использования рабочей силы людей и животных. Целью отдела было предоставление услуг по найму и аренде техники для расширения производственных операций. Это повысило бы эффективность фермерских операций и повысило бы общую эффективность системы ведения сельского хозяйства. Кроме того, департамент стремился оказывать помощь и поощрять фермеров к приобретению и использованию как больших, так и малых машин с механическим приводом, а также совершенствовать ручные инструменты для повышения эффективности работы.

Основными направлениями деятельности департамента было предоставление услуг по приобретению сельскохозяйственной техники, такой как тракторы, молотилки и комбайны, для удовлетворения растущего спроса на механизацию как в богарном, так и в орошаемом растениеводстве и садоводстве в саду. Компания также предоставляла услуги тяжелой техники для поддержки восстановления сельского хозяйства, улучшения инфраструктуры и расширения сельской инфраструктуры, включая подготовку земель, ирригацию и строительство подъездных дорог.

Основными целями механизации сектора являются содействие надлежащему развитию сельскохозяйственной техники и современных фермерских технологий; а основными направлениями политики являются установление стандартов качества для импортной и местной техники и сельскохозяйственных орудий; разработка рекомендаций по уровню механизации на основе моделей выращивания культур, климатических условий и цен для обеспечения инвестиций на надлежащих финансовых условиях. В стратегическом плане департамент анализирует текущие импортные и местные сельскохозяйственные машины и орудия, разрабатывает систему ранжирования и минимальные стандарты качества, помогает местным

производителям соответствовать стандартам, а также определяет и продвигает соответствующие уровни механизации.

Однако в годы после 2017 года система сельскохозяйственного производства в Эритрее функционирует на двух разных уровнях: на уровне индивидуального фермера (мелкие традиционные фермерские хозяйства - как и в годы до 2017 года) и на корпоративном уровне (относительно крупный масштаб - Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC)). В секторе по-прежнему преобладает традиционная система земледелия, которая используется в основном для обеспечения пропитания. Как правило, фермы небольшие, особенно в высокогорных районах, а основными источниками энергии являются человеческий труд и тягловый скот. Низкая норма внесения производственных ресурсов обуславливает низкий уровень производства и продуктивности/га/голову.

Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC), созданная в 2017 году, контролирует национальное сельскохозяйственное производство, уделяя особое внимание зерновым, молоку и мясу. Несмотря на постоянные засухи и смену сезонов дождей, ECLC модернизировала сельское хозяйство, улучшив поголовье скота, усилив ирригацию и оказав поддержку фермерам. Она построила ранчо в Халхале, Ади Омере и Керкебете, завела 3 300 голов нового скота и распространила 2 000 коров, 4 000 контейнеров для молока и 150 минидоильных аппаратов [123].

ECLC также развивает производство мяса, перерабатывает корма для животных в нескольких регионах и создает рынки для связи фермеров с потребителями. Она построила и отремонтировала молочные заводы и центры сбора молока, чтобы обеспечить справедливые цены на продукцию. Корпорация управляет обширной ирригацией, обрабатывая 1320 гектаров, при этом в регионах орошается 27509 гектаров, а дождевое земледелие охватывает 449370 гектаров [123]. ECLC продвигает современное сельское хозяйство, улучшая ирригацию, стратегическое производство зерновых, качественные семена, агромеханизацию и эффективные поставки ресурсов,

стремясь стабилизировать местные рынки и увеличить производство.

1.7. Состав машинно-тракторного парка в Эритрея

Общее количество различных типов техники, зарегистрированных Министерством сельского хозяйства, показано на рисунке 1.21.

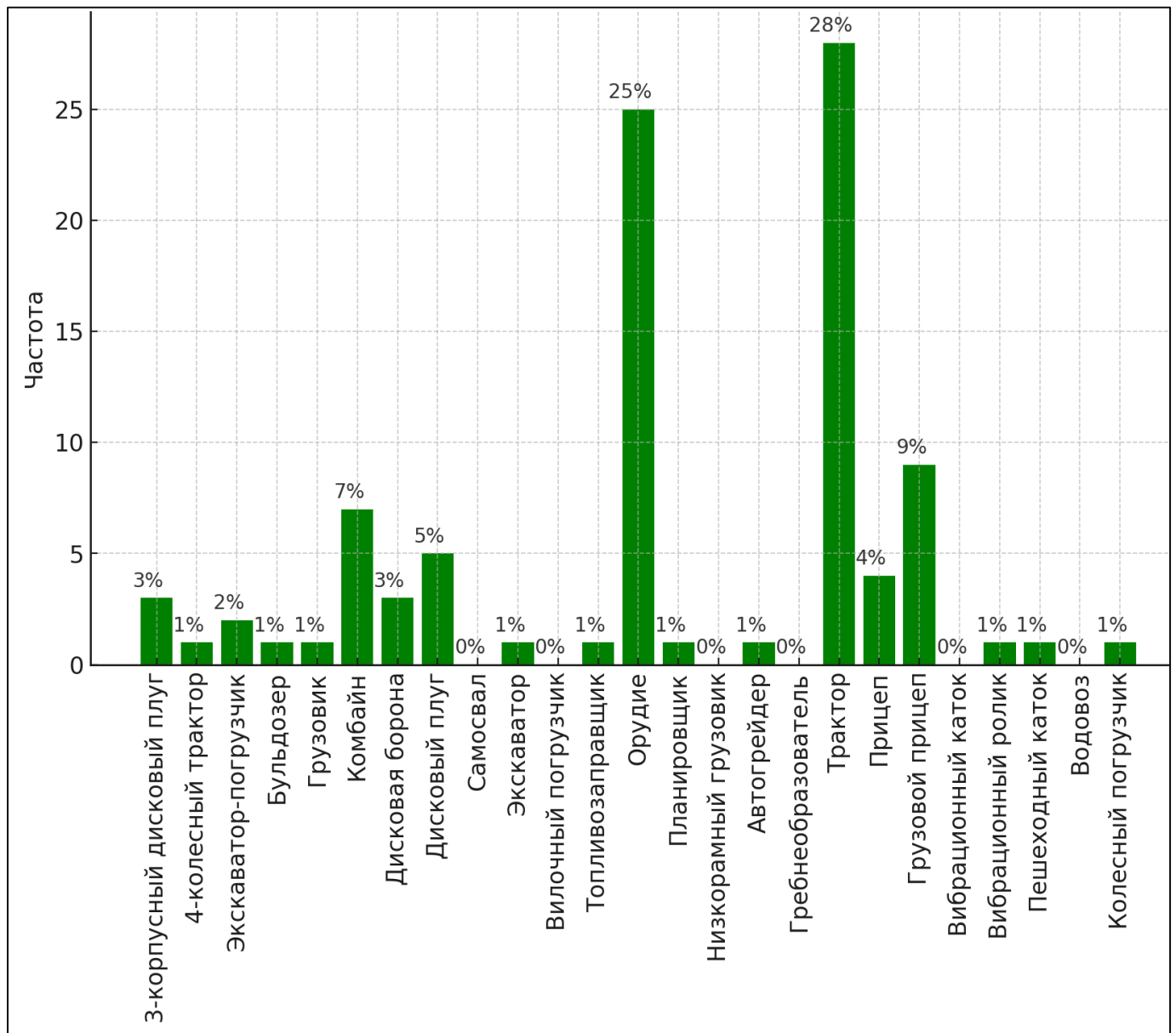


Рисунок 1.21 Общее количество машин, зарегистрированных министерством сельского хозяйства

Распределение техники по регионам показано в таблице 1.5 и зависит от типа

почвы, размера фермы, вида сельскохозяйственных культур, преобладающих в регионе, и доступности услуг. В Эритрее насчитывается около 1186 единиц техники, большинство из которых - тракторы. Южный регион располагает наибольшим количеством оборудования, за ней следует Регион Гаш-Барка, где проводятся все масштабные строительные работы. Общее количество тракторов, зарегистрированных министерством сельского хозяйства, в Эритрее составило 729 единиц. На рисунке 1.22 показано количество тракторов на 1000 гектаров пахотных земель в различных странах с развитым сельскохозяйственным сектором.

Таблица 1.5. Количество машин в Регионе [113]

Регион	Пахотные земли, тыс. га	Население			Машины	
		Количество (тыс)	Количество рабочей силы в сельском хозяйстве (тыс)	% Рабочая сила в сельском хозяйстве	Количество	%
Ансеба	210,1	448,9	372,6	83	233	19,6
Дебуб	199,6	779,06	755,7	97	404	34,1
Гаш-Барка	336,2	512,8	473,8	92,4	339	28,6
Маекель	470,0	518,4	36,3	7,0	210	17,7
Итого	792,8	2259,16	1638,4	72,5	1186	100

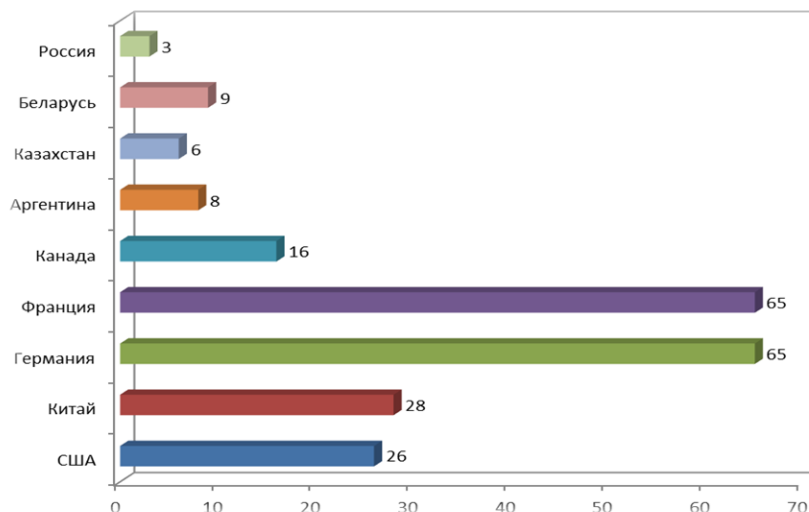


Рисунок 1.22 Количество тракторов, приходящихся на 1000 га пашни
(<https://dzen.ru/a/YIEdXgKFy1hkOxm0>)

Таким образом, в Эритрее на один трактор приходится примерно 1087,6 га

пахотных земель, а плотность тракторов составляет 0,92 трактора на 1000 га. Это значение можно сравнить с ситуацией в Российской Федерации до 2019 года, где на 1000 га пашни приходилось около 3,2 трактора [103, 145]. Количество тракторов на 1000 га пашни в Эритрее примерно в 3,5 раза меньше по сравнению с Россией и существенно меньше развитых стран. Технологии производства зерна пшеницы

В области выращивания пшеницы технологические системы можно разделить на три основных типа в зависимости от интенсивности и стратегии оптимизации урожайности [6]:

Высокие технологии (А): Эти системы предназначены для получения максимальных урожаев высококачественного зерна путем компенсации выноса питательных веществ за счет использования высокоинтенсивных сортов. Они включают комплексную защиту растений от вредителей, болезней и сорняков, а также удобрения, обеспечивающие реализацию более 85% потенциала сорта. Производительность труда оптимизирована до уровня менее 3,5 человеко-часов на тонну зерна, а урожайность превышает 6 тонн с гектара. Эти технологии обычно применяются в оптимальных природно-климатических условиях для выращивания озимой пшеницы.

Интенсивные технологии (В): Эта категория нацелена на производство высококачественного зерна при компенсации выноса питательных веществ. Она включает меры по защите растений от основных болезней, вредителей и сорняков, обеспечивая реализацию потенциала сорта выше 65%. Производительность труда поддерживается на уровне ниже 4,5 человеко-часов на тонну, при этом гарантированная урожайность зерна составляет 40-50 килограммов с гектара.

Нормальные технологии (С): эти системы максимально повышают плодородие почвы и ресурсы агроландшафта, реализуя более 50% биологического потенциала сорта пшеницы. Производительность труда составляет 6,5 человеко-часа на тонну зерна, урожайность гарантирована на уровне 25-30 килограммов с гектара

(Каштанов et al., 1999). Общая схема технологий приведена на рис. 1.23

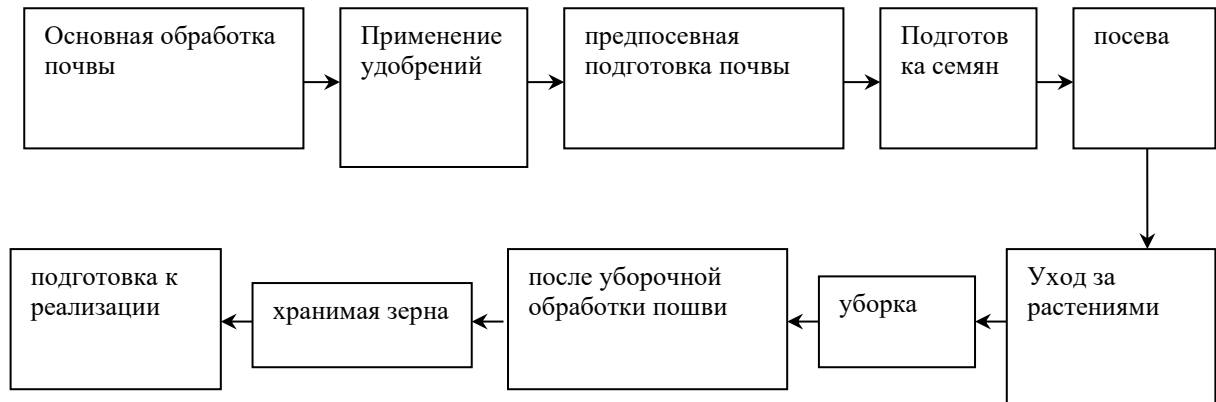


Рисунок 1.23 Схема технического процесса

1.8. Технологические операции, выполняемые в сельском хозяйстве Эритреи

В Эритрее сельскохозяйственная практика значительно изменилась благодаря внедрению механизированных технологий, что повлияло как на эффективность операций, так и на потребность в рабочей силе. Ниже приводится подробное описание основных технологических операций и того, как механизация их изменила.

В традиционной системе земледелия в Эритрее для ручной подготовки почвы в основном используются орудия, запряженные животными. Эта система требует больших затрат времени и труда, что ограничивает площадь земли, которую можно подготовить за определенное время конкретного сезона. Несмотря на медленные темпы замены, эта система переходит на механизированные методы с использованием плугов, культиваторов и борон, управляемых тракторами с дизельными двигателями.

Переход к механизированным системам подготовки почвы уже давно повысил скорость и глубину вспашки, что позволяет лучше аэрировать почву, удерживать влагу и готовить посевное ложе. В настоящее время фермеры могут относительно быстро подготовить значительную площадь земли, что помогает им улучшить сроки посева, особенно важные в условиях постоянно сокращающегося вегетационного периода в стране, что дает преимущество в повышении урожайности.

Министерство сельского хозяйства и Эритрейская корпорация растениеводства, и животноводства (ECLC) играют решающую роль в содействии этим

преобразованиям, предоставляя доступ к современной технике и техническим тренингам. Обычные операции по обработке почвы перед посевом в Эритрее выглядят следующим образом:

Основная обработка почвы: В настоящее время Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC) является единственным поставщиком услуг по обработке почвы в стране, за исключением местных частных владельцев, которые предлагают услуги по обработке почвы, которые местные фермеры не могут себе позволить. Эти частные предприятия зачастую неэффективны и некачественны. По этим причинам местные фермеры предпочитают услуги, предоставляемые ECLC. ECLC - это автономная организация, созданная для ускорения развития сельского хозяйства и животноводства в Эритрее. В ее задачи входит максимальное увеличение производства сельскохозяйственных культур, животноводства, поставок на внутренний рынок и экспорта. Корпорация имеет полномочия проводить исследования, документировать санитарные нормы, закупать оборудование и содержать помещения. Корпорация управляется советом директоров, генеральным менеджером и персоналом.

Вспашка дисковым плугом. Под руководством ECLC основные операции по обработке почвы выполняются дисковыми плугами (рис. 1.24, А), которые эффективно разрезают твердую почву и разрушают уплотненные слои. Они часто используются в местах, где почвы более тяжелые, уплотненные и часто каменистые. Этот плуг может работать на сухих и корковых почвах, которые распространены в полузасушливых районах Эритреи. Дисковый плуг используется в основном при необходимости глубокого рыхления почвы, для заделки органических веществ. Учитывая разнообразие типов почв в Эритрее, ECLC адаптирует эти методы к местным условиям. Отвальный плуг в Эритрее используется редко.



А



В

Рисунок 1.24 Широко используемый дисковый плуг (А) и долотообразующий плуг (В) на ферме Ади'Гуаэдад

Безотвальная обработка. Для безотвальной обработки используют глубокорыхлители и долотообразный плуг (рис. 1.24, В). Проблема уплотнения почвы из-за использования тяжелой техники не является большой проблемой в сельском хозяйстве Эритреи. Однако при необходимости используются тяжелые орудия с тормозным механизмом.

Предпосевная обработка почвы. В Эритрее после основной обработки почвы дисковыми отвальными плугами обычно требуется разбивка комьев, выравнивание и приглаживание почвы, а также уничтожение сорняков для создания более плотных посевных ям, особенно если после основной обработки почвы состояние почвы тяжелое. Поэтому в большинстве случаев требуется дискование (рис. 1.22). Благодаря дискованию растительные остатки могут быть заделаны в почву, а поля подготовлены к посеву. Приведенные ниже данные были получены во время фактической обработки почвы дисковой бороной двойного действия на ферме Ади'Гуаэдад в сентябре 2023 года, в то время как основная обработка почвы проводилась в июне.

После основной обработки почвы в целях севооборота поле оставили незасеянным, а в сентябре его засеяли горохом. Поскольку операция боронования после дискования не является обычной, за исключением случаев, когда состояние почвы того требует, ее часто проводят для выравнивания поверхности почвы,

разбивания небольших комков и выравнивания почвы после вспашки или дискования. Ниже приведены некоторые из доступных функций дисковых борон, используемых ECLC (рис.1.25).



Рисунок 1.25 Дискование вспаханного поля на ферме Ади'Гуаэдад (сентябрь 2023 года)

При необходимости также используется комбинация зубчатой и гладкой дисковых борон, называемая комбинированной дисковой бороной. Зазубренные диски используются для измельчения твердых растительных остатков и почв, а насечки помогают эффективно разбивать комья и смешивать органические вещества с почвой, в то время как гладкие диски выравнивают поверхность почвы и обеспечивают лучший контакт семян с почвой, тем самым создавая более мелкие грядки. Дисковая борона с прикатывающим устройством в виде бруска используется для увеличения уплотнения почвы и лучшей подготовки семенного ложа (Рис. 1.26).



Рисунок 1.26 Комбинированная дисковая борона (слева) и дисковая борона с прикатывающим устройством в виде бруска (справа)

Посев: В Эритрее до сих пор при традиционной системе земледелия посев

производится вручную, а для заделки семян почвой используются традиционные или современные орудия для поверхностной обработки почвы. Этот метод требует большого количества человеческого труда для обеспечения надлежащего распределения семян, особенно когда для засыпки почвы используются орудия обработки почвы.

Обычный метод распределения семян называется ручным посевом. Но это не означает, что механического посевного оборудования нет, в государственных хозяйствах (контролируемых ECLC) механический посев семян является довольно распространенным явлением. ECLC использует современные тракторные прицепные сеялки, сеялки для высева семян и радиовещательные устройства, которые также позволяют гибко использовать традиционные методы радиовещания везде, где это необходимо. Эта система сокращает время и трудозатраты, необходимые для посева, и обеспечивает точность заделки семян, что способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Это помогло. Кроме того, это помогло корпорации посадить растения в оптимальные сроки, что является важным преимуществом в регионах с неустойчивыми погодными условиями.

Наиболее распространенными типами сеялок для высева семян, используемых в ECLC, являются сеялки для внесения семян и удобрений (рис. 1.26(A)) и пневматические сеялки (рис 1.26 (B)).

Сеялки точного высева (рис 1.26(C)) обычно используются для посева кукурузы на корм и бобовых культур, таких как горох и нут, специально для севооборота через определенный промежуток времени после того, как поля были засеяны пшеницей или ячменем.

При необходимости внесения минеральных удобрений используются устройства для внесения семян и удобрений (рис. 1.27(A)). Эти устройства используются для внесения семян и удобрений в чередующиеся ряды, с определенным расстоянием между рядами семян и удобрений.



А



Б



С

Рисунок 1.27 Оборудование для точного высаживания (ECLC)

Распределение органических удобрений. Навоз обычно доставляют на ослах, хранят в виде куч на поле в межсезонье и вручную разбрасывают по всему полю перед обработкой для заделки в почву. Ручное распределение навоза приводит к плохой однородности. Недавно Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC) представила машины мирового класса для различных полевых работ, среди которых высокопроизводительный распределитель жидкого органического навоза и управляемые трактором простые многоцелевые разбрасыватели (семян и удобрений). Ожидается, что эти машины обеспечат равномерное распределение навоза, минеральных удобрений и семян для снижения себестоимости продукции.

Борьба с вредителями: Борьба с вредителями в Эритрее прошла путь от ручного применения самодельных средств, таких как растительные экстракты и фумигации, которые неэффективны и требуют много времени, до применения

химических пестицидов с помощью ручных и ранцевых опрыскивателей, которыми управляют фермеры. Это позволило быстро и широко применять пестициды на больших площадях, хотя это по-прежнему требует больших затрат труда и времени. Ручной метод применения также сохраняется до сих пор, но теперь больше внимания уделяется безопасности и эффективности применения с помощью программ обучения фермеров для точного определения вредителей и использования подходящих методов. Наряду с этими методами в последние годы были внедрены современные методы внесения удобрений, такие как моторизованные опрыскиватели и опрыскиватели, управляемые трактором. Они позволили проводить более равномерное и эффективное внесение удобрений на значительно больших полях, сократить трудоемкость и улучшить охват.

Современная интегрированная борьба с вредителями (ИБВ) предполагает сочетание человеческих и машинных усилий; например, фермеры могут вручную отслеживать численность вредителей, а затем использовать машинные методы для обработки на основе этих отслеживаемых пороговых значений, что позволяет максимально эффективно бороться с вредителями и при этом минимизировать воздействие на окружающую среду.

Уборка урожая: в традиционной практике сбора урожая существует несколько последовательных этапов: урожай срезают серпами и косами, оставляют сохнуть на поле в кучах или раскладывают на земле, животным разрешают ходить по срезанному урожаю, солому отделяют вручную, а мякину удаляют путем прочесывания, что зависит от наличия достаточного дуновения ветра, а затем упаковывают и транспортируют. Чтобы частично уменьшить трудоемкость процесса, сократить время обработки и снизить количественные и качественные потери урожая, Министерство сельского хозяйства Эритреи оказывает поддержку фермерам, предоставляя тракторы и молотильные машины в большинстве регионов.

Однако в последнее время в высокогорных районах для сбора урожая пшеницы

в рамках ECLC используются зерноуборочные комбайны, доступ к которым для большинства фермеров, ведущих натуральное хозяйство, ограничен. Эта машина измельчает солому и разбрасывает ее по полю, что может быть одной из причин, по которой эритрейские фермеры не решаются использовать такую технологию. Это связано с тем, что большинство фермеров в стране практикуют смешанное земледелие (продовольственное и кормовое), и вышеупомянутая технология значительно снижает качество корма для животных (соломы); однако различные комбайны могут прессовать солому в тюки определенного веса и формы с минимальными потерями соломы. В Эритрее уборка теффа с помощью комбайнов еще не внедрена.

1.9. Барьеры на пути эффективной механизации в Эритрее

Поощрение и помощь фермерам в создании фермерских ассоциаций эффективно способствуют развитию сельского хозяйства. Благодаря коллективным действиям фермеры могут объединять ресурсы и принимать более эффективные меры для улучшения своей сельскохозяйственной практики.

Однако существующие в Эритрее ассоциации фермеров зачастую не обладают достаточной властью и подотчетностью, поскольку они, как правило, создаются для реализации каких-то общих интересов, а не для того, чтобы сосредоточиться на механизации. Укрепление этих ассоциаций с упором на механизацию могло бы способствовать дальнейшему повышению производительности и устойчивости сельского хозяйства в стране.

Во многих районах Эритреи сельскохозяйственные фермы небольшие и раздробленные, а сокращение их размеров объясняется мерами по сохранению земель, потребностями сельских жителей в жилье и диверсификацией промышленности. Такая раздробленность создает проблемы для механизации. Консолидация земель считается успешным подходом, особенно в высокогорных районах, к механизации мелких фермерских хозяйств. Консолидированные поля облегчают использование тракторов и другой техники, эффективное орошение и

дренаж полей, доступ к дорогам, а также создание на ферме объектов послеуборочной обработки и другой инфраструктуры.

Принцип группировки и консолидации земель направлен на преобразование земель для облегчения внедрения крупномасштабной механизации, а не на адаптацию технологий механизации к мелким хозяйствам. Это повышает эффективность крупной техники при синхронизации подготовки земли, посева и уборки урожая, минимизации поворотов на разворотной полосе и других перерывов, а также снижении энергозатрат. Однако многие сельскохозяйственные машины, переданные некоторыми донорами, не имеют технических характеристик, необходимых для адекватной и долговечной работы в Эритрее

Большинство операторов машин в Эритрее не имеют сертификатов и приобретают навыки только благодаря опыту работы. Это приводит к низкому уровню использования техники, высоким накладным расходам и повышенной амортизации. Министерство сельского хозяйства через Департамент механизации и «Правительственный гараж» до 2017 года занималось сертификацией операторов по различным навыкам эксплуатации и обслуживания тяжелой техники. Программы сертификации направлены на повышение эффективности и долговечности использования техники за счет обеспечения надлежащей подготовки операторов и развития сервисной базы.

Сельскохозяйственный сектор Эритреи сталкивается с серьезными проблемами из-за зависимости от традиционных методов ведения сельского хозяйства и ограниченного доступа к современной технике. Нестабильность окружающей среды, высокая стоимость техники и отсутствие технического опыта препятствуют усилиям по механизации. Мелкие фермеры сталкиваются с проблемой инвестиционных затрат и раздробленности земельных владений. Интеграция данных о погоде и классификации почв в модели фермерских хозяйств могла бы повысить эффективность, но в Эритрее такие достижения встречаются редко.

Будущие инновации в области цифрового сельского хозяйства и энергоэффективной техники обладают потенциалом, но необходимы целенаправленные стратегии для преодоления существующих барьеров и приведения механизации в соответствие с местными реалиями для повышения продовольственной безопасности и устойчивости.

Полевые операции часто не имеют научных данных для поддержки оптимального использования ресурсов. Результаты работы машинного оборудования часто выходят за рамки знаний и интересов менеджеров и владельцев, что приводит к упущению качества полевых работ. Традиционные методы преобладают, с небольшим анализом того, действительно ли использование техники приносит пользу стране или делается просто ради механизации процессов.

Синхронизация сроков полевых работ с характеристиками осадков для оптимизации доступных сельскохозяйственных машин пока не считается ключевым фактором в определении производственных результатов. Это упущение привело к неэффективности и снижению производительности. Чтобы решить эти проблемы, необходимы тщательные исследования. Они должны сосредоточиться на оценке текущих практик, выявлении областей для улучшения и разработке стратегий, которые увязывают использование техники с экологическими условиями. Таким образом фермерство может стать более эффективным и устойчивым со временем. Реальные исследования помогут обеспечить то, что механизация повышает сельскохозяйственную продуктивность, а не является просто

1.10. Задачи исследования

1) Проанализировать природно-климатические условия и эффективность механизированных сельскохозяйственных работ и определить основные направления развития по улучшению качества и повышения производительности машинно-тракторных агрегатов.

2) Оценить влияние характеристик поля на производительность МТА с целью

выработки рекомендаций по проектированию геометрии полей, повышающих эффективность выполнения механизированных работ за счет улучшения маневренности и снижения эксплуатационных затрат;

3) Определить оптимальные сроки выполнения основной и предпосевной обработки почвы и посева для южных и центральных регионов Эритреи с учетом климатических характеристик;

4) Проанализировать точность высева сеялкой Nardi Dora Air и определить частоту повторения и пропусков посева. Обосновать рекомендации по повышению точности посева за счет цифровых технологий. сравнении с современной;

5) Оценить качество основной и предпосевной обработки почвы и процесса посева для южных и центральных регионов в Эритрее и разработать рекомендации по повышению качества;

6) Оптимизация использования техники для одновременного выполнения производственных процессов, обеспечивающая комплексное выполнение всех задач в кратчайшие сроки;

7) Разработка и внедрение стратегий оптимизации маршрутов для сельскохозяйственной техники с целью минимизации холостого пробега при сохранении производительности техники на различных полевых операциях.

Глава 2: Теоретические основы исследования

2.1. Обоснование оптимальной глубины и сроков посева

В сложных условиях засушливых и полузасушливых регионов успешное выращивание сельскохозяйственных культур зависит от тонкой взаимосвязи между наличием влаги и всхожестью семян. Среди множества факторов, влияющих на результаты сельского хозяйства, выбор глубины посева и сроков посева являются важнейшими.

Повышение уровня стресса на этапах прорастания и ранних всходов отрицательно сказывается на таких характеристиках, как скорость прорастания, сила проростков и длина coleoptily, побега и/или корня. Существует ограниченное количество исследований, позволяющих количественно оценить потери урожая пшеницы из-за засухи на стадиях прорастания и появления всходов [76].

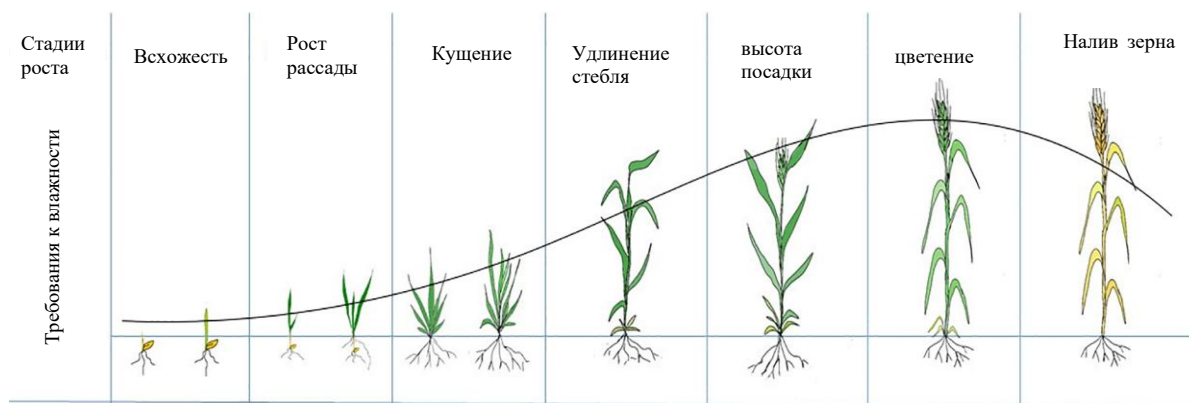


Рисунок 2.1 Фазы роста пшеницы и динамика потребности во влаге

На рисунке показаны различные стадии роста пшеницы, а также связанные с ними видимые признаки роста и засухоустойчивости. Также показаны компоненты, влияющие на конечный урожай зерна, которые важны на каждой стадии роста. Адаптировано по [76]. Линия на графике показывает тенденцию изменения потребности во влаге на разных стадиях роста.

Соблюдение баланса между глубоким и мелким посевом важно для снижения рисков, связанных с доступом влаги и задержкой прорастания семян. Заделывая

семена глубже в почву, они получают доступ к запасам влаги, что особенно полезно в засушливом климате, где поверхностное увлажнение часто ограничено и непродолжительно. Такая стратегия позволяет растениям получать доступ к воде, хранящейся в более глубоких слоях почвы, что обеспечивает жизненно важный источник энергии во время длительных периодов засухи. Однако семена, размещенные слишком глубоко, могут столкнуться со значительными трудностями при прорастании, что приведет к задержке появления всходов. Большое расстояние, которое они должны преодолевать по почве, может привести к неблагоприятным условиям окружающей среды, что в конечном итоге затруднит успешное приживание[79].

Было проведено исследование влияния глубины посева на скорость прорастания пшеницы для четырех категорий озимой пшеницы, посеянной на четыре разные глубины (1, 3, 5 и 7 см) на юго-востоке Польши, и результаты представлены на рисунке 2.2. На глубине 1 см (рис.2.2 А) всхожесть семян всех четырех категорий достигала более 80% в течение 8-9 дней; на глубине 3 см всхожесть семян трех категорий была выше 80% через 10 дней после посева (рис.2.2b); в то время как мелкие семена в это время составляли всего около 60%.; на глубине 5 см всхожесть трех категорий семян была достигнута на уровне выше 80% через 14 дней после посева, а мелкие семена показали всхожесть ниже 80% (рис.2.2В); а на глубине посева 7 см максимальная всхожесть составила всего 70%, что составило 16 дней после посева (рис.2.2d) [120]. Исследования показывают, что посев семян пшеницы на глубину 3 см приводит к получению самого высокого урожая зерна, значительно превосходящего посев на глубину 5 см и 7 см, с повышением урожайности на 5,8% и 33,5% соответственно.

Аналогичное исследование было проведено в Эфиопии [27] при глубине посева 2 см, 4 см, 6 см и 8 см. Оно показало, что оптимальные результаты дает глубина посева 4 см.

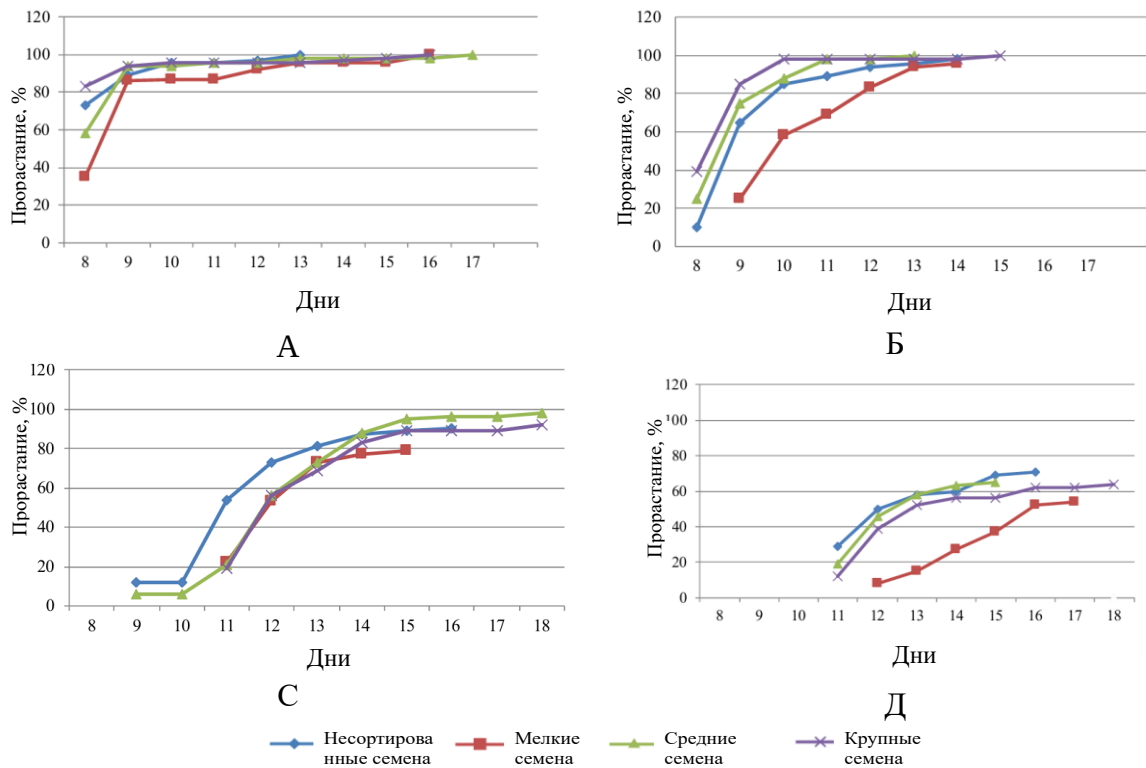


Рисунок 2.2 Динамика и процент всходов яровой пшеницы при посеве семян на глубину 1, 3, 5 и 7 см

Процент прорастания был самым высоким на глубине 4 см, превосходя как меньшую глубину (2 см), так и большую глубину (8 см), где первоначальная всхожесть задерживалась и показатели были значительно ниже. Всходы появились через 5 дней после посева на всю глубину, но через 9 дней семена, посеянные на глубину 4 см, дали самые высокие и быстрые всходы, образовав наибольшее количество всходов. В то время как семена с посадкой 2 см и 6 см показали умеренный успех, семена с посадкой 8 см сначала отставали, но затем превысили 2 см, хотя по-прежнему оставались менее эффективными по сравнению с 4 см. Эти данные свидетельствуют о том, что глубина посева 4 см является идеальной для обеспечения превосходной всхожести и своевременного появления всходов при выращивании пшеницы.

Другое исследование, аналогичное описанному выше, было проведено в Бангладеш, где всхожесть началась через пять дней после посева и достигла пика на

всех глубинах через девять дней после посева. Семена, посеянные на глубину 4 см, показали наилучшие показатели с точки зрения всхожести и последующего роста, в то время как семена, посеянные на глубину 2 см или 8 см, показали меньшую всхожесть из-за недостаточного увлажнения или чрезмерной глубины залегания, соответственно. Исследования показывают, что более мелкий посев (2 см) может привести к недостаточному увлажнению из-за быстрого высыхания, в то время как более глубокий посев (8 см) может препятствовать появлению всходов из-за таких ограничений, как длина coleoptily [32].

И наоборот, размещение семян ближе к поверхности почвы обеспечивает более быстрый доступ к влаге и более высокую температуру, способствуя быстрому прорастанию и раннему росту. Это особенно выгодно в засушливых регионах, где своевременное выпадение осадков может быть редким, но иметь решающее значение для успеха урожая [76]. Однако неглубоко посеянные семена особенно уязвимы во время продолжительных периодов засухи. Если верхний слой почвы высохнет до того, как у сеянцев сформируется крепкая корневая система, вероятность плохой всхожести значительно возрастает. Быстрое испарение, характерное для засушливого климата, может поставить под угрозу выживаемость побегов при отсутствии своевременных осадков или орошения, что подчеркивает необходимость тщательного подбора глубины посева.

Потребление воды пшеницей зависит от различных факторов: погодных условий, типа почвы, культуры, заселенности посева, уровня минерального, пораженности болезнями, фаз развития и этапов органогенеза; и составляет от 300 до 600 мм за сезон роста [24, 33, 35, 77, 94, 124, 139]. Исследование, проведенное в Эфиопии с такими же погодными условиями, как и в Эритрее, показало, что общая сезонная потребность в воде для урожая составляет 392,75 мм, распределенная следующим образом: 40,35 мм на начальной стадии (20 дней), 82,44 мм на стадии развития (30 дней), 238,66 мм на средней стадии (42 дня), и 31,3 мм на поздней стадии

(23 дня) [24]. Другое исследование, проведенное в Эфиопии, показало, что наибольшая и наименьшая потребность пшеницы в воде составляет 423,2 мм и 146,0 мм соответственно [91]. Аналогичное исследование, проведенное в Эритрее, показало, что общее потребление воды для получения оптимального урожая пшеницы составило 382 мм [121].

Таким образом, основываясь на информации о проценте водопотребления, приведенной на рисунке 2.3, предположим, что в течение первых 20 дней стадии роста, с 23.04 по 15.05, соотношение водопотребления составляет 0,23:0,43:0,34. Исходя из данных, приведенных в [26], за первые 20 дней урожай пшеницы потребляет 40,35 мм воды. Таким образом, за первые 12 дней вегетации (23.04–05.05, см. рис. 2.2) культура потребляет 9,3 мм воды. Это значение соответствует минимальному количеству воды, необходимому пшенице для прорастания [41].

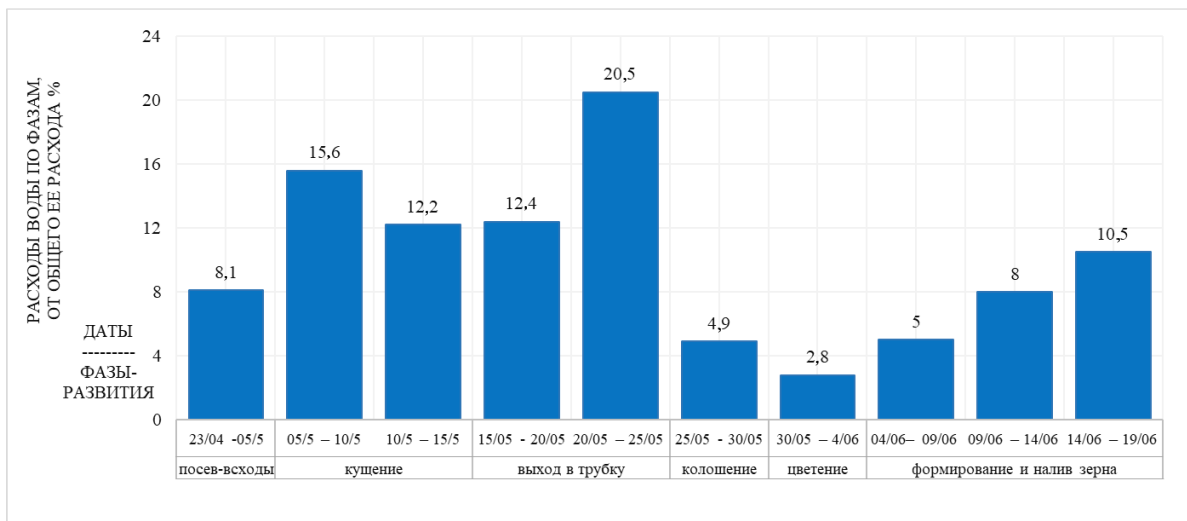


Рисунок 2.3 Расход воды по фазам развития яровой пшеницы, % от общего ее расхода [11].

Исторические данные о количестве осадков в декаде для станций, представляющих места проведения исследований в Адигуаэдаде и Халхале, показывают среднюю кумулятивную картину, как показано на рисунках 2.3 и 2.4. Сезон дождей в этих регионах обычно длится только до середины сентября (рис. 1.10). Учитывая, что полный цикл роста пшеницы в условиях Эритреи длится 105-115 [121]

дней, посев в идеале должен проводиться в период с июня по июль. Характеристики количества осадков, выпадающих на каждый год (рис. 2. 3 и 2.4), могут помочь согласовать потребности сельскохозяйственных культур в воде с количеством осадков, выпадающих в критические фазы роста.

Исторические данные о количестве осадков в декаде для станций, представляющих места проведения исследований в Адигуаэдаде и Халхале, показывают среднюю кумулятивную картину, как показано на рисунках 2, 4 и 2.5. Сезон дождей в этих регионах обычно длится только до середины сентября (рис. 1.10). Учитывая, что полный цикл роста пшеницы в условиях Эритреи длится 105-115 дней, посев в идеале должен проводиться в период с июня по июль. Потому что, если, например, посев проводится во второй декаде июня, то период роста урожая завершится в последней декаде сентября без риска выпадения осадков (эти дни будут совпадать с указанным выше диапазоном). Характеристики количества осадков в расчете на каждое десятилетие (рис. 2. 3 и 2.4) могут помочь привести потребности сельскохозяйственных культур в воде в соответствие с наличием осадков в критические фазы роста.

Для проведения этого анализа необходимо сначала собрать исторические данные о количестве осадков с метеостанций или со спутников. Данные должны охватывать несколько лет, чтобы отразить изменения в сезонных режимах выпадения осадков. Затем данные о количестве осадков делятся на 10-дневные интервалы, известные как декады, причем каждый месяц содержит три декады: 1-ю декаду (1-10-е дни), 2-ю декаду (11-20-е дни) и 3-ю декаду (21-й день - конец месяца). Для каждого декада рассчитывается общее количество осадков и усредняется за несколько лет, чтобы установить тенденции и спрогнозировать вероятные уровни осадков на предстоящий сезон.

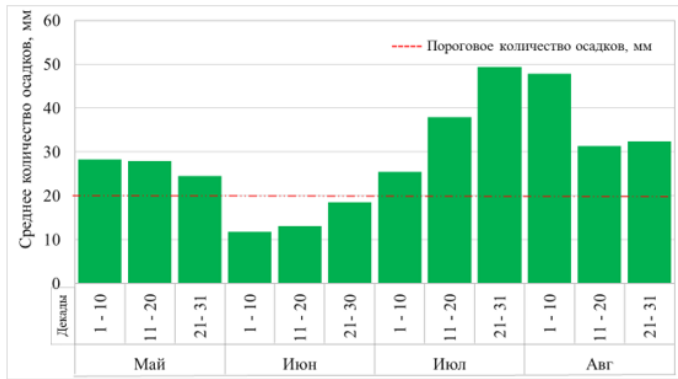


Рисунок 2.4 Среднее десятилетнее агрегирование данных о суточных осадках (Целот-Ади'Гуаэдад)

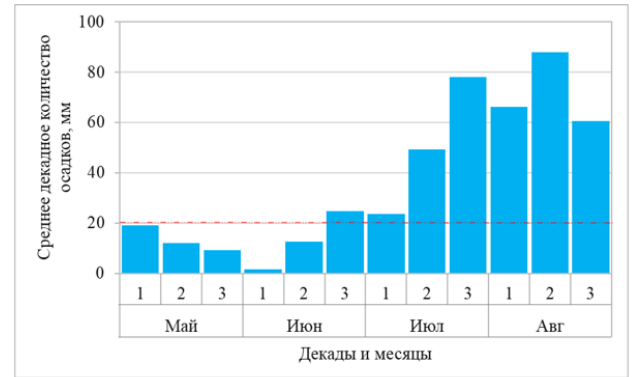


Рисунок 2.5 Среднее десятилетнее агрегирование данных о суточных осадках (Халхале)

Сроки посева, в частности дата посева, играют решающую роль в определении урожайности [87]. Выбор подходящей даты посева позволяет фермерам синхронизировать посев с благоприятными погодными условиями, эффективно уравнивая риски, связанные с ранним и поздним посевом. Ранний посев может привести к неожиданному выпадению осадков в критические периоды сбора урожая. Такие осадки могут нанести значительный ущерб, в том числе привести к потере урожая из-за осыпания или порчи, что негативно скажется на урожайности.

И наоборот, поздняя посадка может сократить вегетационный период и увеличить риск недостаточного количества осадков в критические фазы роста. Если посеять культуры в конце сезона, они могут не получить достаточного количества влаги для надлежащего развития, что приведет к снижению урожайности и снижению качества продукции. Ограниченное время, за которое посевы успевают укорениться до наступления засушливых периодов, может привести к замедлению роста и неурожаю.

Определение оптимальной даты посева имеет важное значение для эффективного управления этими рисками. Это позволяет фермерам пережить периоды засухи, используя при этом благоприятные условия для роста. Понимая местные климатические особенности и исторические погодные данные, фермеры могут принимать обоснованные решения о том, когда сеять семена. Такой

стратегический выбор времени позволяет максимально эффективно использовать влагу и повышает вероятность успешного прорастания семян. В конечном счете, поиск баланса между глубиной и сроками посева имеет жизненно важное значение для оптимизации урожайности и обеспечения продовольственной безопасности в засушливых регионах.

Метод использования количества осадков для определения оптимальных сроков посева. Метод кривой количества осадков помогает определить оптимальную дату посева на основе совокупных тенденций выпадения осадков. Это обеспечивает получение семенами достаточного количества влаги для прорастания, избегая при этом засушливых периодов. Этот метод широко используется в сельскохозяйственной метеорологии для систем возделывания сельскохозяйственных культур, зависящих от количества осадков [84, 85, 108].

$$R = \frac{P \times 100}{N + 1} \quad (2.1)$$

где: R - ранг процентиля (представляющий позицию процентиля в наборе данных), P - желаемый процентиль (например, 75 для 75-го процентиля), N - общее количество лет в наборе данных.

После сортировки набора данных в порядке возрастания на основе суммарного количества осадков, достигающего порогового значения для посева, вычисляется значение R. Если R - целое число, используйте значение в этой позиции, если R - десятичное, выполните интерполяцию между ближайшими рядами

Вероятность выпадения осадков. Эта формула вычисляет вероятность того, что за определенный период времени будет достигнут определенный порог количества осадков

$$P(E) = \frac{n(E)}{n(S)}, \quad (2.2)$$

где: P(E) - вероятность наступления события; n(E) - количество событий; и n(S) - размер выборочного пространства.

Формула процентильного ранжирования помогает определить, когда исторически достигается заданный порог количества осадков для посева, в то время как вероятность используется для определения вероятности достижения этого порога в заданную дату или раньше. Когда эти значения наносятся на график за несколько лет, в результате получается кривая вероятности выпадения осадков, показывающая вероятность достижения требуемого уровня влажности в разные даты.

Для определения порогового значения можно использовать суммарное испарение (ET_c). Исходное значение (ET_0) может быть рассчитано по уравнению Пенмана-Монтейта (FAO-56) в виде [75].

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (2.3)$$

где R_n – суммарная радиация на поверхности посевов (МДЖ/м²/сут); G – плотность теплового потока почвы (МДЖ/м²/сут); T – среднесуточная температура воздуха (°C); u_2 – скорость ветра на высоте 2 м (м/с); e_s – Давление насыщенного пара (кПа); e_a – фактическое давление пара (кПа); Δ – наклон кривой давления пара (кПа/°C); γ – психрометрическая постоянная (кПа/°C)

$$ET_c = ET_0 K_c, \quad (2.4)$$

где: K_c – Коэффициент урожайности (зависит от культуры и стадии роста)

Этот метод может быть использован для определения потребности сельскохозяйственных культур в воде в определенных условиях для определенного диапазона стадий роста и может быть использован для понимания водного баланса всего сельскохозяйственного сезона.

2.2. Теоретический анализ производительности машинно-тракторного агрегата

Исследования [13] показали, что любому сочетанию природных и производственных условий, включая длину гона (L) и другие, соответствует такая оптимальная мощность трактора N_{HO} , при которой основной показатель

ресурсосбережения-снижения затрат C_{Π} (руб./га) имеет минимальное значение $C_{\Pi} = C_{\Pi\text{м}}$. Если оптимальная мощность $N_{\text{НО}}$, соответствующая критерию $C_{\Pi} \rightarrow \min$, недостаточно удовлетворяет конкретным местным условиям, то можно определить соответствующую компромиссную мощность $N_{\text{НК}}$.

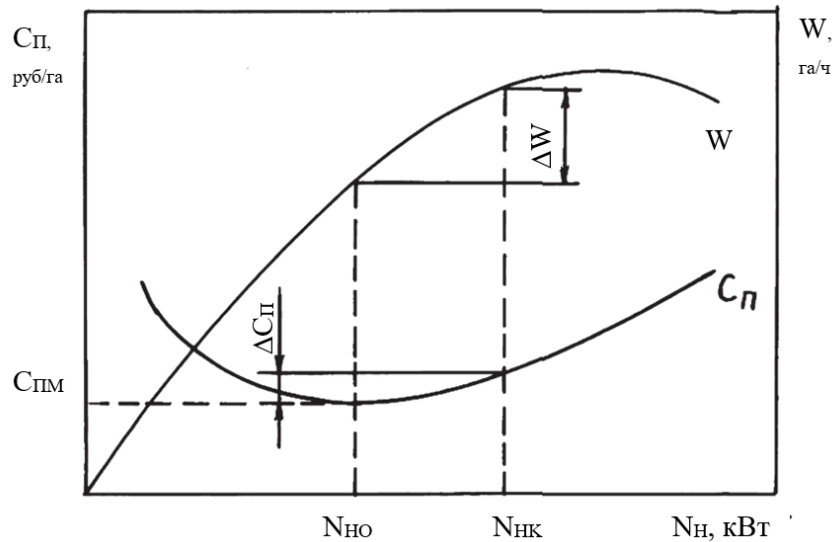


Рисунок 2.6 Схематическое изображение компромиссного решения

Например, при дефиците механизаторских кадров или неустойчивых погодных условиях желательно иметь агрегаты с более высокой производительностью при компромиссном уровне снижения затрат ($C_{\Pi\text{к}}$) для выполнения работ в установленные агротехнические сроки при соблюдении требований ресурсосбережения.

Для допустимого увеличения (ΔC_{Π}) минимальных затрат $C_{\Pi\text{м}}$ (рисунок 2.6) можно получить соответствующую компромиссную мощность ($N_{\text{НК}}$), которая приводит к значительному увеличению производительности (ΔW). Как показывают практические сценарии, увеличение минимальных затрат $C_{\Pi\text{м}}$ на 5 % ($\Delta C_{\Pi} = 0,05 C_{\Pi\text{м}}$) приводит к повышению производительности ΔW до 35-40 %, о чем свидетельствует пологий характер графика функции $C_{\Pi} = f(N_{\text{Н}})$ в области минимума.

Таблица 2.1 Рекомендуемые диапазоны ресурсосберегающих потребных мощностей двигателей тракторов для выполнения заданных операций [4, 15].

Вид операции	Класс длины гона, м			
	300–400	400–600	600–1000	1000 и более
	Диапазоны мощностей, кВт			
Вспашка легких почв	61–105	65–114	73–132	95–178
Вспашка средних почв	70–124	75–135	84–156	109–213
Вспашка тяжелых почв	76–134	80–145	90–168	117–230
Лущение стерни и дискование	61–110	74–138	83–160	106–217
Боронование средними зубо-выми боровами	26–41	32–52	37–61	43–75
Сплошная культивация	55–95	67–119	84–155	99–187
Прикатывание кольчато-шпоровыми катками	30–51	53–62	40–74	47–90
Посев зерновых (узкорядный)	54–87	59–94	62–101	69–114
Культивация междурядная	50–80	56–91	60–99	71–121

Таким образом, в таблице 2.1 представлен диапазон ресурсосберегающих мощностей тракторов ($N_{НО}-N_K$) для указанных операций, исходя из диапазонов длин полей (L) для нормирования полевых механизированных работ. Глубина вспашки на тяжелых и средних почвах составляет 0,22 м, на легких - 0,25 м.

Чтобы выбрать оптимальный диапазон мощности трактора для сельскохозяйственных работ, необходимо учитывать конкретные условия работы. При сложных погодных условиях и нехватке операторов мощность следует выбирать из более высокого диапазона, в то время как в нормальных условиях предпочтителен более низкий диапазон. На уплотненных почвах предпочтение отдается гусеничным тракторам из-за лучшей тяги и меньшего уплотнения почвы, хотя можно использовать и колесные тракторы, если они отвечают требованиям ресурсосбережения и обеспечивают совместимость с сельскохозяйственными орудиями.

Для междурядной обработки почвы подходят только универсально-пропашные тракторы, тракторы общего назначения не справляются с такими задачами. При

работе с одномашинными агрегатами крайне важно учитывать возможность поддержания оптимальной загрузки двигателя. Такой подход позволяет эффективно выбирать мощность трактора, обеспечивая при этом высокую производительность и экономию ресурсов.

С учетом этих соображений из табл. 2.2 выбирается соответствующий ресурсосберегающий трактор с мощностью N_H , эксплуатационной массой m и энергонасыщенностью $\Theta = N_H/(10^{-3})$, кВт/т

Таблица 2.2 Характеристики тракторов

№	Трактор	Колесная формула	η_{TP}	Мощность, кВт	Эксплуатационная масса, кг	Энергонасыщенность, кВт/т	Ссылки
1	FIAT 110-90	4WD	0,92	82,00	4,67	17,56	[125]
2	FIAT 100-90		0,92	74,60	4,67	15,97	
3	FIAT 80-66		0,92	58,80	2,80	21,00	
4	FIAT 80-66	2WD	0,92	59,70	2,63	22,70	[138]
5	YTO 1254	4WD	0,92	73,50	4,85	15,15	
6	YTO 1004	4WD	0,92	73,50	4,75	15,47	
7	FORGUSON 465	2WD	0,92	89,50	3,63	24,68	[126]
8	FORGUSON 390	4WD	0,92	89,50	4,21	21,26	
		2WD	0,92	56,70	2,74	20,72	
10	FORGUSON 393	2WD	0,92	70,80	3,18	22,24	
		4WD	0,92	70,80	3,46	20,44	
11	SAMI LASER 150	4WD	0,88	85,00	5,69	14,94	[127, 128]
12	Newholland T8030		0,88	201,00	9,75	20,62	
13	Newholland T8040		0,88	227,00	9,83	23,10	
14	Newholland T7070		0,83	167,80	7,25	23,15	
15	Newholland T7060		0,83	156,60	8,13	19,27	[22]
16	Newholland T6050		0,83	145,40	8,00	18,18	
17	Newholland T6090		0,88	165,00	15,00	11,00	
18	Newholland Td94	2WD	0,92	65,50	2,65	24,72	[23]
19	Newholland Td95	4WD	0,92	72,10	3,77	19,12	
20	CASE 535		0,88	398,90	19,34	20,62	[39]
21	CASE 630		0,88	85,00	3,20	26,56	
22	CASE 485		0,92	39,50	2,36	16,75	
23	CASE 480		0,92	39,50	5,50	7,18	

Для минимизации затрат при выполнении сельскохозяйственных работ важно выбрать подходящий трактор в зависимости от длины поля. В данном исследовании

длина участка на исследовательской площадке была сопоставлена с типичными диапазонами длины полей и соответствующей рекомендуемой мощностью трактора для конкретных операций (таблица 2.1). Анализ был сосредоточен на требованиях к мощности (в кВт) для различных классов длины полей: 300-400 метров, 400-600 метров, 600-1000 метров и более 1000 метров.

Участки всей площади производства пшеницы в высокогорных районах Эритреи (Целот-Адигуадад и Халхале) разделены на категории по длине, указанной в Таблице 2.3, и соответствующие площади, общая площадь и доля площади в % разделены по каждому диапазону длины.

Таблица 2.3 Распределение площадей ферм по диапазонам длины участков

Диапазон длин участков (м)	Площадь (га), ферма Целот-Адигуадад	Площадь (га), ферма Халхейл	Общая площадь (га)	Общая площадь %
< 100	14,18	9,76	23,94	1,9
100 – 200	139	77,9	216,9	16,8
200 – 300	47,7	89,3	137	10,6
300 – 400	322,24	250,8	573,04	44,4
400 – 600	130,06	0	130,06	10,1
600 – 1000	209,6	0	209,6	16,2

Средняя точка каждого класса, например 350 метров для диапазона 300-400 метров, была использована в качестве репрезентативного значения на оси x, обозначенного как «Длина гона (м)». Чтобы точно отразить изменчивость в пределах каждого класса, к каждой точке были добавлены горизонтальные полосы погрешностей. Минимальные и максимальные требования к мощности для каждого класса длины поля были нанесены на ось y, обозначенную «Мощность (кВт)», обеспечивая четкую и полную визуализацию взаимосвязи между длиной поля и требуемой мощностью трактора.

Уравнения оценки модели для линии, соединяющей средние мощности минимального и максимального диапазонов для заданных длин участков для каждой полевой операции, приведены на рисунке 2.7.

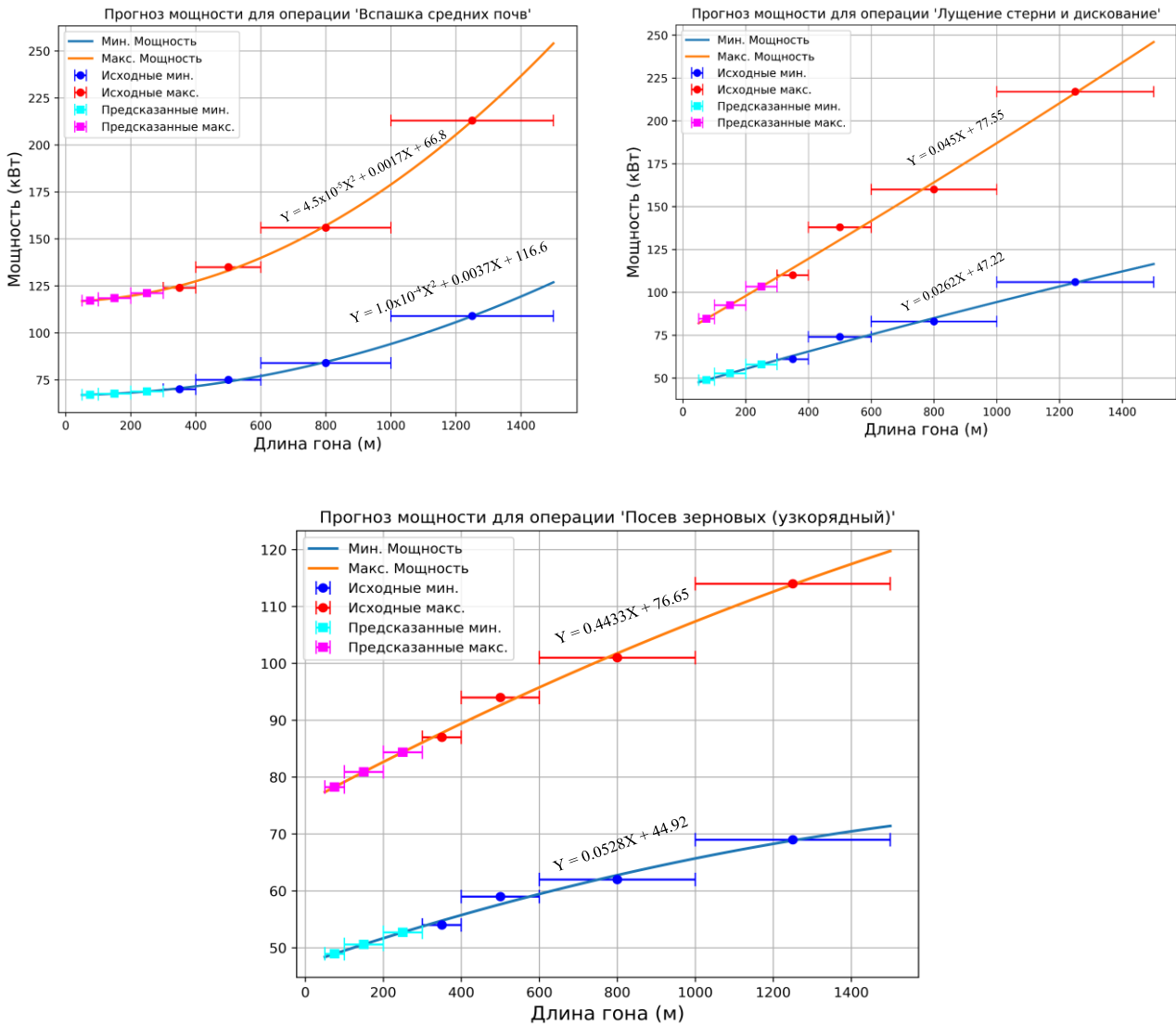


Рисунок 2.7 Потребность в мощности машин для полевых работ в зависимости от длины гона.

Таблице 2.4 Расчетный диапазон ресурсосберегающей мощности двигателя трактора для выполнения заданных операций в диапазоне длины гона ≤ 300 м

Вид операции	Класс длины гона, м		
	50 – 100	100 – 200	200 – 300
	Диапазоны мощностей кВт		
Вспашка средних почв	67 – 117	68 – 119	69 – 121
Лущение стерни и дискование	49 – 85	53 – 93	58 – 103
Посев зерновых (узкорядный)	49 – 78	51 – 81	53 – 84

На основе прогнозирующих моделей рассчитанный диапазон оптимальной мощности в кВт для длин, не превышающих приведенных в литературе значений (табл. 2.1), представлен в таблице 2.4.

На основе этого анализа с помощью интерполяции были рассчитаны потребности в мощности для других участков, и соответствующие значения показаны на последующих участках. Такой подход позволил более точно спрогнозировать оптимальную мощность трактора для полей разной длины, обеспечивая эффективность и рентабельность полевых работ.

Таблица 2.5. Рекомендуемая мощность трактора для операций по первичной обработке почвы в зависимости от класса длины поля.

Класс длины гона, м							
100-300		300-400		400-600		600 - 1000	
Area proportion (%)							
29,3		44,4		10,1		16,2	
Марка трактора	Мощность, кВт,	Марка трактора	Мощность, кВт.	Марка трактора	Мощность, кВт.	Марка трактора	Мощность, кВт.
FORGUSON 393	70,8	FORGUSON 393	70,8	FIAT 110-90	82	Newholland T6050	145,4
FORGUSON 394	70,8	FORGUSON 394	70,8	SAMI LASER 150	85	Newholland T7060	156,6
Newholland Td95	72,1	Newholland Td95	72,1	CASE 630	85	Newholland T6090	165
YTO 1254	73,5	YTO 1254	73,5	FORGUSON 465	89,5	Newholland T7070	167,8
YTO 1004	73,5	YTO 1004	73,5	FORGUSON 390	89,5	Newholland T8030	201
FIAT 100-90	74,6	FIAT 100-90	74,6				
FIAT 110-90	82	FIAT 110-90	82				
SAMI LASER 150	85	SAMI LASER 150	85				
CASE 630	85	CASE 630	85				
FORGUSON 465	89,5	FORGUSON 465	89,5				
FORGUSON 390	89,5	FORGUSON 390	89,5				

На рисунке 2.7 в левых колонках приведены фактические значения, а в правых - расчетные. На основе этого метода исследуемые участки были распределены по категориям для трех основных операций, обычно выполняемых в Эритрее. Длины участков были разделены на 400-300, 300-200 и 200-100 м, а тракторы, выбранные из таблицы 2.2 для этих длин участков, были из того же парка тракторов мощностью 70,8 и 89,5 кВт. Для основной обработки почвы список приводится в виде модели трактора (мощность в кВт). К этому парку тракторов относятся FORGUSON 393 и FORGUSON

394 (70,8); Newholland Td95 (72,1); YTO 1254 и YTO 1004 (73,5); FIAT 100-90 (74,6); FIAT 110-90 (82); SAMI LASER 150 (85); CASE 630 (85) и FORGUSON 465 и FORGUSON 390 (89,5). При длине участков, которая в среднем составляет 400-600 м, FIAT 110-90 (82); SAMI LASER 150 (85); CASE 630 (85) и FORGUSON 465 и FORGUSON 390 (89,5), Newholland T6050 (145,4).

Для основной обработки почвы длиной 600-1000 используются тракторы Newholland T6050 (145,4), T7060 (156,6), T6090 (165), T7070 (167,8), T8030 (201) (табл. 2.5). Эти тракторы необходимы для покрытия 16,2% общей площади.

Таблица 2.6. Рекомендуемая мощность трактора для предпосевной обработки в зависимости от класса длины поля.

Класс длины гона, м							
100-300		300-400		400-600		600 – 1000	
Доля площади (%)							
29,3		44,4		10,1		16,2	
Тракторы и соответствующая мощность							
Марка трактора	Мощность, кВт.	Марка трактора	Мощность, кВт.	Марка трактора	Мощность, кВт.	Марка трактора	Мощность, кВт.
FORGUSON 391	56,7	Newholland Td94	65,5	FIAT 100-90	74,6	Newholland T6050	145,4
FIAT 80-66	58,8	FORGUSON 393	70,8	FIAT 110-90	82	Newholland T7060	156,6
FIAT 80-66	59,7	FORGUSON 394	70,8	SAMI LASER 150	85	Newholland T6090	165
Newholland Td94	65,5	Newholland Td95	72,1	CASE 630	85	Newholland T7070	167,8
FORGUSON 393	70,8	YTO 1254	73,5	FORGUSON 465	89,5	Newholland T8030	201
FORGUSON 394	70,8	YTO 1004	73,5	FORGUSON 390	89,5		
Newholland Td95	72,1	FIAT 100-90	74,6	Newholland T6050	145,4		
YTO 1254	73,5	FIAT 110-90	82				
YTO 1004	73,5	SAMI LASER 150	85				
FIAT 100-90	74,6	CASE 630	85				
FIAT 110-90	82	FORGUSON 465	89,5				
SAMI LASER 150	85	FORGUSON 390	89,5				
CASE 630	85						
FORGUSON 465	89.5						
FORGUSON 390	89.5						

Для предпосевной обработки почвы на длинах 400-300, 300-200 и 200-100 м

список подходящих тракторов приведен в таблице 2.5. Тракторы YTO 1254 и 1004; FIAT 100-90 и 110-90; SAMI LASER 150; CASE 630; FORGUSON 465и 390 могут быть использованы на всех полях на всех имеющихся длинах, а парк тракторов модели Newholland T6050 экономически целесообразно использовать на участках с длиной колеи от 400 до 600 м. Тракторы моделей FORGUSON 391, FIAT 80-66 можно использовать только на участках длиной 100-300 м. Остальные детали можно представить в виде таблицы 2.6.

Таблица 2.7. Рекомендуемая мощность трактора для посевных работ в зависимости от класса длины поля.

Класс длины гона, м					
100-300		300-400		400-1000	
Тракторы и соответствующая мощность					
Доля площади (%)					
29,3		44,4		26,3	
Марка трактора	Мощность, кВт.	Марка трактора	Мощность, кВт.	Марка трактора	Мощность, кВт.
FORGUSON 391	56,7	FORGUSON 391	56,7	FIAT 80-66	59,7
FIAT 80-66	58,8	FIAT 80-66	58,8	Newholland Td94	65,5
Newholland Td94	65,5	FIAT 80-66	59,7	FORGUSON 393	70,8
FORGUSON 393	70,8	Newholland Td94	65,5	FORGUSON 394	70,8
FORGUSON 394	70,8	FORGUSON 393	70,8	Newholland Td95	72,1
Newholland Td95	72,1	FORGUSON 394	70,8	YTO 1254	73,5
YTO 1254	73,5	Newholland Td95	72,1	YTO 1004	73,5
YTO 1004	73,5	YTO 1254	73,5	FIAT 100-90	74,6
FIAT 100-90	74,6	YTO 1004	73,5	FIAT 110-90	82
FIAT 110-90	82	FIAT 100-90	74,6	SAMI LASER 150	85
		FIAT 110-90	82	CASE 630	85
		SAMI LASER 150	85	FORGUSON 465	89,5
		CASE 630	85	FORGUSON 390	89,5

Для посевной операции подходящие тракторы перечислены в таблице 2.7. FIAT 80-66, Newholland Td94, FORGUSON 393 и 394, Newholland Td95, YTO 1254 и 1004, FIAT 100-90 и 110-90 потенциально могут использоваться для посева на полях любой длины при наличии подходящей сеялки и других необходимых вспомогательных и навесных устройств. В тех случаях, когда потребность в мощности агрегата выше, чем

у Nardi Dora 600, которому требуется тяговое дышло мощностью 94,4 кВт (82,02 кВт + 15% в моменты превышения требуемой мощности), и если предположить, что 60% номинальной мощности достигает тягового дышла, то требуемая номинальная мощность составит около 157 кВт, что экономически может быть выполнено только Newholland T6090 (165 кВт).

Таким образом, минимальная стоимость выполнения операций в области производства пшеницы, контролируемой ECLC, может быть выполнена на основе анализа, приведенного выше, если критерий $C_{\Pi} \rightarrow \min$ не подходит для местных условий, можно выбрать компромиссную мощность N_{HK} . Ограниченное количество машинистов или нестабильная погода могут потребовать использования более производительных, экономичных агрегатов ($C_{ПК}$) для обеспечения своевременного завершения работ и эффективности использования ресурсов.

Производительность. При расчете производительности сельскохозяйственных машин при нормировании полевых механизированных работ в нормальных условиях используются следующие формулы, по [3, 4, 5, 7, 15]:

$$W = \frac{W_{cm}}{T_{cm}} = 0,36BV\tau = 0,36\Pi\tau, \quad (2.5)$$

где Π – производительность за час чистой работы агрегата; поля правильной конфигурации (прямоугольной формы); рельеф ровный (угол склона $\alpha < 1^\circ$); высота над уровнем моря до 500 м; каменистость и препятствия отсутствуют; почвы со средней прочностью несущей поверхности и влажностью до 22%. Отклонение условий работы МТА от указанных типовых при расчете его производительности учитывают обобщенным поправочным коэффициентом $K_{об}$, определяемым в виде произведения:

$$K_{об} = k_k, k_{и}, k_c, k_{п}, k_p, \quad (2.6)$$

где $k_k, k_{и}, k_c, k_{п}, k_p$ – частные поправочные коэффициенты соответственно на каменистость, высоту над уровнем моря, сложность конфигурации полей, изрезанность полей препятствиями и на рельеф.

Производительность агрегата в заданных условиях: при этом определяется из равенства

$$W = 0,36 \cdot K_{об} \cdot B \cdot v \cdot \tau, \quad (2.7)$$

где W , – производительность агрегата соответственно в заданных и типовых условиях, га/ч; B – рабочая ширина захвата, м; v – рабочая скорость, м/с; τ – коэффициент использования времени смены в типовых условиях; $K_{об}$ – обобщенный поправочный коэффициент на местные условия.

Таблица 2.8. Значения поправочных коэффициентов [4]

а) на каменистость										
Вид работы	Степень каменистости									
	Отсутствует	Слабая	Средняя	Сильная						
Пахотные	1,00	0,98	0,92	0,85						
Непахотные	1,00	0,99	0,93	0,82						
Кошение трав	1,00	0,90	0,85	-						
б) на высоту над уровнем моря,										
Высота над уровнем моря, м	Длина гона и вид работы									
	менее 200 м		200 – 600 м		более 600 м					
	пахот.	непахот.	пахот.	непахот.	пахот.	непахот.				
До 500	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00				
500 – 1000	0,95	0,98	0,94	0,97	0,93	0,96				
1000 – 1500	0,91	0,96	0,89	0,95	0,8	0,94				
1500 - 2000	0,88	0,94	0,85	0,93	0,82	0,92				
в) на сложность конфигурационных полей,										
Группа контура	Длина гона и вид работы									
	менее 200 м		200 – 400 м		400 – 600 м		600 – 1000 м		более 1000 м	
	пахот	неп	Пахот	неп	пахот	неп	пахот	неп	пахот	неп
I	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
II	0,97	0,96	0,98	0,97	0,99	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
III	0,91	0,92	0,95	0,94	0,97	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00
IV	0,81	0,83	0,87	0,89	0,93	0,95	1,00	1,00	1,00	1,00
V	0,75	0,79	0,84	0,86	0,88	0,92	0,96	0,98	1,00	1,00
г) на изрезанность полей препятствиями,										
Вид работы	Площадь, занимаемая препятствиями, %									
	0	до 5	5 – 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 35		
Пахотные	1	0,96	0,92	0,88	0,84	0,81	0,77	0,74		
Непахотные	1	0,96	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,77		
на рельеф: при угле склона										
Угол склона	На пахотные работы K_p				На непахотные работы K_p					
1...3 град	0,97				0,95					

Значения указанных частных коэффициентов выбираются из таблицы 2.8 в

соответствии с заданием. Прочность несущей поверхности и влажность условно принимаются соответствующими типовым условиям.

Многочисленные компоненты баланса времени смены при определении $T_{см}$ можно грубо разделить на четыре группы. Первая группа включает в себя постоянные составляющие: время на отдых и личные нужды; время на получение заказа и т.д.

Вторая группа составляющих потерь времени смены зависит от параметров агрегата и возникает независимо от фактической производительности агрегата. Такими составляющими являются: время посменного технического обслуживания агрегата перед перемещением к месту работы и т.д. Третья группа включает потери времени смены в зависимости от фактической производительности агрегата: время холостых оборотов; время технологического обслуживания и т.д. Четвертая группа включает время основной (чистой) работы.

Исходя из вышеизложенного, увеличенный баланс времени смены может быть представлен в виде

$$\tau = \frac{T_P}{T_{см}}, \quad (2.8)$$

$$T_{см} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \quad (2.9)$$

где - T_1, T_2, T_3 and T_4 соответствующие группы компонентов баланса времени смены, с.

Как уже говорилось, первый набор компонент не зависит от агрегатных параметров; таким образом, мы можем взять

$$T_1 = T_{п} = constant, \quad (2.10)$$

Вторая группа составляющих, как показывают статистически данные, увеличиваются по мере роста мощности трактора. Особенно наглядно подтверждается это положение на примере времени ежесменного технического обслуживания. Поскольку мощность трактора пропорциональна производительности

агрегата в единицу времени основной (чистой) работы, то для этой группы составляющих приближенно можно принять

$$T_2 = a_2 + b_2 \cdot \Pi, \quad (2.11)$$

где a_2 и b_2 - коэффициенты, определяемые по статистическим данным.

Третью группу составляющих баланса времени смены приближенно можно принять пропорциональной сменной выработке агрегата

$$T_3 = K_W \cdot W_{\text{см}} = K_{\text{см}} \cdot B \cdot V \cdot K_W \cdot T_P = K_W \cdot \Pi \cdot T_P, \quad (2.12)$$

где K_W - коэффициент пропорциональности.

Четвертая составляющая T_4 равна времени выполнения основной работы T_P , таким образом, $T_4 = T_P$. Комбинируя вышеприведенные формулировки, можно рассчитать время смены как

$$T_{\text{см}} = T_{\Pi} + a_2 + b_2 \cdot \Pi + K_W \cdot \Pi \cdot T_P + T_P; \quad (2.13)$$

Коэффициент использования времени смены, от (2.8) и (2.13)

$$\tau = \frac{h_W - a_W \Pi}{1 + K_W \cdot \Pi}, \quad (2.14)$$

где $h_W = 1 - \frac{T_{\Pi} + a_2}{T_{\text{см}}}$ и $a_W = \frac{a_2}{T_{\text{см}}}$

По данным Американского общества инженеров сельского хозяйства и биологии (ASABE), производительность любого МТА основывается на аргументе, исключающем время, необходимое для перемещения машины на поле или с поля, при расчетах эффективности. Поскольку, согласно ASABE, эффективность работы на поле будет сильно варьироваться в зависимости от расстояния между полями и расстояния от места хранения машин.

Согласно этому аргументу, производительность определяется как количество обработки, которое машина может выполнить за час. Производительность МТА может быть выражена в количестве материала, обработанного за единицу времени, или площади, обработанной за единицу времени. Таким образом, на основе ASABE в

расчете на единицу площади получается [118, 92, 60,71, 102, 143] .

$$C_a = \frac{vw\eta_f}{10} \quad (2.15)$$

На материальной основе производительность МТА составляет:

$$C_m = \frac{vwY\eta_f}{10} = C_a \times Y \quad (2.16)$$

где C_a - производительность МТА на базе площади, га/ч; C_m - производительность МТА на базе материала, мг/ч; v - рабочая скорость, км/ч; w - ширина захвата МТА, м; Y - урожайность, мг/га; η_f = эффективность, десятичная дробь.

Фактическое время, необходимое для выполнения операции, будет увеличено за счет перекрытия, времени, необходимого для включения концов поля, времени, необходимого для погрузки или выгрузки материалов и т.д.

Эффективность поля можно рассчитать по следующему уравнению:

$$\eta_f = \frac{T_t}{T_e + T_h + T_a} \quad (2.17)$$

$$T_e = \frac{T_t}{K_w} \quad (2.18)$$

где T_e - эффективное время работы, ч; K_w - доля фактически используемой ширины захвата (зависит от степени перекрытия); T_a - потери времени, пропорциональные площади, такие как добавление удобрений или семенных коробок, или заполнение баков для опрыскивания, ч; T_h - потери времени, не пропорциональные площади, ч, такие как остановки для отдыха, регулировка оборудования и холостой ход на концах поля. Некоторые потери времени могут соответствовать обоим условиям, например, при заданной урожайности время, затраченное на разгрузку собранного урожая, пропорционально площади, но время

разгрузки также увеличивается с ростом урожайности. Поскольку трудно провести различие между пропорционально и не пропорционально, уравнение можно изменить следующим образом

$$\eta_f = \frac{T_t}{T_e + T_L}, \quad (2.19)$$

где T_L - общие потери времени, исключая потери времени из-за накладок.

2.3. Анализ эффективного движения машинно-тракторного агрегата

Выбор оптимальных маршрутов полевых работ имеет решающее значение для максимальной производительности оборудования, обеспечения высокого качества работ и минимизации потребления ресурсов при соблюдении стандартов безопасности и охраны окружающей среды. Такие факторы, как топливная экономичность, ширина полосы и способы поворота, должны учитываться в зависимости от типа работ, используемой техники и полевых условий. Правильные кинематические решения повышают производительность и экономят ресурсы. И наоборот, неправильное планирование маршрута может свести на нет преимущества оборудования. Эффективное планирование маршрута сводит к минимуму расход топлива, снижает воздействие на почву и обеспечивает безопасность оператора. Передовые методы, такие как системы GPS-навигации или алгоритмы оптимизации, повышают эффективность работы в полевых условиях за счет сокращения поворотов и увеличения продолжительности проходов, приводя операции в соответствие с целями устойчивого развития [118, 92, 64, 141, 8]. Формулировка этого раздела полностью зависит от [118, 92].

Ширина полоса не должна быть меньше минимального значения, указанного ниже ($E_{\min}$), и должна быть кратна ширине захвата в один или два раза. Компоненты указаны на рисунке 2.8.

$$E_{\min} = e + h + d_k; \quad (2.20)$$

где d_k - расстояние от продольной оси, проходящей через кинематический центр

устройства, до наиболее удаленной точки. Формулировка элементов $E_{\min}$ подробно описана в [4] для условий, приведенных на рисунке 2.8.

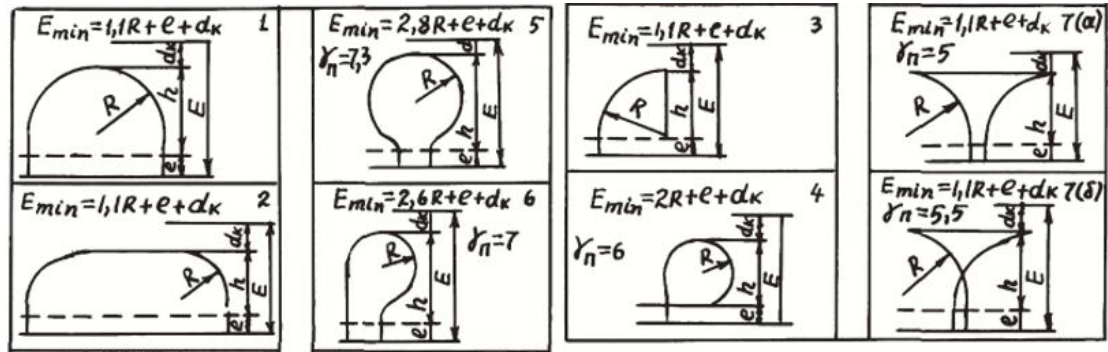


Рисунок 2.8 1– беспетлевой на 180°; 2 – беспетлевой с прямолинейным участком; 3– беспетлевой на 90°; 4 – перекрестно-петлевой; 5 – петлевой грушевидный; 6 – петлевой односторонний; 7а, б – петлевые грибовидные.

Исходя из приведенного выше контекста, количество проходов мыса может быть рассчитано следующим образом: n_{HP}

$$n_{HP} = \frac{E_{\min}}{B} \quad (2.21)$$

Значение n_{HP} всегда округляется в большую сторону до нечетного целого значения для нечетного числа проходов или до ближайшего четного значения для четного числа проходов

С точки зрения оптимизации ресурсов, геометрическая конфигурация полевых участков должна быть спроектирована таким образом, чтобы свести к минимуму расстояние простоя (S_x) на единицу обрабатываемой площади, а также время простоя смены (T_x).

$$S_x = \frac{10^4}{L} \cdot \left(E_x \cdot \lambda_c + \frac{A_x}{\lambda_c} + D_x \right) \rightarrow \min, \quad (2.22)$$

$$T_x = \frac{10^4}{L} \cdot \left[\frac{3.6}{V_x} \cdot \left(E_x \cdot \lambda_c + \frac{A_x}{\lambda_c} + D_x \right) + \frac{Z \cdot T_{BC}}{C} \right] \rightarrow \min \quad (2.23)$$

где $\lambda_c = C/B$ - отношение ширины загона к рабочей ширине; L - длина гона, м; B - ширина захвата агрегата, м.

Для режимов движения, указанных на рисунке 2.8, значения и методы расчета

E_X, A_X и D_X различны.

де T_X - время, потерянное во время смены из-за холостого хода, с; V_X - скорость вращения на холостом ходу, км/ч; Z - количество единиц, работающих в одном загоне; T_{BC} - дополнительное время, связанное с простоем сельскохозяйственной техники и тракторных агрегатов (МТА) в пределах одного загона, с. $Z = 1$ для блоков, работающих раздельно.

Оптимальную ширину загона можно найти по следующим параметрам:
 $dT_X/d.C = 0$.

$$C_{TOP} = B \cdot \sqrt{\frac{1}{E_{XO}} \cdot \left(A_X + \frac{Z \cdot T_{BC} \cdot V_X}{3,6} \right)}, \quad (2.24)$$

For $T_{BC} = 0$;

$$C_{SOP} = B \cdot \sqrt{\frac{A_X}{E_X}}, \quad (2.25)$$

Чтобы оптимизировать ширину загона, ширина загона должна быть в два раза больше ширины, которую оборудование может преодолеть за один проход. Поэтому, используя уравнение (2.24) в качестве ориентира, вам нужно заранее решить, сколько раз МТА потребуется проехать взад и вперед (двойные проходы), чтобы полностью покрыть загон.

$$n_{2TP} = \frac{C_{TOP}}{2B}, \quad n_{2SP} = \frac{C_{SOP}}{2B}, \quad (2.26)$$

Округление этого значения дает $n_{2T} \geq n_{2TP}$ и $n_{2S} \geq n_{2SP}$ а соответствующая фактическая оптимальная ширина загона равна:

$$C_{TO} = 2 \cdot B \cdot n_{2T}, \quad C_{SO} = 2 \cdot B \cdot n_{2S}, \quad (2.27)$$

Исходя из фактической ширины загона, длина холостого хода S_{XO} для

$$S_{XO} = \frac{10^4}{L} \cdot \left(E_X \cdot \lambda_{CSO} + \frac{A_X}{\lambda_{CSO}} + D_X \right), \quad (2.28)$$

Исходя из этого, коэффициент рабочего хода равен

$$\phi_{PO} = \frac{S_P}{S_P + S_{XO}} = 1 / \left[1 + \frac{B}{L} \cdot \left(E_X \cdot \lambda_{CSO} + \frac{A_X}{\lambda_{CSO}} + D_X \right) \right], \quad (2.29)$$

Значение $S_p = 10^4/B$, м, соответствует рабочей длине на гектар.

Потери времени простоя на гектар: $\lambda_c = \lambda_{\text{СТО}} = C_{\text{ТО}}/B$

$$T_{\text{ХО}} = \frac{10^4}{L} \cdot \left[\frac{3,6}{V} \cdot \left(E_X \cdot \lambda_{\text{СТО}} + \frac{A_X}{\lambda_{\text{СТО}}} + D_X \right) + \frac{Z \cdot T_{\text{ВС}}}{C_{\text{ТО}}} \right], \quad (2.30)$$

Решения приведенных выше уравнений зависят от значений $E_X A_X D_X$ для всех различных способов передвижения. Эти значения подробно описаны в книгах, на которые есть ссылки в [4, 15].

2.4. Теоретический анализ точности работы МТА

Оценка работы сельскохозяйственной техники позволяет вносить изменения в планировку полей и совершенствовать последующую организацию и методы работы. Для оценки можно использовать множество подходов, включая эффективность использования времени и производительность, энергопотребление и качество работы. Оценка посевного оборудования в режиме реального времени или после операции необходима для оптимизации посевных работ в современном сельском хозяйстве.

Посев - одна из важнейших операций в сельскохозяйственном производстве. В современном сельском хозяйстве высокопроизводительные и точные сеялки играют большую роль в поддержании динамики спроса на продовольствие. Размещение необходимого количества семян в нужном месте (точное расстояние между растениями и рядами на нужную глубину), оптимальная норма высева и сроки - вот некоторые из основных функций сеялок [117, 81]. Машины с автоматическим приводом повышают точность работы за счет применения современных корректирующих служб, таких как RTK и GPS, для обеспечения точного размещения семян и минимизации ошибок.

Системы наведения на основе GPS стали краеугольным камнем точного земледелия и широко используются фермерами и операторами благодаря их способности повышать точность обработки и эффективность работы. Автоматизируя рулевое управление, эти системы снижают утомляемость оператора и сводят к

минимуму человеческие ошибки, что приводит к повышению эффективности вождения в течение длительного рабочего дня [16, 28, 57, 114]. Они значительно сокращают пропуски, перекрытия и ущерб урожаю, оптимизируя использование таких ресурсов, как семена, удобрения и пестициды, тем самым повышая потенциальную урожайность и рентабельность фермы. Дополнительные преимущества включают возможность работы в условиях плохой видимости, точное размещение материалов и бережное отношение к окружающей среде при управлении полевыми участками.

Внедрение технологии наведения повышает эффективность и пропускную способность поля, сокращая расход топлива и время работы на единицу площади. Благодаря оптимизированному планированию траектории, эти системы требуют от операторов создания заранее определенных линий АВ — опорных траекторий, которые определяют параллельный проход машины по полю [98]. Хотя линии АВ часто основаны на историческом опыте управления полями или удобстве (например, начинаются с ближайшей точки входа), их субъективный выбор может не обеспечить максимальной эффективности оборудования. Эффективность работы в полевых условиях, определяемая как отношение времени продуктивной работы к общему времени работы в полевых условиях, зависит от схемы движения, в частности от баланса между длиной прохода и частотой поворотов. Критическими факторами для оптимизации линий АВ являются размер и форма поля, рельеф местности (например, влияние склона на эрозию), характеристики дренажа, точки входа, препятствия на поле, размеры оборудования и интеграция с инструментами точного земледелия. Стратегическое планирование траектории, учитывающее эти переменные, может еще больше повысить оперативную точность и устойчивость использования ресурсов.

Для определения наилучших маршрутов многие методы основаны на разделении поля на дорожки, которые представляют собой длинные полосы с заранее определенной ориентацией, по которым транспортные средства должны двигаться от

начала до конца, с шириной колеи, равной эффективной ширине орудия. При выполнении работ по обработке дорожки должны быть равны ширине орудия и должны быть пройдены ровно один раз, чтобы гарантировать полную обработку без перекрытий. Таким образом, оптимальный маршрут для транспортного средства — это последовательность дорожек, которая минимизирует пройденное расстояние и, следовательно, затраченное время и расход топлива.

Согласно [43], задача нахождения наилучшей последовательности для набора транспортных средств аналогична классической комбинаторной задаче множественного коммивояжера. Алгоритмы управления с отслеживанием траектории в сельском хозяйстве обычно направлены на повышение эффективности отслеживания траектории автономной сельскохозяйственной техники, а производительность сельского хозяйства оптимизируется двухуровневым способом. Верхний операционный уровень оптимизирует оптимальную траекторию слежения с наилучшей сельскохозяйственной производительностью, а нижний уровень управления, такой как прогнозирующее управление нелинейной моделью, сначала получает эту оптимизированную траекторию слежения, а затем направляет транспортное средство для отслеживания этой траектории с высокой точностью [55]. Для обеспечения связи между машиной и географическим местоположением для создания траекторий и отслеживания их хода используется множество технологически продвинутых инструментов.

Спутниковая система GNSS (Глобальная навигационная спутниковая система) используется для точного определения географического местоположения приемника пользователя в любой точке мира [98, 107]. Основными системами GNSS, которые используются в настоящее время, являются Глобальная система позиционирования (GPS), Глобальная орбитальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС) и Galileo. Каждая из этих систем использует группу орбитальных спутников, работающих в связке с сетью наземных станций для облегчения навигации.

Полностью автоматизированные системы автоматического рулевого управления позволяют вести сельскохозяйственную машину как по прямой, так и по кривой линии по полю с боковой точностью до нескольких сантиметров при использовании высокоточных кинематических GPS-приемников реального времени (RTK). Информация о местоположении, получаемая от систем RTK GPS, может использоваться не только для ориентирования, но и для других целей, таких как составление карты посевов, управление движением и обработка почвы.

Автоматизированные навигационные системы предоставляют возможности для составления оптимизированных планов маршрутов с учетом охвата полевых работ. В неоптимизированной практике движения по полю маршрут сельскохозяйственного транспортного средства состоит из серии повторений движения взад и вперед, которые следуют стандартному принципу, например, всегда въезжать на соседнюю с уже обработанной трассу для полевых работ. С другой стороны, оптимизированный охват полевых площадей обеспечивает прокладку маршрутов, которые невозможно выполнить без внедрения навигационных систем. В последнее время был разработан ряд методов планирования маршрутов для охвата полевых территорий [111].

Задача о множестве коммивояжеров может быть решена с помощью методов метаэвристической оптимизации. Многие из этих методов начинаются с случайной генерации исходных решений и создания новых и улучшенных решений путем итеративной модификации. Некоторые примеры - имитация отжига и оптимизация колонии муравьев. Эти методы исследуют пространство возможных решений (пространство поиска), создавая новые решения и заменяя существующие. Механизмы, используемые этими методами для создания решений, известны как операторы.

Некоторые из наиболее распространенных операций в задачах оптимизации маршрута основаны на перемещении, замене или инверсии элементов порядка. Например, оператор "Переместить" берет один элемент на маршруте и вставляет его

в произвольное положение. Оператор "Поменять местами" просто меняет местами два элемента. Оператор простой инверсии делит маршрут на три части, изменяет порядок следования средней части и соединяет их заново. Оператор перерезанной инверсии аналогичен простой инверсии, но вставляет перевернутую часть в случайное положение вместо того же места. Оператор *or-opt* удаляет группу последовательных элементов и вставляет ее снова в другом месте [21]. Другой оператор, *Mix-opt*, смешивает и объединяет элементарные операции некоторых наиболее распространенных операторов и расширяет их до дополнительных вариантов, таких как перемещение или замена одного или нескольких элементов, перемещение или замена их местами напрямую или в обратном порядке, а также перемещение или замена их местами в нескольких местах с сохранением перестановок также разработан метод, позволяющий найти наилучший маршрут (локальный поиск) [43].

Планирование маршрутов движения сельскохозяйственной техники - важнейший аспект современного сельского хозяйства, который направлен на оптимизацию маршрутов движения техники во время полевых работ. Эффективное планирование маршрутов повышает эффективность работы, сокращает расход топлива, сокращает расстояния в нерабочее время и, в конечном счете, снижает затраты. Поскольку методы ведения сельского хозяйства становятся все более механизированными и автоматизированными, эффективное планирование маршрутов играет жизненно важную роль в обеспечении бесперебойной и эффективной работы техники на различных участках и в зависимости от расположения сельскохозяйственных культур.

Используя передовые алгоритмы и методологии, фермеры могут повысить свою производительность, сохраняя при этом устойчивость своей деятельности. Некоторые из наиболее часто используемых алгоритмов — это оптимизация колоний муравьев - эффективны для решения задач маршрутизации транспортных средств с большой вместимостью в сельскохозяйственных условиях, что значительно сокращает

нерабочие расстояния [144]; Алгоритм кратчайшего пути на основе задержки поворота - включает задержки поворота в расчеты кратчайшего пути для оптимизации маршрутов сельскохозяйственной техники с учетом дополнительных затрат времени и энергии ассоциируется с поворотами [142]; Планирование траектории движения — предназначено для обеспечения полного охвата поля сельскохозяйственной техникой, оптимизируя пройденный путь, чтобы свести к минимуму перекрытия и пропущенные участки во время таких операций, как опрыскивание или посев семян [96]; Генетические алгоритмы — имитируют процессы естественного отбора для выработки решений на протяжении поколений, что делает их пригодными для решения сложных задач планирования маршрутов, где преследуется множество целей. должны быть сбалансированы [96]; Динамическое программирование — метод, который разбивает сложные задачи маршрутизации на более простые подзадачи, решая их рекурсивно, чтобы найти оптимальные пути для работы сельскохозяйственной техники.; Алгоритм Дейкстры — классический алгоритм, используемый для нахождения кратчайших путей между узлами в графе, применимый для определения эффективных маршрутов движения сельскохозяйственной техники по полям [54]; Быстрое изучение случайного дерева - полезно для планирования маршрутов в сложных условиях путем постепенного построения дерева возможных путей, особенно эффективного для навигации по полям. препятствия на полях [142]; и гибридная оптимизация роя частиц — сочетает оптимизацию роя частиц с другими методами для повышения эффективности планирования маршрутов за счет эффективного изучения пространства решений и адаптации к данным в режиме реального времени [67]

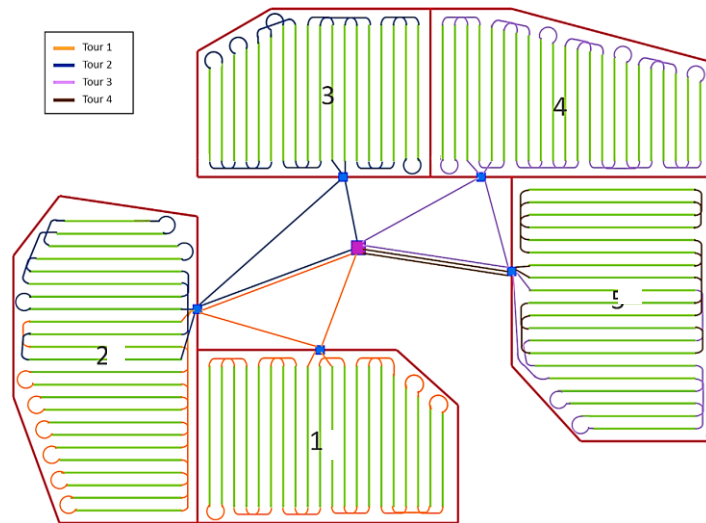


Рисунок 2.9 Представление оптимизированных маршрутов на приусадебных участках, а также туда и обратно на парк [131].

Все упомянутые выше алгоритмы и методы направлены на минимизацию простоев (сокращение расстояния и времени), что повышает эксплуатационные характеристики техники и снижает расход топлива. Они также отвечают агрономическим, полевым и экологическим требованиям. Некоторые типичные преимущества автоматизации обсуждаются в следующих разделах.

Точность может быть достигнута за счет минимизации ошибок между маршрутами, проложенными МТА. Пространственные записи маршрутов МТА могут быть оценены на предмет точности [139], чтобы сохранить параллельные маршруты на заданном расстоянии друг от друга. Степень отсутствия (оставление незасеянного пространства) или повторения (частичное или полное перекрытие маршрутов) определяет эксплуатационную точность [82].

Как указано выше, существуют различные методы и углы определения точности при проведении полевых работ с использованием МТА. Некоторые из них могут касаться точности заделки семян в нужное положение и поддержания равномерности распределения. Для оценки точности выполнения операции могут быть использованы различные методы. Для оценки точности можно рассчитать равномерность распределения семян и количество незасеянных участков. Реальные маршруты могут быть записаны с помощью интеллектуальных устройств или встроенной системы

записи маршрутов для этих целей. Другой метод заключается в том, что можно делать пространственные записи с помощью камер высокого разрешения и обрабатывать изображения для определения точности маршрута и равномерности распределения семян. Изображения могут быть обработаны для анализа этих показателей оценки.

Для получения изображения, показанного на рис. 2.8, использовался беспилотный летательный аппарат DJI Inspire 1 RAW UAV [47], квадрокоптер профессионального класса, предназначенный для аэрофотосъемки и видеосъемочного видео. Этот беспилотник обладает расширенными возможностями, включая съемку видео в формате 4K, передачу видеосигнала высокой четкости на расстояние до 5 километров [130] и оснащен высококачественной RGB-камерой, способной делать четкие 16-мегапиксельные снимки. Трехосный стабилизированный карданный подвес дрона обеспечивает стабильную съемку, а убирающееся шасси обеспечивает беспрепятственный панорамный обзор на 360 градусов во время полета. Функция калибровки камеры в приложении DJI Go используется для обеспечения точной калибровки перед началом работы. Беспилотный летательный аппарат был запущен на высоте 7 метров, что позволило получить вертикальное изображение с пространственным разрешением около 0,6 мм [83]. Эти функции обеспечивали получение точных и высококачественных изображений, что делало беспилотник подходящим для таких применений, как картография, сельское хозяйство и научные исследования.

Для обеспечения равномерности распределения семян изображения могут быть разделены на определенные квадратные сетки, а коэффициент вариации может быть определен для количественной оценки равномерности распределения (рис. 2.8). Процесс включает разбиение изображения поля на однородные подобласти для анализа покрытия растениями. Индекс растительности ($Exg = 2 \times G - R - B$) и алгоритм определения порогового значения (алгоритм Otsu [99]) используются для идентификации пикселей растений в каждой подобласти. Значения трехцветных

компонентов (красного, зеленого и синего) в цветных изображениях RGB (24 бита) представлены соответственно в виде R, G и B. Затем рассчитывается процентное содержание растений в пикселях на каждой площади. В тех случаях, когда посадка осуществляется по структурированной схеме, например, при посеве в ряд, перед определением промежутков выполняется определение рядов. При более разбросанных методах посева недостающие участки могут быть обнаружены непосредственно без идентификации рядов. В зависимости от схемы посева применяются различные аналитические подходы для обеспечения точной оценки состояния растений.

Алгоритм определения порога — это метод, используемый при обработке изображений для выделения объектов, представляющих интерес (например, растений), из фона на основе значений интенсивности пикселей. Он преобразует изображение в оттенках серого в двоичное изображение (черно-белое), что упрощает анализ таких характеристик, как покрытие растениями.

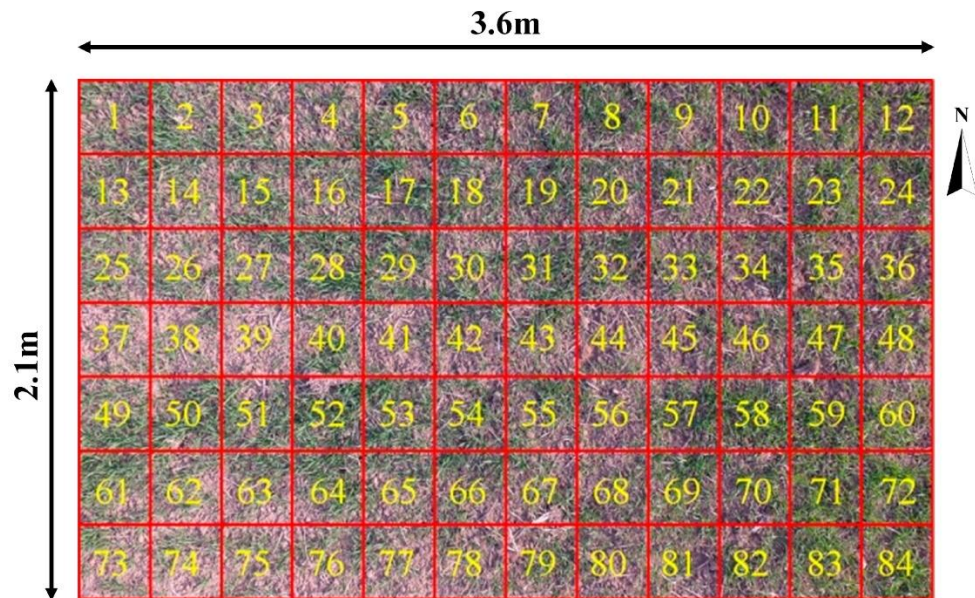


Рисунок 2.10 Схематический набросок подбласти на изображении (30 см × 30 см).

Метод коэффициента вариации (CV) может быть использован для определения показателя однородности путем деления стандартного отклонения (δ_x) на среднее

значение ($\bar{x}$). Более низкий коэффициент вариации указывает на более высокую однородность распределения (D_U). Учитывая x , i и n как охват каждого субрегиона, порядковый номер каждого субрегиона и общее количество каждого субрегиона соответственно, коэффициент вариации может быть рассчитан следующим образом:

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.31)$$

$$D_U = \frac{1}{CV} = \frac{\bar{x}}{\delta_x} \quad (2.32)$$

Процесс определения местоположения ряда без всходов на полях пшеницы, засеянных сеялками, включает анализ данных изображений для выявления областей, где отсутствуют всходы, или междурядий с более высокой заселенностью. Сначала изображение поля сканируется с использованием небольшого окна (3×3 пикселя, приблизительно 2×2 см) или меньше, и данные о покрытии рассады в пределах каждого окна извлекаются с использованием метода определения порога, такого как алгоритм Otsu. Затем эта информация используется для построения трехмерного представления поля, где координаты x и y соответствуют пикселям исходного изображения, а ось z представляет значения покрытия, причем более высокие значения указывают на наличие всходов. На этом 3D-изображении ряды пшеницы выглядят как возвышенности (холмы), в то время как промежутки, где отсутствуют всходы, выглядят как впадины или обрывы. На рисунке 2.9 (А) представлено исходное изображение следа сеялки, высевающей пшеницу, и (Б) трехмерная схема покрытия (адаптированная по [83]).

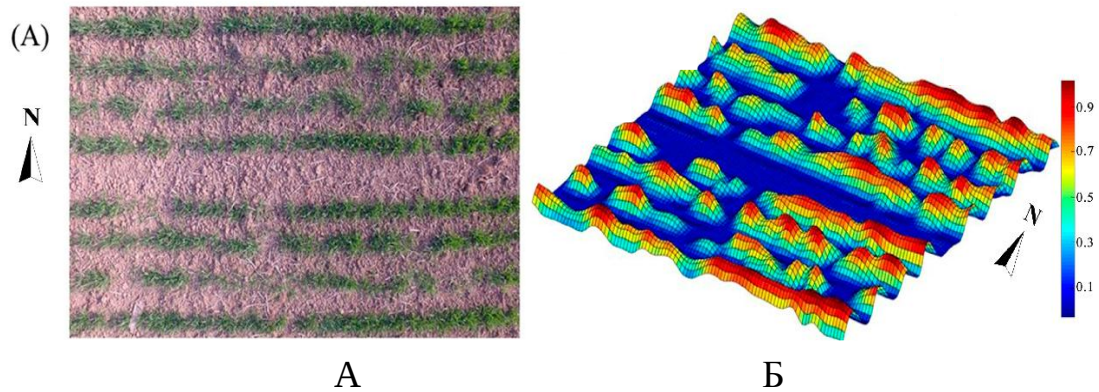


Рисунок 2.11 (А) Исходное изображение всходов пшеницы; и (Б) трехмерная схема размещения

Центральные линии рядов пшеницы определяются с помощью математических функций для отображения их точного положения. Затем анализируется изменение покрытия вдоль каждого ряда, и области, где покрытие остается стабильно низким или нулевым, идентифицируются как области с отсутствующими всходами. Общая длина этих отсутствующих участков для рассады затем рассчитывается путем суммирования непрерывных зон нулевого покрытия вдоль рядов. Результаты могут быть визуализированы в формате 3D, уравнения, которые используются для их описания, представлены в виде:

$$Y_j = \sum_{i=0}^m (x_i, y_j), (j = 1, 2, 3, \dots k) \quad (2.33)$$

Y_j представляет собой общее значение охвата проростков пшеницы в столбце j ; (x_i, y_j) относится к охвату в пикселе (i, j) , где x_i изменяется от 0 до m (высота изображения); и k представляет общее количество столбцов на изображении. По сути, на этом этапе значения в пикселях суммируются вдоль вертикальной оси для оценки плотности рассады вдоль рядов [83].

$$Rg = Y_j \text{ где } (Y_{j-1} < Y_j) \cap (Y_{j+1} < Y_j) \quad (2.34)$$

R_g находит осевые линии гребней (центры рядов пшеницы), определяя пики в

общих значениях покрытия Y_j . Условие $Y_{j-1} < Y_j$ и $Y_{j+1} < Y_j$ означает, что Y_j является локальным максимумом, что означает, что он представляет собой ряд пшеницы; Rg (ridge) присваивается позициям, где Y_j больше, чем оба соседних значения Y_{j-1} и Y_{j+1} , что указывает на пик; Этот метод определяет количество пшеницы ряды на изображении, что позволяет провести дальнейший анализ отсутствующих саженцев путем проверки областей "обрывов" (снижения охвата рассады) [83]. Этот метод может быть использован для определения расстояния между последовательными проходами, чтобы оценить, соблюдает ли машина рекомендуемый интервал между проходами, чтобы сохранить одинаковое расстояние между рядами.

Шаги алгоритма Otsu

1. Преобразуйте изображение в оттенки серого – если входное изображение цветное (RGB), оно сначала преобразуется в изображение в оттенках серого.

2. Вычислите гистограмму – изображение в оттенках серого анализируется для вычисления распределения интенсивности в пикселях, известного как гистограмма. Эта гистограмма представляет частоту каждого уровня интенсивности (0-255 для 8-битного изображения), которая имеет решающее значение для определения оптимального порога.

3. Вычислите разницу между классами для каждого порогового значения – Алгоритм перебирает все возможные пороговые значения в диапазоне от 0 до 255. Для каждого порогового значения t пиксели делятся на два класса: фоновые (пиксели с интенсивностью, меньшей или равной t) и переднего плана (пиксели с интенсивностью, большей t). Вычисляются средняя интенсивность и вероятность для каждого класса, что позволяет оценить, насколько хорошо пороговое значение разделяет две области.

4. Найдите оптимальное пороговое значение – Оптимальное пороговое значение выбирается путем максимального изменения различий между классами, гарантируя, что области переднего плана и фона будут максимально различимы.

5. Примените пороговое значение для сегментации изображения – Наконец, к изображению будет применено определенное пороговое значение. Пиксели с интенсивностью ниже порогового значения становятся черными (0, фон), а пиксели с интенсивностью выше порогового значения - белыми (255, передний план). В результате получается бинарное изображение, на котором интересующие объекты (например, проростки пшеницы) четко отделены от фона [99].

Еще одним важным методом анализа и оценки является использование интеллектуальных приборов для отслеживания маршрутов перемещения МТА по полю и оценки расстояния между проходами. Если расстояние между двумя маршрутами превышает рекомендуемое, то между проходами остается незасеянная область, а если оно меньше рекомендуемого, то имеет место перекрытие участков рабочих проходов. Оба они снижают точность МТА и приводят к потере ресурсов. Типичное полное покрытие сельскохозяйственного поля дорожками на границе участка (желтая) и в поле (зеленая) можно увидеть на рисунке 2.13.



Рисунок 2.12 Полное покрытие сельскохозяйственного поля контрольными дорожками на границе участка (желтый) и в поле (зеленый)

В настоящее время прецизионные технологии позволяют регулировать норму высева семян в зависимости от полевых условий. Посев с переменной нормой высева — это технология точного земледелия, которая регулирует нормы высева в зависимости от изменчивости свойств почвы, рельефа местности,

метеорологических условий и других факторов. Этот метод, также известный как посев в зависимости от конкретного участка, оптимизирует норму и глубину заделки семян в зависимости от плодородия почвы на поле и потенциальной урожайности. Посев с переменной нормой расхода может повысить урожайность сельскохозяйственных культур за счет сокращения расхода семян и улучшения использования ресурсов, таких как питательные вещества почвы и вода. Это позволяет фермерам лучше управлять рисками и инвестировать в области с более высокой отдачей [114, 94,61, 134].

Для реализации технологии с переменной нормой высева требуется создать карту предписаний (Карта предписаний — это электронный файл данных, содержащий конкретную информацию о нормах внесения удобрений в каждую зону поля), на которой указаны зоны высева и назначены конкретные нормы внесения (рис. 2.13). Методы посева с переменной нормой обычно основаны на картах, с использованием предварительно собранных данных для моделирования, или на датчиках, с использованием данных в реальном времени и передовых алгоритмов.

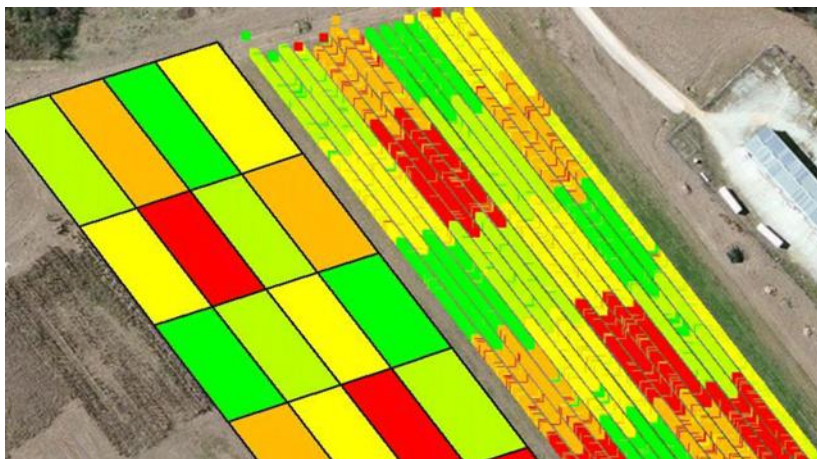


Рисунок 2.13 Параллельное сравнение (слева) рецептурной карты и (справа) фактической карты на момент установки

Последние инновации в области высева с переменной нормой расхода позволяют производить многослойный посев, при котором различные сорта растений высеваются одновременно на одном и том же поле. Сеялки с регулируемой нормой высева можно переоборудовать в сеялки с регулируемой нормой высева (рис. 2.14),

регулируя скорость привода дозатора семян, часто используя предписанные схемы для соответствия норм высева полевым условиям, таким как тип почвы и зоны орошения [10, 61, 94, 114, 134].

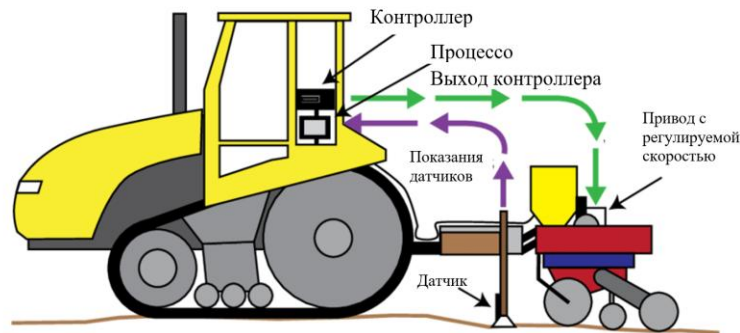


Рисунок 2.14 Датчик “на ходу” (текстура, электропроводность или органическое вещество почвы) измеряет характеристики почвы перед посадкой и корректирует норму высева [114].

Посев с переменной нормой высева, также известный как посев с привязкой к конкретному участку, является методом точного земледелия, который оптимизирует нормы высева в зависимости от изменчивости условий на поле. Процесс начинается со сбора данных о свойствах почвы, уровнях влажности и урожайности за прошлые периоды с использованием дистанционного зондирования и отбора проб почвы. Эти данные анализируются для создания подробных карт полей с выделением различных зон на основе таких факторов, как структура почвы и органическое вещество. Затем разрабатываются предписанные карты, содержащие конкретные рекомендации по посеву. Высевающее оборудование, оснащенное электронными системами дозирования, регулирует норму высева в режиме реального времени на основе этих карт, в то время как датчики постоянно отслеживают условия, позволяя на ходу вносить коррективы для оптимального внесения семян.

2.5. Теоретический анализ производительности МТА в зависимости от конфигурации поля

Рабочая скорость МТА является ключевым компонентом в полевых работах, особенно для высевающих аппаратов, поскольку она определяет, как количественные,

так и качественные результаты. Исследования качества посева, связанные с высокими скоростями, указывают на эксплуатационные ограничения, связанные с чрезмерным боковым выбросом почвы, уменьшением засыпки борозды и взаимодействием между соседними бороздами [124]. Равномерное расположение растений достигается за счет последовательного трехмерного размещения семян, что требует тщательного выбора скорости движения [25, 32, 73, 80].

Варьирование глубины посева подвергает семена воздействию переменной влажности и температуры, что в значительной степени определяет, прорастут ли они или, погибнут в почве, что, в свою очередь, влияет на популяцию растений. Эксплуатационные скорости, превышающие оптимальные пределы, как правило, помещают семена на небольшую глубину или даже оставляют их незакрытыми почвой [38]. Диапазоны эксплуатационных скоростей характерны для конкретных типов посевных машин и зависят от уровня используемой техники. В разных источниках говорится о минимальных, идеальных и максимальных значениях, которые составляют 6,5, 8 и 11 км/ч соответственно [60,71]. Также сообщается, что пневматическая сеялка, работающая на скорости 10-12 км/ч, обеспечивает лучшую равномерность распределения семян [124], хотя на эти параметры влияют физический пахотный слой почвы и текстура поверхности почвы.

На текстуру поверхности почвы в результате обработки может влиять широкий спектр факторов, таких как содержание влаги, каменистость пахотного слоя и текстура почвы. На сильно пересеченных полях сеялки должны работать медленнее, иначе механические колебания могут быть достаточно высокими, чтобы вызвать вертикальные колебания [30, 39, 136] при укладке семян и повлиять на их всхожесть [78]. Кроме того, механическая вибрация приводит к разборке компонентов сеялки и увеличивает риск мелких и/или крупных повреждений; также известно, что операторы подвергаются значительному риску заболеваний опорно-двигательного аппарата, в основном из-за вибраций, передающихся от всего тела и рук [34]. Результаты

исследований показали, что форма и размер полей, препятствия или контурное земледелие обычно требуют повышенных сложностей с маневрированием при выполнении различных полевых операций [4]. Под формой в данном исследовании понимается конфигурация границ участка, включая длину и кривизну периметра, наличие препятствий, затрудняющих передвижение сельскохозяйственной техники, компактность, выпуклость границ и прямоугольность. Размер, с другой стороны, указывает на длину прогона и площадь участка, которые обычно снижают эффективность, влияя на скорость работы и продуктивные временные перемещения.

В контексте данного исследования участок представляет собой двумерную однородную область, которая может содержать искусственные и естественные препятствия, такие как целые объекты, скопления камней и электрические столбы в качестве подмножеств. В этой исследовании были определены показатели для 23 участков, и в качестве применимых рассматривались следующие индексы: средняя длина участка, выпуклость (I_{con}), отношение периметра к площади (P/A), индекс компактности (I_{com}), индекс площади периметра (I_{sp}) и прямоугольность (I_r) [45, 60, 97].

Ниже приведены краткие описания этих индексов: Участки называются участками неправильной формы или сложными границами, когда границы, используемые для расчета периметра, сильно нарушены.

$$I_{con} = \frac{A}{A_{coh}} \quad (2.35)$$

$$P - A_{ratio} = \frac{P}{A} \quad (2.36)$$

Компактность определяет, насколько многоугольник круглый, и задается уравнением (2.37), а индекс квадратного периметра представляет собой соотношение между квадратным корнем из площади и периметром рассматриваемого

многоугольника (уравнение (2.38))

$$I_{com} = 4\pi \frac{A}{P^2} \quad (2.37)$$

$$I_{sp} = \frac{4\sqrt{A}}{P} \quad (2.38)$$

Прямоугольные поля предпочтительнее в сельском хозяйстве, поскольку с ними удобно работать, поскольку валки могут быть уложены прямо или параллельно, если не предъявляются особые требования. Считается, что площадь минимального ограничивающего прямоугольника (A_{mbr}) (Рисунок 3.3) определяет индекс прямоугольности, уравнение(3.29).

$$I_r = \frac{A}{A_{mbr}} \quad (2.39)$$

Неровность поверхности почвы, обусловленная такими факторами, как текстура почвы, размер заполнителя и каменистость, играет решающую роль в работе сеялки, влияя на такие элементы, как боковая и вертикальная заделка семян, скорость и качество работы, тяговое усилие сеялки, устойчивость и маневренность сеялки, а также эффективность использования времени. Понимание связи между участки микрорельефа и производительностью сельскохозяйственной техники необходимо для оптимизации сельскохозяйственных операций, повышения производительности, сокращения полевых эксплуатационных испытаний и принятия решений по выбору типа и частоты операций для конкретных полей или участков.

Наиболее распространенным методом определения индекса микрорельефа поверхности почвы является метод стандартного отклонения высот, который включает в себя определение стандартного отклонения высот (σ_e) [63] по поверхности участков. Более высокое значение σ_e означает значительную изменчивость высоты поверхности почвы и ее сложность.

$$\sigma_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{ref})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

где: Z_i - высота над средним уровнем моря (м), отсчитываемая над средним уровнем моря в точке i ; Z_{ref} - опорная высота; и n - количество отсчетов высоты.

Индекс способности процесса: Тест способности процесса используется для количественной оценки способности производственного процесса соответствовать спецификациям (стандартным или определенным пользователем); другими словами, он измеряет способность процесса работать в заданных пределах и с заданной точностью, подтверждая способность удовлетворять требованиям. Индекс способности процесса часто используются в области статистического контроля качества и управления процессами для оценки эффективности производственного процесса. Этот подход может быть использован для проверки способности МТА работать в допустимых оптимальных пределах, поддерживать требуемое качество работы при достижении запланированной оптимальной производительности. Этот метод позволяет оценить способность процесса (например, процесса высева семян с помощью сеялок) соблюдать нижний и верхний пределы спецификаций.

Следующие четыре категории широко признаны в качестве основных показателей способности процесса [88, 93, 137].

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}, \quad (2.41)$$

$$C_{pL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}, \quad (2.42)$$

$$C_{pU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}, \quad (2.43)$$

$$C_{pk} = \min \{C_{pU}; C_{pL}\}, \quad (2.44)$$

где: C_p - индекс способности процесса; C_{pL} и C_{pU} - нижний и верхний индексы способности процесса, соответственно; μ - среднее значение процесса; σ - стандартное отклонение процесса; LSL - нижний предел спецификации; USL - верхний предел спецификации. $C_p = 1$ означает, что изменчивость скорости работы соответствует спецификации, а $C_p > 1$ обеспечивает лучшую производительность; указывает на то,

что скорость работы не превышает USL, при этом более высокое значение свидетельствует о более высоких возможностях; и указывает на то, что скорость работы не превышает LSL.



Рисунок 2.15 Схематическое представление предельных способности процесса

Уравнение 2.41 показывает, насколько хорошо вариация процесса вписывается в пределы спецификации, при этом более высокое значение указывает на то, что разброс процесса меньше относительно пределов, что означает лучшие возможности. Уравнения 2.42 и 2.43 оценивают возможности процесса относительно LSL и USL, измеряя, насколько хорошо среднее значение скорости соответствует LSL и USL, учитывая вариабельность процесса. В уравнении 2.44. C_{pk} сравнивается с LSL и USL для определения общей способности, а значения больше 1 указывают на способность процесса удовлетворять требованиям спецификации.

2.6. Анализ методов качественных измерений полевых операций

Качественный анализ полевых операций МТА - один из важнейших методов, который помогает поддерживать производство и производительность как техники, так и обрабатываемой земли.

Основная обработка почвы: Глубина основной обработки почвы является важнейшим фактором при оценке качества обработки, поскольку она напрямую влияет на структуру почвы, рост культур и эффективность использования ресурсов.

Исследования показывают, что для получения максимальной урожайности и поддержания здоровья почвы часто рекомендуется глубина от 30 до 40 см [17, 29, 69, 70, 80, 116]. Допустимое отклонение глубины обработки почвы не должно превышать 10 % при отсутствии приспособлений для обработки почвы с переменной глубиной [106]. Агротехнические требования к основной обработке почвы приведены в таблице 2.3. Глубина вспашки должна отклоняться от заданной на $\leq 10\%$ (например, 22,5-27,5 см при глубине 25 см), за исключением первых двух проходов в свайных загонах. На ровных полях отклонения не должны превышать 15 %, а на неровных участках (микрорельеф > 15 см) допускается ≤ 10 %. Глубина измеряется по 25 показаниям по диагоналям поля с помощью бороздомера или линейки.

Таблица 2.3. Агротехнические требования к основной обработке почвы [106]

Оцененный показатель	Параметры допустимых отклонений
Диапазон глубин, см [17, 29, 68, 69, 70, 115]	30 – 40
Отклонение средней глубины вспашки от заданной, %	± 10
Равномерность глубины вспашки, %	Не менее 90
Крупнокомковатость почвы (комки > 5 см), %	10–15
Высота насыпи, см	5–7
Глубина вспашки под насыпью	Не менее половины заданной глубины
Заделывание растительных остатков, сорняков, удобрений	Полное
Прямолинейность вспашки (отклонение на 100 м, см)	± 10
Наличие непахотных полос, клиньев и других ошибок	Не допускается

Осыпаемость почвы требует $\geq 75\%$, комков ≤ 5 см ($\leq 25\% > 5$ см) и $\leq 15\% > 10$ см, оценивается с помощью сетки площадью 1 м² с 8-10 диагональными полевыми образцами. Параметры гряд включают ограничения по высоте: ≤ 5 см для цилиндрических плугов, прямолинейность допускает отклонение ≤ 10 см на 100 м, а глубина вспашки под грядами составляет $\geq 50\%$ от целевой. Захоронение органического вещества требует полного заделывания остатков, сорняков и удобрений на 10-15 см традиционными плугами. Ровность поверхности оценивается коэффициентом гребнистости - отношением длины шнура к его проекции на ровную

поверхность [106].

Предпосевная обработка почвы: Подготовленная к посеву (посадке) почва должна отвечать следующим требованиям: быть мелкокомковатой, хорошо разрыхленной на глубину посева семян, иметь уплотненное семенное ложе, полностью отсутствовать сорная растительность. Мелкокомковатость, т.е. доля комков диаметром 3 см и более, должна составлять не более 15-20% во влажных районах и 10% в засушливых. Не допускается наличие комков площадью более 10 см² в посевном слое. Гротехнические требования к предпосевной обработке почвы приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Агротехнические требования к предпосевной обработке почвы

Индикатор качества	Отклонение средней глубины обработки от заданной, %	Равномерность глубины обработки почвы, %	Глыбистость (доля комков >3 см), %		Высота гребня, см	Поверхность почвы	Подрезание сорняков	Наличие необработанных полос, клиньев или других ошибок
Параметры допустимых отклонений	±1	≥ 90	Озимые культуры: 15–20	Яровые культуры: 5–10	< 4	Выровненная, мелкобугристая	Полный	Не допускается

Тщательное рыхление почвы на глубину посева и выравнивание поверхности имеют решающее значение. Поперечная обработка (перпендикулярно вспашке) обеспечивает крошение и выравнивание, а повторные проходы улучшают равномерность. На склонах обработка почвы производится в соответствии с направлением склона или горизонтальным рельефом. Глубина измеряется с помощью 25-30 измерений линейкой/штангой по диагоналям поля, усредняя значения для оценки равномерности. Глыбистость и гребни оцениваются так же, как при вспашке. Подрезание сорняков проверяется с помощью рамки площадью 1 м² (10-15 диагональных образцов), при этом не допускается наличие невырезанных сорняков. После обработки почвы края и поворотные полосы должны быть обработаны,

исключая участки с бугорками, гребни и впадины. Агротехнические требования к посеву приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Агротехнические требования к посеву

Оцениваемые показатели	Параметры допустимых отклонений
Отклонение средней глубины посева от заданной, %	Злаки: ± 15 Мелкосеменные культуры/травы: ± 5
Равномерность заделки семян по глубине, %	≥ 90
Отклонение нормы высева от заданной, %	± 4
Отклонение ширины междурядий, см	Смежные сеялки: ± 2 Смежные агрегаты: ± 4

При посеве следует соблюдать норму высева, отклоняющуюся на 4% от указанной нормы, с равномерным распределением семян на высевающую единицу. Семена должны быть равномерно распределены на глубину ± 1 см для зерновых культур и $\pm 0,05$ см для мелких семян, заделаны в уплотненные грядки с рыхлой почвой (без поверхностных семян). Глубину высева измеряют, разрыхляя сошниками 2-3 ряда, выравнивая поверхность и проводя не менее 20 измерений по диагонали. Для обеспечения точности срезания слоев почвы, просеивания семян и подсчета по глубине используется цилиндр с насечкой диаметром 10 мм.

Статистический анализ, который может быть использован для анализа данных для анализа качества, представлен в следующих анализах.

Статистические тесты - важнейшие инструменты анализа данных, используемые для определения наличия существенных различий или взаимосвязей между наборами данных. В этом разделе будут описаны параметрические статистические тесты. Параметрические тесты предполагают, что данные соответствуют определенному распределению (обычно нормальному), и имеют определенные требования к типу данных и размеру выборки. Т-тест включает в себя

два типа тестов: одно- и двусторонний, в зависимости от того, проводится ли анализ для одного образца или для двух образцов.

T-тест: этот тест сравнивает средние значения двух наборов данных или среднее значение одного набора данных с заранее определенным значением.

Независимый T-тест: Независимый t-тест, также известный как двухвыборочный t-тест, независимый выборочный t-тест или t-тест студента, - это дифференциальный статистический тест, который определяет, существует ли статистически значимая разница между средними показателями двух несвязанных групп.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} ; \quad (2.45)$$

где $\bar{x}_1$ and $\bar{x}_2$ средние значения для каждой из выборок, s_1 и s_2 - стандартные отклонения каждой из выборок, n_1 и n_2 - объем выборки

Одновыборочный t-тест: Одновыборочный t-тест - это статистический метод, используемый для определения того, значительно ли отличается среднее значение одной выборки от известного или предполагаемого среднего значения популяции. Этот тест особенно полезен в тех случаях, когда исследователи хотят сравнить свои выборочные данные с определенным эталоном или теоретическим значением.

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} ; \quad (2.46)$$

Где $\bar{x}$ - выборочное среднее значение; μ - гипотетическое значение; s - стандартное отклонение выборки

Парный T-тест: Парный t-тест, также известный как зависимый t-тест или парный выборочный t-тест, - это статистический метод, используемый для сравнения средних значений двух связанных групп. Этот тест особенно полезен в ситуациях, когда измерения проводятся у одних и тех же испытуемых в разных условиях или в разное время.

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}}; \quad (2.47)$$

где $\bar{d}$ – среднее значение разностей между парными наблюдениями, S_d – стандартное отклонение разностей

2.7. Анализ теоретического метода оптимального использования техники по критерию минимальной продолжительности производственных процессов

За период D дней необходимо выполнить m производственных процессов с n видами агрегатов. Очередность их выполнения в установленный срок не имеет значения. Количество агрегатов вида j равно R_j ($j = 1, n$), а суточная производительность агрегата вида j при выполнении i -го производственного процесса равна W_{ij} . Продолжительность смены в плановом периоде составляет T часов, а коэффициент погоды η_p .

Необходимо разработать план организации работ, обеспечивающий выполнение этих процессов в полном объеме в кратчайшие сроки. Для представления процесса в виде математической модели обозначим через X_{ij} объем работ, выполняемых всеми агрегатами типа j на i -м производственном процессе, а через T_j — общую продолжительность использования агрегатов этого типа. Значение T_j равно

$$T_j = \sum_{i=1}^m \frac{X_{ij}}{W_{ij}R_j}, j = 1, \bar{n} \quad (2.48)$$

Цель задачи — найти $T = \max \{T_j\} = \min$. (Требуется найти минимальное из максимальных показателей функции). Сначала из всех измерений T_j является максимальным. Тогда цели функции будут выражаться так:

$$T = T_r = \sum_{i=1}^m \frac{X_{ir}}{W_{ir}R_r}, = \min. \quad (2.49)$$

Очень значимо время, в течение которого агрегаты j -го типа не использовались.

выполнение заданных работ, через Z_j , которое равно

$$Z_j = T_r - T_j = \sum_{i=1}^m \frac{X_{ir}}{W_{ir}R_r} - \sum_{i=1}^m \frac{X_{ij}}{W_{ij}R_j} \quad (2.50)$$

Максимальная продолжительность выполнения указанного набора задач будет достигнута при полном исчерпании возможностей используемых агрегатов, т.е. $Z_j = 0$. Обязательным условием при решении этих задач является не-отрицательность переменных и выполнение всех работ в полном объеме. Таким образом, математическая модель задачи будет выглядеть следующим образом: найти минимум функции.

$$T = \sum_{i=1}^m \frac{X_{ir}}{W_{ir}R_r}, = \min. \quad (2.51)$$

Ограничения:

1. Ограничения неотрицательности:

$$X_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \bar{m}; j = 1, \bar{n};$$

2. Ограничения по завершению работ:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = W_i, i = 1, \bar{m}$$

3. Ограничения совокупного использования:

$$4. Z_j = \sum_{i=1}^m \frac{X_{ir}}{W_{ir}R_r} - \sum_{i=1}^m \frac{X_{ij}}{W_{ij}R_j} = 0, j = 1, \bar{n}; \quad (2.52)$$

Это ограничение указывает на то, что общее использование агрегатов типа j должно равняться их доступному количеству R_j .

Влияние возможных простоев оборудования из-за погодных условий, технических неисправностей, болезни операторов и т.п. на определение минимальной продолжительности выполнения работ учитывается по формуле:

$$T'_{min} = \frac{T_{min}}{\eta_n}, \quad (2.53)$$

где: T'_{min} (или T_{min} без учета простоев) – минимальная продолжительность

выполнения работы, а η – коэффициент, учитывающий простои.

В случаях, когда агрегаты первого типа вводятся в эксплуатацию на D_1 (дней, смен) позже агрегатов других типов, изменяется только последнее ограничение в математической модели задачи. В этом случае все Z_j , кроме Z_1 , имеют нулевые значения, а величина $Z_1 = D_1$. Если в производственной ситуации часть R_j агрегатов типа j вводится в эксплуатацию на D дней позже начала работы остальных агрегатов, то необходимо разделить все агрегаты типа j на две группы и каждую группу рассматривать как отдельный тип агрегата.

2.8. Оптимизация маршрута движения сельскохозяйственной техники

В современном сельском хозяйстве оптимизация эффективности работы техники имеет решающее значение для повышения производительности и снижения эксплуатационных расходов. Одной из важных проблем, с которой сталкиваются фермеры, является сокращение времени простоя между участками и парками, что может привести к потере ресурсов и снижению общей эффективности. Холостой ход относится к непроизводительному перемещению техники, будь то перемещение между различными полями или возвращение на парки хранения и технического обслуживания.

Внедряя эффективные стратегии оптимизации маршрутов, фермеры могут оптимизировать работу своей техники, снижая расход топлива, затраты на рабочую силу и износ оборудования.

В этом исследовании будут рассмотрены различные методы оптимизации маршрутов движения сельскохозяйственной техники, основное внимание будет уделено стратегиям минимизации простоев при сохранении производительности на различных полевых работах. Это исследование, посвященное изучению влияния оптимизированной маршрутизации на общую эффективность фермерских хозяйств, призвано дать практическую информацию фермерам, стремящимся повысить эффективность своей деятельности в условиях растущей конкуренции в сельском

хозяйстве. Анализ литературы приведен в разделе 2.5. Однако основной алгоритм, который в большинстве случаев подходит для работы с сельскохозяйственной техникой, рассмотрен ниже.

Задача коммивояжёра с ограниченной вместимостью — это разновидность задачи коммивояжера, в которой продавец (или машина) имеет ограниченную пропускную способность или эксплуатационные ограничения. При работе с сельскохозяйственной техникой эта модель оптимизации очень полезна для повышения эффективности выездов на поля, минимизации расстояния в пути, оптимизации заправок и остановок для пополнения запасов, планирования многодневного сева и уборки урожая, а также сокращения времени простоя машины [133, 132]. Сельскохозяйственная техника, такая как сеялки, опрыскиватели или комбайны, должна за один рабочий день посетить несколько полей, и определение наиболее эффективного маршрута помогает сократить расход топлива, износ оборудования и непроизводительное время в пути [72, 101]. Кроме того, такие машины, как разбрасыватели удобрений и опрыскиватели, требуют периодического пополнения запасов, а проблема с вместимостью коммивояжера помогает оптимизировать маршруты и свести к минимуму время простоя на заправочных станциях. В тех случаях, когда техника не может обработать все поля за один день из-за ограничений по площади гектара, решение задачи коммивояжера помогает определить, какие поля следует обработать в первую очередь, обеспечивая эффективное распределение рабочей нагрузки на несколько дней. Оптимизируя последовательность движения машины в рамках этих ограничений, задача коммивояжера с большими возможностями повышает эффективность работы в полевых условиях и сокращает задержки в работе, что в конечном итоге приводит к экономии средств и повышению производительности на фермах.

Алгоритм решения задачи коммивояжера с емкостями при эксплуатации сельскохозяйственной техники [86]: для решения задачи коммивояжера с емкостями

при эксплуатации сельскохозяйственной техники может быть использован алгоритм целочисленного линейного программирования. Ниже приведен пошаговый алгоритм, использующий жадный подход:

Шаг 1. Определите проблему: пусть PP_0 - начальный парк (станция сельскохозяйственной техники), а $PP_1, PP_2, \dots, PP_n$ - поля, которые необходимо обработать. Каждое поле имеет ограничение по площади, которое влияет на суточный лимит производительности машины. Определите матрицу затрат на поездку (например, расстояние, стоимость топлива).

Шаг 2: Создайте начальный маршрут (эвристика ближайшего соседа)

1. Начните со парка (PP_0).
2. Выберите ближайшее не посещенное или частично заполненное поле с доступной производительностью машины.
3. Если оставшаяся площадь выбранного поля меньше доступной производительности, заполните поле и отметьте его как заполненное.
4. Если оставшаяся площадь выбранного поля превышает доступную пропускную способность, работайте только до дневного лимита и вернитесь к PP_0 . Отметьте поле как частично заполненное.
5. Продолжайте процесс, пока все поля не будут полностью заполнены.

Шаг 3: Оптимизируйте маршрут, используя эвристику 2-й оптимизации

1. Начните с начального маршрута (например, маршрута, сгенерированного эвристикой ближайшего соседа).
2. Выберите два ребра (соединения между полями) в маршруте.
3. Поменяйте местами (переверните) участок между этими двумя ребрами. Это создаст новый вариант маршрута.
4. Проверьте, не короче ли общая дистанция на новом маршруте, чем на предыдущем.
 - Если да, → Примите изменения и обновите маршрут.

- Если нет, $\rightarrow$ Сохраните исходный маршрут и попробуйте изменить его местами.

5. Повторяйте процедуру до тех пор, пока не будет найдено никаких улучшений.

Пример иллюстрации:

Перед оптимизацией: Маршрут: $PP_0 \rightarrow PP_1 \rightarrow PP_2 \rightarrow PP_3 \rightarrow PP_4 \rightarrow PP_5 \rightarrow PP_0$

Ребра: (PP_0-PP_1) , (PP_1-PP_2) , (PP_2-PP_3) , (PP_3-PP_4) , (PP_4-PP_5) , (PP_5-PP_0)

Применяя 2-Opt: предположим, что замена (PP_2-PP_3) и (PP_4-PP_5) местами создает более короткий маршрут.

Переверните сегмент между PP_2 и $PP_4 \rightarrow$ Новый маршрут: $PP_0 \rightarrow PP_1 \rightarrow PP_4 \rightarrow PP_3 \rightarrow PP_2 \rightarrow PP_5 \rightarrow PP_0$

Если новый маршрут короче, примите замену.

Шаг 4: Проверьте ограничения по пропускной способности

1. Следите за тем, чтобы суммарный размер полей на каждом маршруте не превышал суточного лимита машины.
2. Если он превышен, разделите его на несколько смен.

Глава 3: Методологические основы исследований

3.1. Метод определения подходящих сроков сева в эритрейских хозяйствах

Основная цель в этом разделе — определить даты начала и окончания посевной операции, поскольку это критически важно для нормального производственного процесса. Задержка с посевом может привести к полной или частичной потере урожая. Чтобы узнать обычные, традиционно принятые и подходящие сроки посева в разных регионах страны, были использованы экспертные онлайн-опрос с использованием анкеты Google Docs, прямая информация от министерства сельского хозяйства и исторические характеристики осадков. Для конкретных участков исследования использовался декада исторических осадков.

На основе опроса: был проведен опрос под названием «Планирование полевых работ в различных зонах Эритреи» с использованием Google Docs для определения оптимальных сроков основных сельскохозяйственных работ, включая время начала и окончания основной обработки почвы, предпосевной обработки почвы, посева и сбора урожая. Респондентами были ученые из Эритреи, проживающие за рубежом для обучения (аспиранты, аспиранты, магистры и студенты), большинство из которых родились в фермерских семьях с большим опытом ведения сельского хозяйства и являются выпускниками сельскохозяйственных колледжей. Эти респонденты предоставили свои ответы на основе своих фоновых знаний личного опыта и академической подготовки по общепринятой практике регионов или Регион в Эритрее. Количество участников составило 42 человека, и их распределение по регионам, с которыми респонденты наиболее знакомы, и максимальное количество операций по обработке почвы, необходимых для основной упомянутой культуры, указано в Рисунок 3-2, (А и В соответственно).

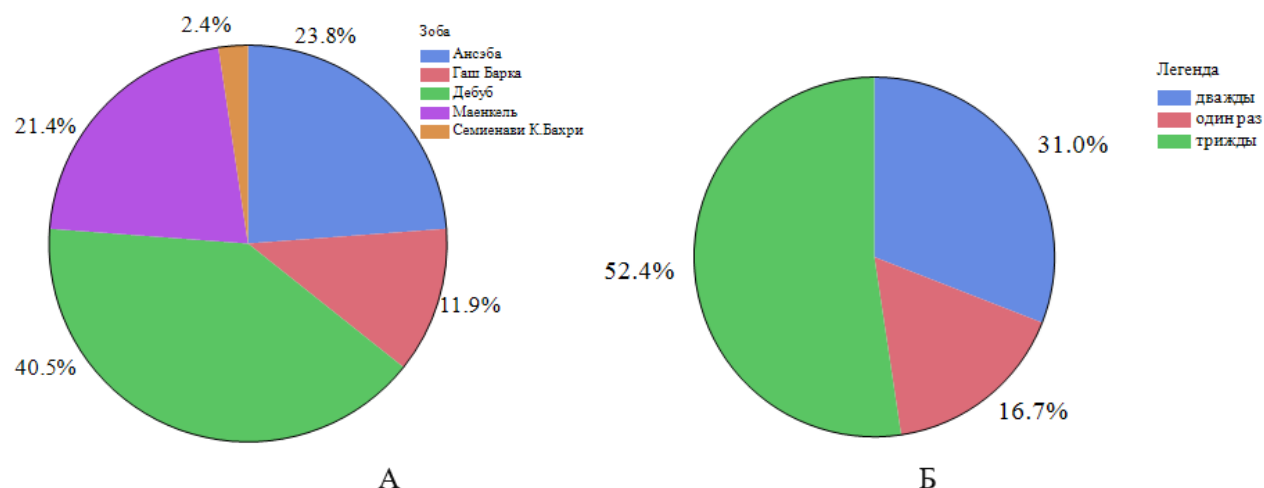


Рисунок 3.1 (А) Распределение регионов респондентов, наиболее знакомых с и (В) максимальное количество операций по обработке почвы, необходимых для основной упомянутой культуры

Респонденты опроса также прокомментировали сроки и методы сельскохозяйственной практики, и комментарии категоризованы в следующем резюме. Они были разделены на две более широкие категории – Региональные и сезонные (климатические) различия и Частота и методы обработки почвы.

Региональные и сезонные (климатические) различия: В целом респонденты подчеркивали различия в практике земледелия из-за местных практик и климатических условий разных Регион (даже внутри Регион), следовательно, различия в начале и конце практики земледелия. Они также упомянули разницу в практике возделывания между местными фермерами и государственными фермами. Респонденты также заявили, что основной движущей силой для проведения статистической обработки почвы и посевных работ является начало и регулярность выпадения осадков.

Частота и методы обработки почвы: Частота обработки почвы обычно зависит от таких факторов, как наличие сорняков, изменчивость количества осадков, тип почвы, местная практика циги земли (которая имеет пять периодов обработки: первая обработка в сентябре, вторая в ноябре, третья в январе, четвертая в мае и пятая в июле) и наличие источника энергии. На основе этих факторов обработка почвы выполняется от одного до пяти раз за один производственный сезон. Сбор урожая (состоящий из

скашивания урожая и обмолота в традиционном контексте) занимает до нескольких месяцев в зависимости от пригодности и наличия источника энергии.

Каждый из двенадцати месяцев был разделен на четыре недели, и респондентам задавался вопрос, в какую неделю месяца начинается операция. Однако для дат посева задавались вопросы о датах начала и окончания, поскольку обе даты имеют решающее значение для успешного сельскохозяйственного производства.

На основе информации, полученной от министерства сельского хозяйства Эритреи: Информация о начале и конце обычных сельскохозяйственных работ (называемых календарем посевов) для горных районов Эритреи (Центральный, Южный регионы и регионы Ансэба) для обычных культур (ячмень, пшеница, кукуруза, сорго, пальчатое просо, полевой горох, нут и тефф) была собрана в министерстве сельского хозяйства. Информация была представлена таким же образом, как были представлены данные опроса, каждый месяц был разделен на четыре недели, и был определен диапазон. Из этого была извлечена требуемая информация.:

На основе ежемесячного распределения осадков. Идеальный вегетационный период был определен на основе исторических данных об осадках после определения среднего количества осадков, необходимого для прорастания семян, и количества дней, необходимых между посевом и созреванием урожая, и сравнения его со средним ежемесячным количеством осадков исторических данных. В этом разделе исторические ежедневные осадки (1999–2022) ферм Целот-Адигуэдад и ежедневные осадки Хальхале за годы с 2010 по 2022 год были преобразованы в декады, агрегируя данные в 10-дневные периоды в течение месяца в виде:

Разделите каждый месяц на три декады[89]:

- Декада 1: дни с 1 по 10 месяц.
- Декада 2: 11-20 дни месяца.
- Декада 3: дни с 21-го по конец месяца (28, 29, 30 или 31 день)

3.2. Метод проведения и анализа хронометражных наблюдений МТА

В 2023 году на ферме Ади'Гуаедад, Эритрея, под контролем Эритрейской корпорации растениеводства и животноводства (ECLC) были проведены полевые эксперименты с различными сельскохозяйственными машинами. Эта ферма включает в себя территорию вокруг Ади'гуаедада, в том числе вокруг аэропорта, и территорию вокруг Целота, общей площадью 862,58 га, расположенных на площади более 1484 га. Исследование включало в себя два вида полевых работ: предпосевную обработку почвы и посев. Полевой наблюдательный эксперимент по предпосевной обработке почвы проводился в два разных сезона года. Первый однодневный эксперимент был проведен 3 июля 2023 года на ферме «Целот» (подферма фермы «Ади'Гуаедад») с использованием трех тракторов, оснащенных орудиями для предпосевной обработки почвы, специально предназначенными для посева пшеницы, а второй - 6-10 сентября 2023 года с использованием четырех МТА. Наблюдения за посевными работами проводились в течение восьми дней с 3 по 10 июля 2023 года включительно.

Для проведения предпосевных работ ECLC использовал дисковые бороны Gamatechnik maszyny rolnicze следующих характеристик: Тип: T430, количество борон: 24, ширина захвата: 3,0 м, потребляемая мощность: 150 л.с., и вес: 1700 кг. Полевой наблюдательный эксперимент проводился на трех тракторах, оснащенных одинаковым оборудованием (T430), при выполнении операций предпосевной обработки почвы. Для наблюдения за посевной операцией использовалась пневматическая навесная сеялка Nardi Dora Air Drill (DORA 600) шириной 6 м (40 рядов), приводимая в движение трактором. Данное исследование проводилось в Целоте, Асмара, Эритрея (широта 15°17'6.4«, долгота 38°56'59» и высота 2341 м над уровнем моря) на площади около 107 га, засеянной с помощью пневматической сеялки Nardi Dora Air Drill, навешенной на трактор. Эта машина предлагается в четырех вариантах рабочей ширины: 3 м (20 или 24 сошника); 4 м (29 или 32 сошника); 5 м (32, 36 или 40 сошников); и 6 м (32, 36 или 40 сошников). Обычно устанавливаются механические маркеры, но есть и гидравлический вариант. В данном исследовании использовалась 6-метровая 40-рядная сеялка.

Вентилятор с приводом от ВОМ также входит в стандартную комплектацию (гидравлический привод - опция), а бункер объемом 800 литров устанавливается во всех вариантах [20].

При проведении операционно-технологической оценки определяется несколько ключевых показателей для оценки производительности и эффективности машин и процессов. К таким показателям относятся скорость работы оборудования, ширина захвата и объем выполненной работы. Кроме того, производительность оценивается по различным временным показателям, включая основную, технологическую и сменную производительность. Для характеристики затрат сменного времени также анализируются важные коэффициенты, включающие такие факторы, как количество рабочих ходов, технологическое обслуживание, надежность технологического процесса, использование технологического времени и использование сменного времени. Кроме того, при оценке учитывается удельный расход топлива (газа или электроэнергии) и вспомогательных материалов, а также количество обслуживающего персонала, необходимого для работы. В совокупности эти показатели дают комплексное представление об эффективности работы и помогают выявить области, требующие улучшения в сельскохозяйственном или промышленном секторе. Для этих целей основные методы, используемые для определения вышеупомянутых категорий мероприятий, рассчитываются по методикам, изложенным в [4, 15]

Для проведения хронометражных наблюдений использовался стандартный метод экспериментирования и анализа данных ГОСТ 24055-2016. При проведении эксплуатационно-технологической оценки определяют следующие показатели: - рабочую скорость МТА; рабочую ширину захвата МТА; объем выполненной работы; - производительность за один час времени: основного, технологического, сменного; коэффициенты, характеризующие затраты времени смены: рабочих ходов, технологического обслуживания, надежности технологического процесса, использования технологического времени, использования сменного времени; удельный

расход топлива (газа, электроэнергии и др.), вспомогательных материалов; количество обслуживающего персонала

Контролируемое хронометражное наблюдение. Для сравнения с традиционными нормами работы в рамках хорошо управляемой системы (возможной при имеющихся ресурсах и кадровых возможностях корпорации) был проведен контрольный эксперимент. Операция проводилась в течение одного дня, полностью под контролем экспериментатора. Были заданы определенные ориентиры, соответствующие стандартам и условно достижимые в рамках возможностей системы управления. Оператор получил четкие инструкции за день до проведения эксперимента и под полным руководством экспериментатора должен был придерживаться установленных рекомендаций.

Техники проверили готовность сеялки за день до проведения эксперимента и устранили незначительные, но вызывающие повторные остановки неисправности, выявленные в результате наблюдений, проведенных в предыдущем году. Трубки были плотно завязаны под контролем экспериментатора, а незначительные отклонения были исправлены. С операторами были обсуждены конкретные рекомендации, например, время проверки двигателя должно быть в пределах 5 минут, так как трактор работает в обычном режиме, очередь на заправку и заправка должна быть завершена менее чем за 4 минуты (решение было принято на основе предыдущего опыта). Поскольку в гараже есть технический персонал, оператор может позавтракать в течение вышеуказанного времени, так что после заправки оператор может выехать без задержек. Скорость движения на поле и обратно зависела от дорожной ситуации на шоссе и условий бездорожья, так что это было оставлено на усмотрение оператора. Поскольку оператор использует дорогу, соединяющую два региона страны, высокий трафик затруднял движение с контролируемой скоростью. Время разовой заправки бункера контролировалось таким образом, чтобы уложиться в 10 минут и без задержек отправиться в Актин. Поскольку продолжительность смены составляла 12 часов 4

минуты, оператору предоставлялось два 10-минутных отдыха для решения личных вопросов в дополнение к 30-минутному перерыву на прием пищи, в соответствии с рекомендациями, приведенными в [37, 49, 110].

В конструкции бункера сеялки предусмотрено окно для визуального контроля уровня семян, которое обычно видно с места оператора. Однако, поскольку многие операции предпочтительно выполнять, когда почва относительно сухая, смотровое окно через несколько минут сразу же покрывается пылью, что затрудняет проверку. Как видно из предыдущих операций, оператор часто останавливается и обращается к другому человеку, чтобы проверить уровень посевного материала в бункере. Я решил эту проблему, установив внутри бункера светодиодный осветительный прибор, который получает питание из кабины трактора рядом с сиденьем оператора. Оператор может включить светодиод, когда захочет проверить уровень посевного материала; вместо того чтобы останавливать МТА для этой цели, нужно спуститься, открыть крышку бункера и проверить уровень. Это позволило свести к минимуму ненужные простои.

По сути, был проверен осветительный прибор, позволяющий четко видеть зерно внутри бункера, и оператора спросили, можно ли это увидеть со своего места, а затем внедрились. Шаги настройки представлены на рисунок 3.3.

Фотографии в рисунок 3.3 это снимки видеоманитов, сделанные в непосредственной близости во время эксперимента. Чтобы понять масштаб снимков обратитесь к желтому прямоугольнику на рисунок 3.4 из-за небольшого размера и четкости, более темной, чем на рисунок 3.4 (А), оператор не мог видеть уровень заправки и часто останавливался, чтобы проверить уровень заправки. высевайте семена лично с задней части орудия. Эта проблема была успешно решена, как видно на рисунок 3.4 (В) границы были очень четкими, и оператор смог четко проверить уровень заправки.

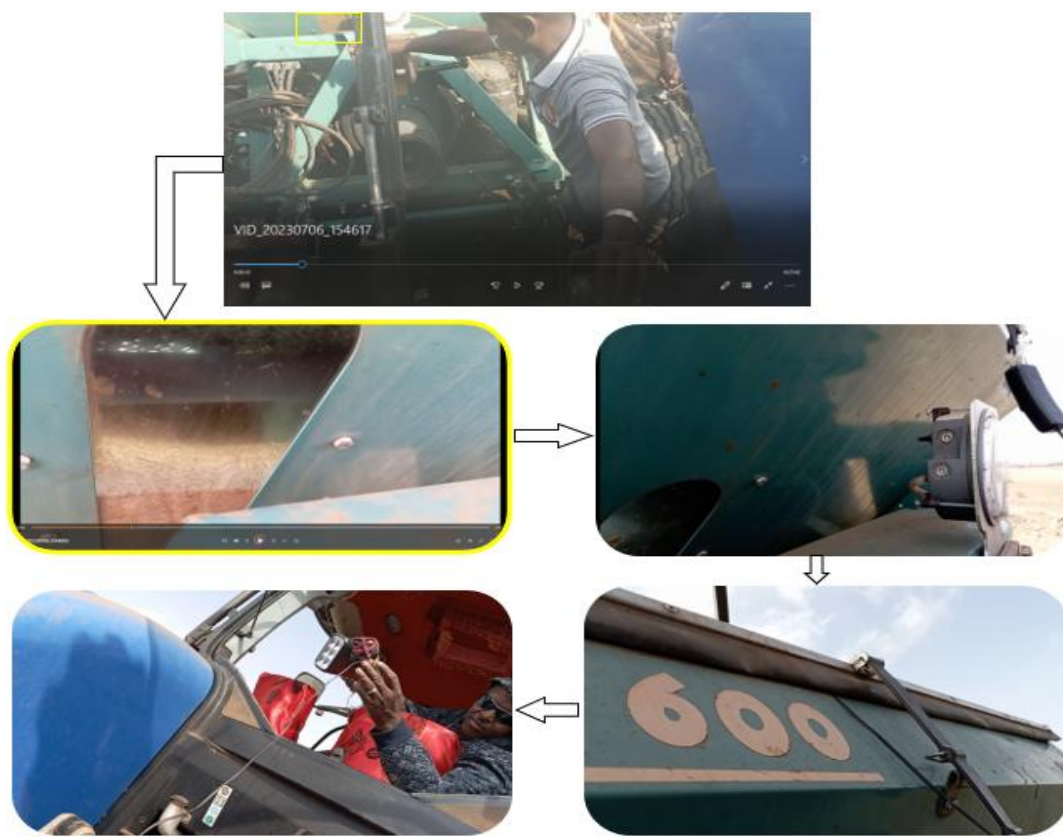


Рисунок 3.2 Фотографии, сделанные на разных этапах монтажа системы освещения



А

В

Рисунок 3.3 Разница в видимости перед установкой освещения

Кроме того, соблюдайте рекомендации по поддержанию постоянной скорости во время всех рабочих проходов и ограничьте время поворота менее 30 секунд, за исключением мест, где эти рекомендации сработали. Для надлежащей оценки МТА был создан таким образом, чтобы работать на графиках относительности правильной формы и с меньшим количеством препятствий.

3.3. Метод анализа производительности МТА в зависимости от конфигурации поля

В дополнение к показателям, проанализированным вышеуказанными методами, был проведен отличительный детальный анализ, чтобы понять основные факторы, которые в значительной степени влияют на показатели приусадебного участка. Как описано в вышеприведенных разделах, был проведен 8-дневный эксперимент с 23 участками, и в течение периода обработки было измерено множество показателей, включая продолжительность каждого перемещения, выполняемого сеялкой, в диапазоне от гаража до поля, от приусадебного участка до гаража. Зарегистрированные операции на ферме включают основное рабочее время, время простоя в пути и время простоя, а также пространственные данные, которые помогают исследованию.

Для оценки производительности сеялки учитывались следующие параметры: эффективная производительность по полю (F_{eff}), эффективность (η) и средняя скорость обработки (v_p), которые определялись выражениями (3.1), и (3.2) соответственно. Эти уравнения эквивалентны уравнениям, приведенным в теоретическом разделе [4, 118, 71, 123].

$$F_{eff} = \frac{A}{T_{total}} \quad (3.1)$$

$$\eta = \frac{T}{T_{total}} = \frac{\sum_{j=1}^n t_j}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (3.2)$$

где t_j – рабочее время непрерывного прохода от точки А до точки В (рис. 3.4); t_i – время, затраченное на выполнение рабочего хода t_j , и время поворота агрегата до начала следующего прохода $j + 1$ (С – на рисунке 3.4). 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 [1, 45]. 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.

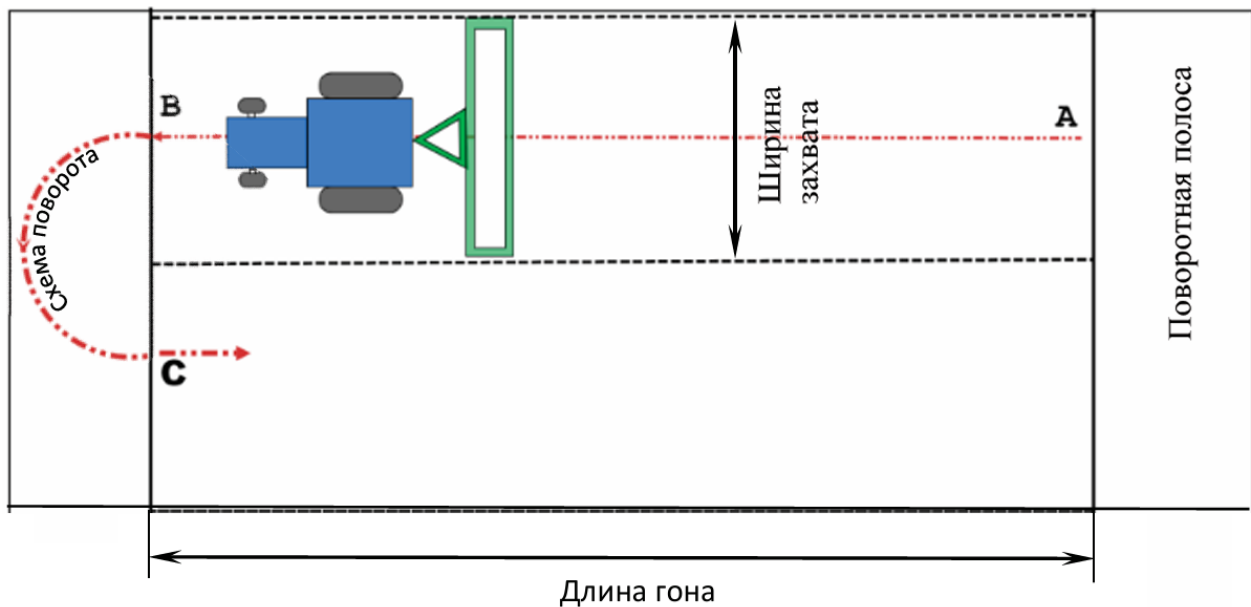


Рисунок 3.4 Схема движения посевного агрегата: А – точка начала рабочего о хода; В – точка окончания рабочего хода; С – точка завершения поворота

V_p был оценен на предмет его способности оставаться в заданных рабочих пределах, как описано в литературе, что можно сделать с помощью тестирования способности процесса. Тест на работоспособность процесса используется для количественной оценки способности производственного процесса соответствовать спецификациям (стандартным или определяемым пользователем); другими словами, он измеряет способность процесса работать в заранее определенных пределах и точности, подтверждая способность удовлетворять требованиям. Индексы способности процесса часто используются в областях статистического контроля качества и управления технологическими процессами для оценки эффективности производственного процесса.

Этот подход был унаследован для проверки с помощью программного обеспечения JMP TRIAL соответствия v_p указанным пределам. Таким образом, в этом исследовании скорость работы сеялки была проверена на соответствие техническим требованиям уравнению 2.1, 2.2, 2.3, и 2.4.

Данные, подлежащие обработке, вводятся в программное обеспечение => анализируются для распространения => проверяются на возможности путем установления пределов => результат интерпретируется.

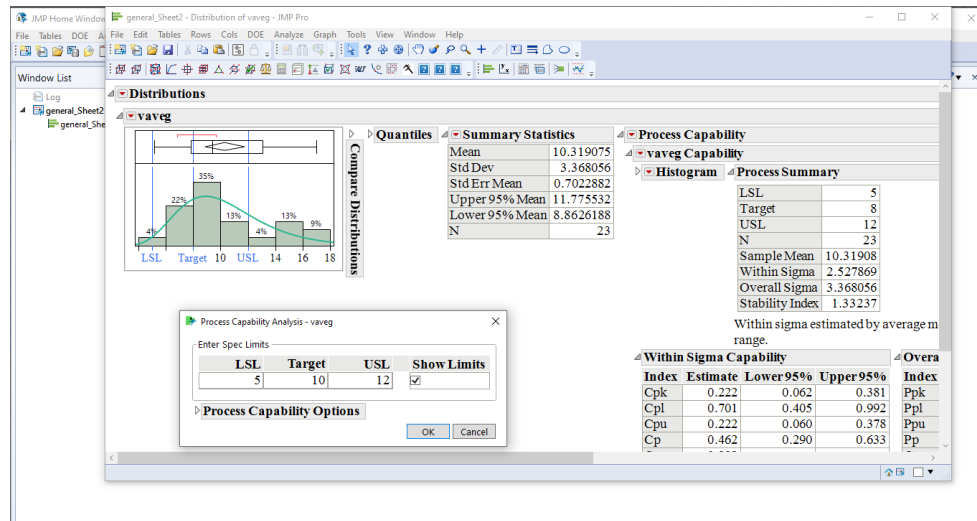


Рисунок 3.5 Схематическая презентация процедуры определения способности процесса

$C_p = 1$ указывает, что изменчивость скорости работы соответствует спецификации, а $C_p > 1$ обеспечивает лучшую производительность; указывает, что скорость работы не превышает USL, при этом более высокое значение демонстрирует более высокие возможности; и указывает, что скорость работы не превышает LSL.

Уравнение 2.41 показывает, насколько хорошо вариация скорости вписывается в пределы спецификации, причем более высокое значение указывает на то, что разброс скорости меньше относительно пределов, что означает лучшие возможности. В то время как уравнения 2.42 и 2.43 оценивают возможности скорости относительно LSL и USL, измеряя, насколько хорошо среднее значение скорости соответствует LSL и USL, учитывая изменчивость скорости. C_{pk} в уравнении (2.44) сравнивает оба значения LSL и

USL для определения общей способности, а значения больше 1 указывают на способность скорости соответствовать требованиям спецификации.

Значения η были проанализированы на распределение согласно скорректированному информационному критерию Акике (AIC) и байесовскому критерию (BIC), позволяющему оценить наилучшее соответствие модели, использующей уравнения (3.3), (3.4) и (3.5)

$$AICc = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} + n \ln(2\pi) + n \quad (3.3)$$

$$BIC = n \ln \left(\frac{SSE}{n} \right) + k \ln(n) + n \ln(2\pi) + n \quad (3.4)$$

$$AICc_{weight} = \frac{\exp[-0,5(AIC - \min(AICc))]}{\sum(\exp[-0,5(AICc - \min(AICc))])} \quad (3.5)$$

где k - количество оцененных параметров в модели, n - количество наблюдений, используемых в модели, а SSE - сумма квадратов ошибок в модели. которые в данном случае являются средним значением (μ) и стандартным отклонением (σ), следовательно, $k = 2$. Модель с наименьшим значением $AICc$ и BIC и наибольшим значением $AICcWeight$ считается наиболее подходящей (Программа JMP Trial)

Чтобы понять влияние конфигурации поля и топографических особенностей на производительность сеялки, учитывались такие параметры, как планировка поля (форма и размер многоугольников поля), текстура почвы, препятствия и неровные поверхности.

Для определения границ участков в конце полевого эксперимента использовалась программа Locus GIS (автономный сборщик данных, картограф, калькулятор площадей и редактор SHP версии 1.17.0). Затем шейпфайл экспортировался в ArcGIS и Google Earth Pro для дальнейшего анализа. Эти шейп-файлы были импортированы в ArcGIS для определения минимального ограничивающего прямоугольника и выпуклого корпуса с помощью инструмента: ArcToolbox => Data Management tools => Features => Minimum Bounding Geometry => select shape => select Geometry Рисунок 3-7. Графики и площади

граничных геометрий вычислялись непосредственно с помощью того же инструмента. Этот метод был использован для определения индексов выпуклости и прямоугольности (2.35) и (2.39). остальные индексы определяются с помощью остальных уравнений с (2.36) по (2.38).

Площади выпуклой оболочки и минимального ограничивающего прямоугольника отдельных участков были вычислены с помощью инструмента ArcGIS.

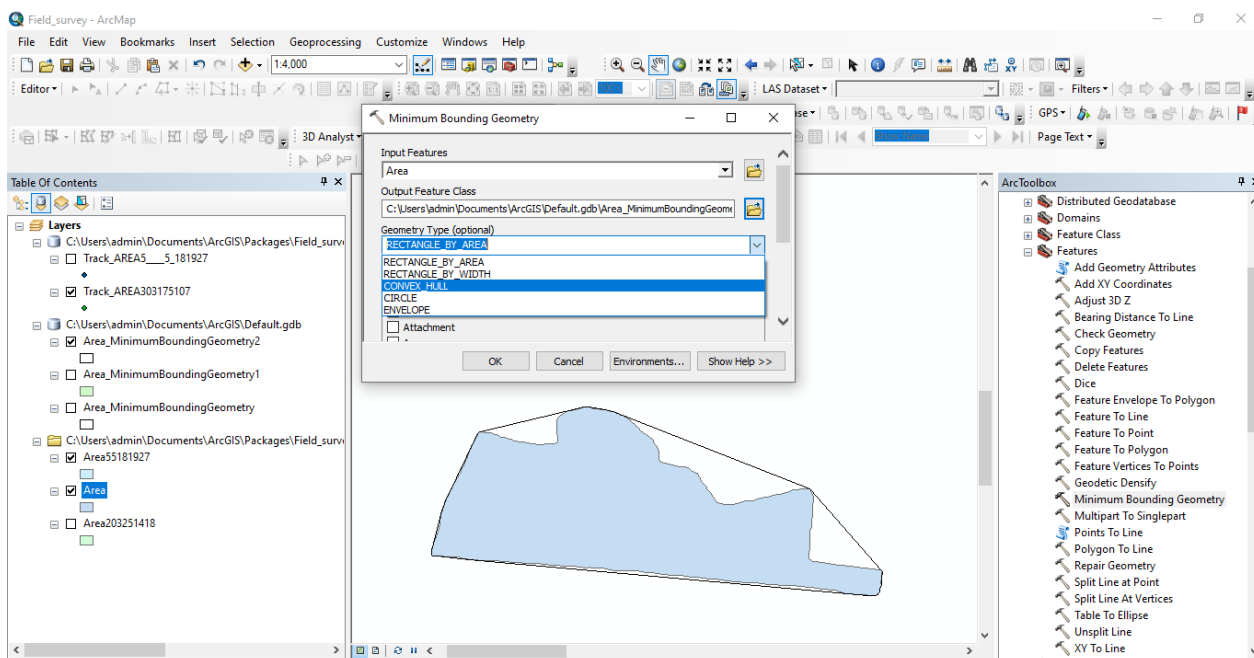


Рисунок 3.6 Создание минимальной ограничивающей геометрии в ArcGIS.

На рисунке 3.6 показан процесс создания выпуклых корпусов, а участок внутри рисунка уже вписан в выпуклый корпус. Тот же инструмент и процесс используются для создания минимального ограничивающего прямоугольника заданного участка (геометрии). Результаты этих процессов представлены на рисунке 3.7 [8].

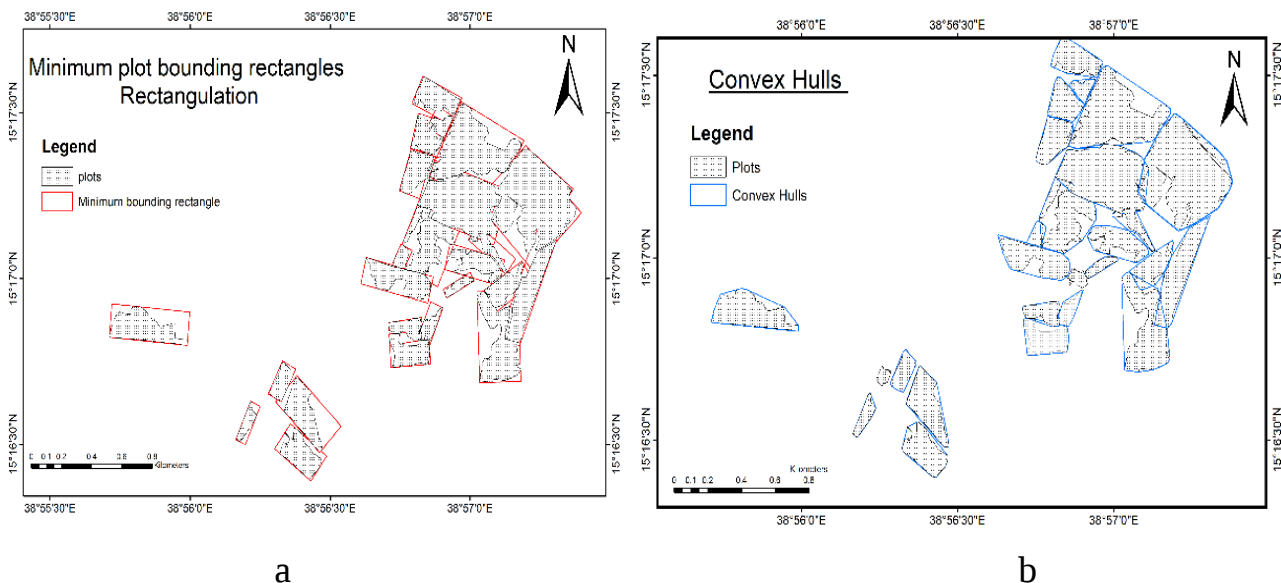


Рисунок 3.7 Минимальные ограничивающие прямоугольники (a) и выпуклые оболочки (b) результаты ArcGIS

Площади, рассчитанные мобильным приложением, были сверены с площадями, рассчитанными с помощью GPS Garmin, и площадями, полученными путем оцифровки полей отдельных участков в Google Планета Земля Pro; и были признаны надежными для использования.

Поверхности участков были оцифрованы с помощью Google Earth Pro для получения более подробной информации о поверхности почвы, а карта рельефа была построена с помощью ArcMap. Стандартное отклонение каждого участка было рассчитано с помощью уравнения (2.40) и использовалось в качестве индекса микрорельефа поверхности почвы [63]. Более высокое значение σ_e означает значительную изменчивость рельефа поверхности почвы и ее запутанность.

Данные анализировались с использованием языка программирования Python в среде распространения Anaconda с использованием Pandas для манипулирования данными, NumPy для числовых операций и модуля SciPy "ndimage" для функций обработки изображений.

3.4. Метод оценки эксплуатационной точности движения пневматической сеялки

Точные геопространственные данные о движении МТА необходимы для анализа его траектории. В рамках исследования по наблюдению за хронометражем, проведенного с помощью МТА, была выполнена пространственная запись траектории МТА. С этой целью 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 смартфонов. Смартфон с активированным приложением слежения был установлен точно по осевой линии трактора. Такое расположение обеспечивало точную запись траектории движения машины и максимально увеличивало прием спутниковой информации для повышения точности. Затем была начата операция по захвату и записи маршрутов движения. Впоследствии данные были экспортированы в Google Earth Pro и ArcGIS для дальнейшей обработки.

Линии трассы, записанные приложением, были тщательно проанализированы на предмет единообразия и точности. В данном контексте "точность" означает, что линии трассы на протяжении всего процесса записи проходили через равные интервалы в 6,15 метра на всех участках. Анализ выявил несоответствия в поддержании параллельных маршрутов со стороны МТА и несоответствия в интервалах между последовательными проходами. Таким образом, было проведено однодневное полевое обследование для оценки результатов посевной операции, проведенной МТА на ранней стадии роста урожая пшеницы, с целью сбора на местах информации о точности маршрута (для выбранных участков).

Были выбраны конкретные участки между линиями маршрута в приложении для смартфона (где интервал между маршрутами превышал 6,15 м), включен навигатор приложения, и я вернулся к этим конкретным местоположениям, чтобы убедиться в том, что промежутки между показаниями действительно находятся на местности. Одно из мест (участка 11) было указано на рисунке 3.7. В точке, где лежит линейка 50 см,

расстояние между рядами составляло 0,8 м вместо 0,15 м. Фактическая рабочая ширина МТА составляет 6,15 м; ширина конструкции составляет 6 м, в ней 40 рядов, а расстояние между рядами - 0,15 м. Таким образом, расстояние между рядами всегда должно составлять 0,15 м. Это означает, что расстояние между последовательными проходами теоретически составляет 6,15 м. Любое отклонение, превышающее или понижающее это значение, приводит к тому, что между проходами остается незасеянное пространство или повторяются определенные участки посевной площади, что не рекомендуется по многим причинам. Это может привести к чрезмерному засеву (напрасной трате ресурсов на повторение операции) или к оставлению незасеянных участков, что приведет к плохому использованию пахотных земель.



Рисунок 3.8 Фотография участка 11 с мобильного приложения и его натуральный увеличенный фрагмент.

Записи маршрутов МТА показаны на рисунке 3.8, где темными линиями обозначены границы четырех участков, а розовыми - маршруты слежения, записанные во время полевых работ с помощью приложения Locus GIS. Участки с записанными маршрутами, показанные на рисунке, являются практическими записями отслеживания с помощью смартфона на ферме Целот в Эритрее и были оценены на предмет частоты повторения или оставления незасеянного участка, другими словами, площади, точности. Эти операции выполнялись с помощью метода управления человеком, когда механический маркер становится неработоспособным из-за обычных полевых условий,

преобладающих на фермах.

Расстояния измеряются между линиями маршрута, перпендикулярными направлению движения в типичных местах участка, например, вдоль линий В - В, С - С, А - А и D - D на рисунке 3.8: А, В и С, соответственно.

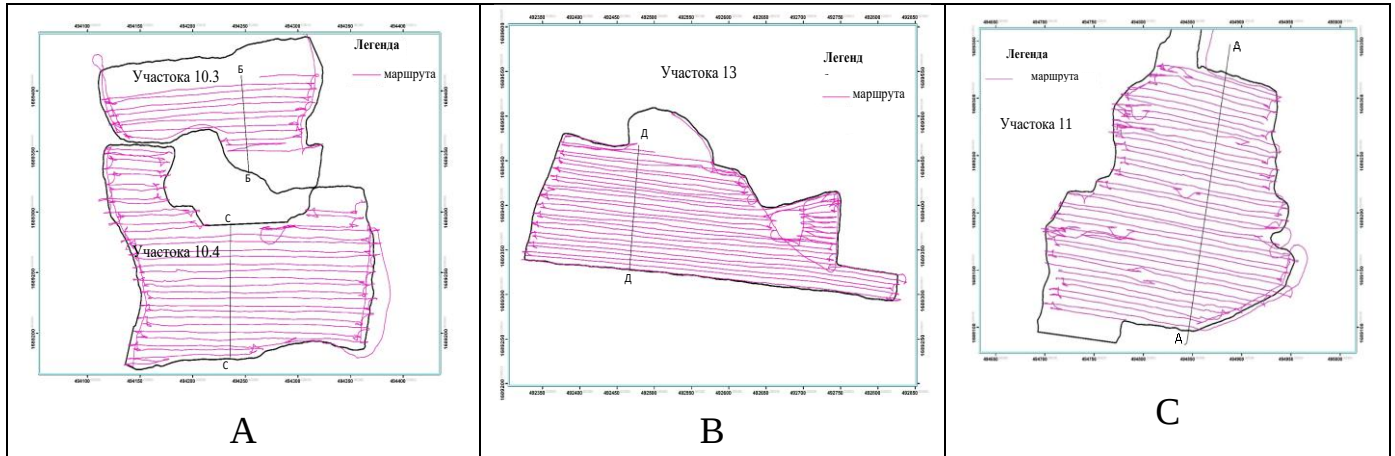


Рисунок 3.9 Отслеживаемые маршруты оцениваемых участков

Отклонение ширины от идеальной используется для количественной оценки областей ошибок (области повторяются или перекрываются, а пространство остается незаполненным). Для этой цели размер идеальной площади математически определяется с помощью уравнения (3.6) [12].

$$S = \sum_{i=1}^n a_i = \frac{B_0}{2} (L_0 + L_n) + \frac{B_1}{2} (L_0 + L_1) + \frac{B_2}{2} (L_1 + L_2) + \dots + \frac{B_n}{2} (L_{n-1} + L_n); \quad (3.6)$$

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. 3.9А); $i = 1, 2, \dots, n$ – количество отдельных маршрутов.

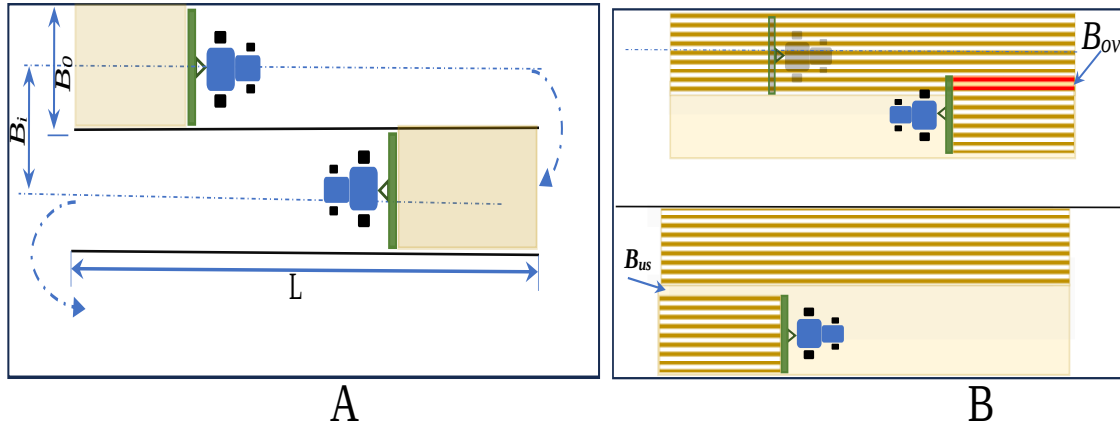


Рисунок 3.10 Идеальная ширина и расстояние между маршрутами (А) и возможные отклонения (В)

Из-за 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 [82]:

$$RP = \frac{S_R}{S - S_R} \times 100 \quad (3.7)$$

$$MP = \frac{S_M}{S - S_R + S_M} \times 100 \quad (3.8)$$

А площадь, повторяющаяся (S_R) и/или оставшаяся незаполненной (S_M), определяется как:

$$S_R = B_{ovi} \times L_i; \quad (3.9)$$

$$S_M = B_{usi} \times L_i; \quad (3.10)$$

где B_{ov} и B_{us} – ширина (м), перекрытая и оставшаяся незасеянной соответственно (рис. 3.9).

Коэффициент рабочих ходов (φ_{PO}) оценивается отношением расстояния рабочего маршрута к сумме рабочих и холостых ходов [4].

$$\varphi_{PO} = \frac{S_P}{S_P + S_{XO}} \times 100; \quad (3.11)$$

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. 3.1).

Таблица 3.1. Сравнительный обзор систем автоматического вождения агрегата

Компания	Система	Точность, см	Коррекционные услуги
ИТЭЛМА СП	Autopilot [66]	1 см + 1 ppm	RTK
John Deere	AutoTrac™ [105]	±2,5 (RTK), ±3 (SF3)	StarFire™ RTK, SF3, SF2, SF1
Trimble	Autopilot™ [129]	±2,5 (RTK)	RTK, CenterPoint® RTX, RangePoint® RTX, ViewPoint™ RTX
Ag Leader	SteerCommand® with GPS 7500 [119]	±2,5 (RTK)	RTK, TerraStar-C Pro, TerraStar-L
Topcon	AGI-4 [21]	±2 (RTK)	RTK, TopNET Global D, SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS)
CLAAS	GPS PILOT [40]	±2-3 (RTK)	RTK, EGNOS, other regional correction services
FieldBee	Autosteer [57]	±2,5	RTK
FJDynamics	Auto-Steer [58]	±2,5	GPS, GLONASS, Beidou, Galileo
Sveaverkenc	F100 Auto Steer System	±2,5	GPS, GLONASS [53]
NewHolland	IntelliSteer™	±1-2 (RTK)	RTK, WAAS, EGNOS [104]

Количество повторных сечений на всех полях 5. Отклонение ширины от идеального значения использовали для количественной оценки площадей ошибок (площадь повторно засеивалась или оставалась незасеянной). Для этой цели размер идеальной площади математически определяется по уравнению

Ошибку МТА (ε) определили как абсолютное значение разницы между фактическими ($B_{\text{ф}}$) и теоретическим ($B_{\text{т}}$) расстоянием между последующими проходами (уравнение 3.8). Ссылаясь на значения в таблице 3.1, выполнили одновыборочный t-тест (уравнение 3.14) при сравнении ошибки МТА и уровня точности автоматизированной системы.

$$\varepsilon_{i(T6090)} = |B_{ui} - B_t| \quad (3.12)$$

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad (3.13)$$

где: $\bar{x}$ — среднее значение выборки, μ — среднее значение точности автоматизированной системы, s — стандартное отклонение выборки, n — размер выборки

Определение подходящего ограничения скорости: Скорость работы пневматической сеялки существенно влияет на качество посева, урожайность биомассы и расстояние между семенами. Идеальная скорость зависит от культуры, состояния почвы и сеялки. Для участков диаграмм 10.4, 11 и 13 вдоль измерения расстояния время прохождения расстояния было частью записи, а скорость работы вычислялась математически как:

$$v_i = \frac{l_i}{t_i}; \quad (3.14)$$

где: v_i — скорость, км/ч; l_i — длина отдельного маршрута, м; t_i — время, с, необходимое для завершения l_i .

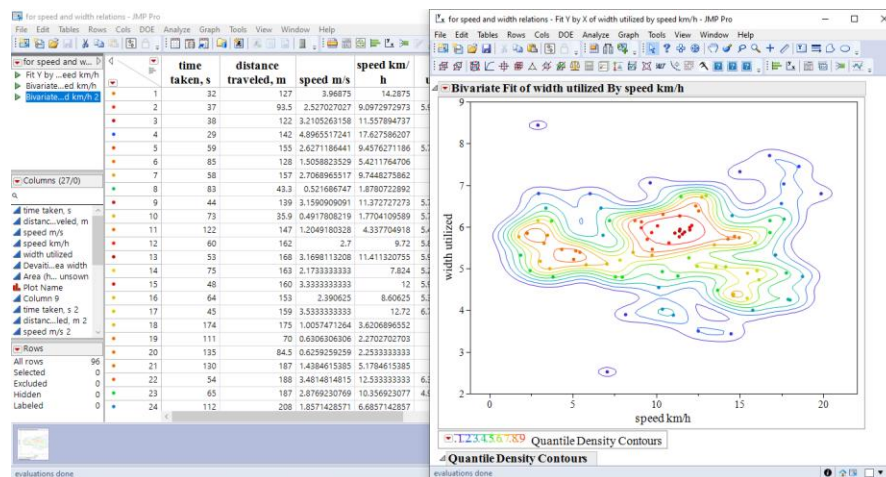


Рисунок 3.11 Контурные плотности квантилей для определения оптимальной ширины операции

Процессы нахождения подходящей рабочей ширины по данным маршрута передаются в программу JMP TRIAL в режиме «Fit y by x», затем генерируются контуры плотности квантилей (рису.3.11) и анализируются для нахождения максимальной скорости, которая может дать ширину, близкую к теоретической.

3.5. Методы оценки качества работы машинно-тракторных агрегатов

В продолжение исследования, проведенного в 2023 году, на ферме Целот (часть фермы Ади'Гуаедад) с июля по сентябрь на тех же экспериментальных площадках было проведено несколько полевых исследований и экспериментов, определяющих качественные показатели выполняемых операций. Эти эксперименты проводились для трех основных полевых операций: основной обработки почвы, предпосевной обработки и посева. Другие важные показатели, такие как уровень уплотнения почвы при заданном уровне влажности почвы, также были частью исследования. В этом разделе распределение собранных данных будет проанализировано с помощью программного обеспечения JMP TRIAL. Выбор наилучшего распределения, представляющего данные, осуществляется с помощью встроенной функции того же программного обеспечения (рис.3.12).

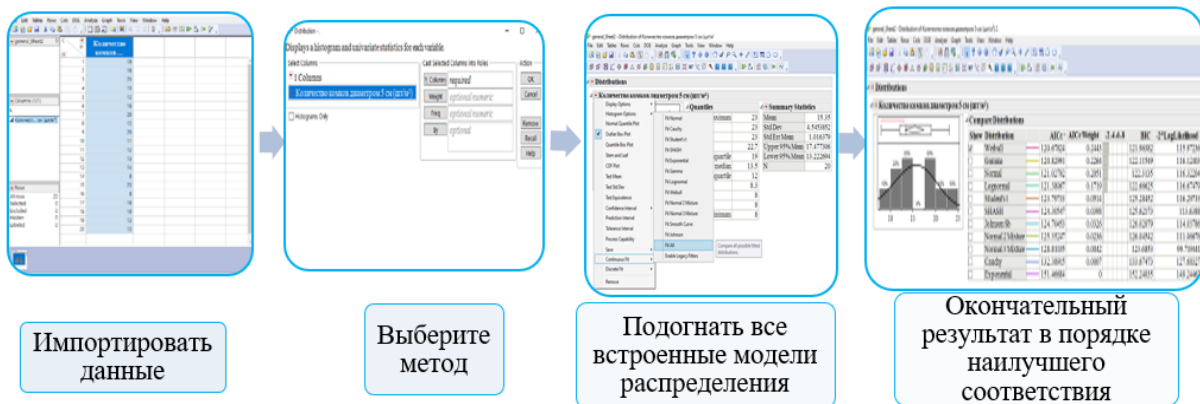


Рисунок 3.12 Программное обеспечение выбирает наилучшее распределение на основе значений AIC и BIC

Оценка качества основной обработки почвы: для оценки качества основной обработки почвы, выполненной в поле, следует учитывать такие качественные

показатели, как отклонение средней фактической глубины обработки от заданной, см; не подрезанные сорняки; выравненность поверхности, %. Метод получения данных для этой оценки кратко изложен в Таблице 3.3. Обычная глубина обработки почвы дисковыми плугами составляет от 6 до 12 дюймов (15,24 – 30,48 см) [46].

Таблица 3.3. Оценка качества обработки почвы [4, 14]

Показатель	Градация нормативов	Балл	Метод определения
Отклонение средней фактической глубины обработки от заданной, см	Не более 1	3	Измерить в 10 местах по диагонали участка. Полученное среднее значение уменьшить на величину вспушенности почвы (20%)
	Не более 2	2	
	более 2	1	
Неподрезанные сорняки	Отсутствуют	3	Визуально. При необходимости 3...5 В местах по диагонали участка наложить метровую рамку и подсчитать неподрезанные сорняки
	Имеются	1	
Выравненность поверхности, %	Не более 3	3	Визуально. При необходимости В 3...5 местах участка поперек обработки замерить длину профиля шнуром 10 м, соединенным с двухметровой лентой
	Не более 5	2	
	более 5	1	



Рисунок 3.13 фотографии, сделанные во время полевых измерений

Следуя описанному выше процессу, были проведены полевые измерения. Инструментами, использовавшимися для этой цели, были землеройная мотыга, стандартная измерительная лента длиной 30 м и кабель длиной более 40 м.

В дополнение к методу оценки, приведенному в таблице выше, глубина основной обработки почвы была проанализирована на предмет распределения, и был проведен тест на среднее значение, чтобы сравнить его с идеальными значениями, которые обычно приводятся в литературе.

Оценка качества предпосевной обработки почвы: при проведении качественной оценки операций предпосевной обработки почвы были измерены следующие показатели: Отклонение глубины обработки при обработке, см; Количество комков диаметром 5 см (шт/м²) и Количество неподрезанных сорняков, шт/м². Методика сбора данных описан в Таблице 3.4. Оборудование было те же, что и при исследовании основной обработки почвы. Дополнительно использовалась деревянная рама размером 1х1 м. Для измерения размера комков использовался цифровой штангенциркуль. Диаметр комков был измерен в трех измерениях; глубина, ширина и длина были усреднены.

Таблица 3.4. Используемые показатели операций предпосевной обработки почвы и применяемый метод сбора полевых данных для оценки качества

Показатель	Градация нормативов	Балл	Метод определения
Отклонение глубины обработки при обработке, см:			В 15...20 местах по диагонали участка измерить линейкой глубину обработки
До 12	До 1	3	
	1 - 1,5	1	
	Более 1,5	0	
Более 12	До 2	3	
	2,0 - 2,5	1	
	Более 2,5	0	
Количество комков диаметром 5 см (шт/м ²)	До 20	3	В 15...20 местах по диагонали участка наложить рамку размером 1×1 м и подсчитать количество комков
	20-30	2	
	более 30	1	
Количество неподрезанных сорняков, шт/м ²	Ничего	3	В 5...6 местах по диагонали участка наложить рамку размером 1×1 м и подсчитать неподрезанные сорняки
	2	2	
	4	1	
	Более 4	0	

На рисунке 3.14 показана процедура, использованная для измерения размера комков, а на рисунке 3.15 - глубина обработки почвы. Средние значения этих данных

были сопоставлены с конкретным значением, представленным в таблице, с использованием t-критерия.



Рисунок 3.14 Фотографии, сделанные во время полевых измерений количества комков и неподрезанных сорняков, (поскольку операция проводилась до начала дождя, сорняки не выросли).



Рисунок 3.15 фотографии сделаны 03 июля 2024 года (слева) и 25 июля 2024 года, до и после дождя соответственно.

Процесс посева: Посев - одна из самых ответственных операций в сельском хозяйстве. Поскольку небольшое отклонение от требуемой нормы высева и глубины может повлиять на производительность операции. Оценка и поддержание качества

выполнения этой операции имеет первостепенное значение. Поэтому в этом разделе были использованы два подхода к сбору данных на ферме и проведению экспериментов. Первый заключался в оценке глубины заделки семян путем измерения глубины прорастания семян, которые были посеяны в конце июня, а второй заключался в определении наилучшей рабочей скорости, которая обеспечивает оптимальную глубину заделки и норму высева.

Оценка глубины заделки семян: Качество работы в этом разделе определяется путем измерения таких показателей, как: Отклонение нормы высева семян %; Отклонение глубины заделки семян, см; и Отклонение в размере стыкового расстояния, см. Метод проведения этой оценки описан в Таблице 3.5.

Таблица 3.5. используемые показатели посевных работ и метод, применяемый для сбора полевых данных для оценки качества.

Показатель	Градация нормативов		Балл	Метод определения
Отклонение нормы высева семян %	$\pm 1,5$		4	В пяти местах по длине гона посчитать количество семян на 1 пог. м
	До ± 2		2	
	Более ± 2		1	
Отклонение глубины заделки семян, см	$\pm 1,5$		3	Не менее смену 10 раз в раскопать рядки по ширине захвата сеялки или определить по прибору Калентьева
	До ± 2		2	
	Более ± 2		1	
Отклонение в размере стыкового расстояния, см	Для соседних:			Не менее 10 раз в смену измерить ширину междурядий между крайними сошниками двух смежных проходов
	сеялок	проходов		
	До ± 2	До ± 5	2	
	До ± 3	До ± 6	1	
	$> \pm 3$	$> \pm 6$	0	

На рисунке 3.16 показана процедура, используемая для измерения глубины заделки семян после того, как культура полностью проросла. Кроме того, средние значения этих данных были сопоставлены с конкретным значением, представленным в таблице, с использованием t-критерия.



Рисунок 3.16 измерение глубины заделки семян с помощью стандартной измерительной ленты

Оптимизация скорости высева семян: влияние на глубину и норму высева:

В этом исследовании было проверено влияние рабочей скорости на глубину заделки семян в почву и норму высева. Для обеспечения статистической достоверности и минимизации вариабельности была использована полностью рандомизированная конструкция блока с тремя повторениями и шестью скоростями (4 км / ч, 6 км / ч, 8 км / ч, 10 км / ч, 12 км / ч и 14 км / ч). Чтобы достичь требуемой скорости за разумное время на всем протяжении дистанции, участки были расположены параллельно друг другу, но случайным образом. Для определения глубины заделки семян на каждом участке были выбраны случайные точки, аккуратно перекопанные вертикально, и глубина заделки семян для поверхности почвы была измерена с помощью стандартной шкалы.

После выбора точки были выкопаны две другие точки в каждом ряду по обе стороны от точки и измерена глубина, и сразу же среднее из трех было записано как единое значение. С каждой репликации отбирали десять точек отбора проб. Одновременно в пяти из этих точек перекапывали междурядья длиной в один метр и подсчитывали количество семян. Но в то время одна строка считалась репрезентативной для всех строк, и из каждой копии было взято только пять образцов, чтобы свести к

минимуму трудозатраты и время, затрачиваемые на сбор данных. Наряду с этим 10 раз измеряли ширину междурядий между крайними сошниками двух соседних проходов, чтобы оценить фактическую ширину посева и проанализировать ее изменчивость.

Программное обеспечение JMP TRIAL использовалось для анализа влияния скорости на два показателя (глубину заделки семян и норму высева), чтобы соответствовать модели линейной регрессии, была доступна функция FitModel программного обеспечения, в которой скорость работы была указана в качестве независимой переменной, а глубина заделки семян и норма высева - в качестве переменных отклика, и модель была запущена после выбора повторов в качестве случайной величины. На рисунке 3.17 приведен снимок экрана программы JMP TRIAL, используемой для выполнения указанного процесса.

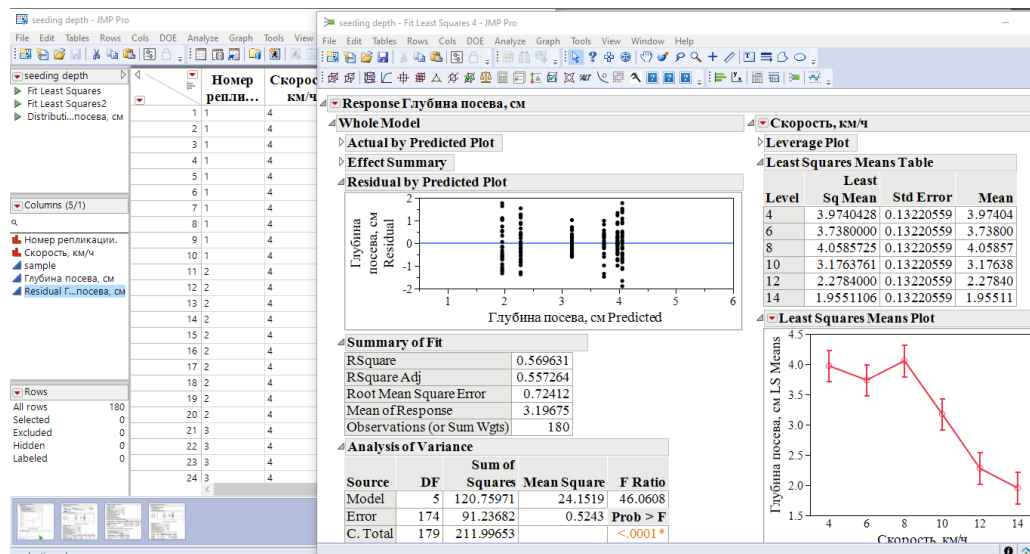


Рисунок 3.17 Регрессионный анализ, проведенный с использованием программного обеспечения JMP TRIAL

3.6. Оптимальное использование техники при одновременном выполнении производственных процессов

В следующей таблице приведена сводная спецификация навесного оборудования и соответствующих тракторов, обычно доступных в ECLC (табл.3.6 приложения 3). Требуемая мощность получена из спецификаций навесного оборудования.

Средняя тяговая мощность тракторов, перечисленных в таблице, была рассчитана путем умножения номинальной мощности двигателя каждого трактора на эффективность передачи мощности на тяговое усилие (ASAE [118]).

При проведении предпосевных и посевных работ использовались показатели производительности и скорости работы этих машин, рассчитанные в ходе наблюдений за хронометражем. Однако для основных посевных работ коэффициент использования времени смены (τ), взятый из литературы [118], составлял 0,75. Максимальная рабочая скорость NewHolland T7060 была принята равной 9 км/ч [73]. Средняя скорость работы Massey Ferguson 465 составляла 7,5 км/ч, поскольку он использовался только для основной обработки почвы. Коэффициент использования рабочего времени (τ) для Newholland T7060, используемого для предпосевной обработки, был принят таким же, как и для T6050. На основе этих значений рассчитывается производительность МТАс. Перечень Оборудования и тракторов, которые могут им управлять, представлен в таблице 3.6, приложение 2

Таблица 3.7. Исходные данные задачи

Тип операции	Объем работы, га	Часовая производительность, га/ч				Объем работ, выполняемых агрегатами на базе тракторов			
		Новая голландия T7060 (6)	Новая голландия T6050 (8)	Форгусон 465 (4wd) (3)	Новая голландия T6090 (4)	Новая голландия T7060 (6)	Новая голландия T6050 (8)	Форгусон 465 (4wd) (5)	Новая голландия T6090 (4)
Основная обработка почвы (Дисковый плуг)	1290.34	0,8775	0,51	0,45	1.17	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
Предпосевная подготовка (Дисковая борона)	1290.34	1,68	1,7	0,0	2,2	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄
Посев (пневматической сеялки Nardi Dora Air Drill 600)	1290.34	0	0,0	0,0	4,42	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₄	X ₃₄

Для производства пшеницы в хозяйстве ECLC, расположенном в горной местности Эритреи, а именно в хозяйствах Целот-Ади'Гуэдад и Халхале, в целях

минимизации сроков выполнения комплекса работ при 10-часовом рабочем дне с учетом погодных условий необходимо определить распределение видов работ между имеющимися агрегатами. Для выполнения этих работ хозяйство использует технику, приведенную в Таблице 3.7. В хозяйстве имеется: 6 тракторов Новая Голландия Т7060, 8 Новая Голландия Т6050, 3 ФОРГУСОН 465 (4WD) и 4 Новая Голландия Т6090. Часовая производительность агрегатов и объемы работ представлены в таблице 3.7.

Математическая формулировка:

1. Целевая функция - минимум разницы во времени, необходимом каждому трактору для выполнения своих задач.

$$Z = (T_1 - T_2)^2 + (T_2 - T_3)^2 + (T_3 - T_4)^2 \rightarrow \min$$

2. Ограничения:

- ограничения по общему объему работ:

$$X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} = 1290.34$$

$$X_{21} + X_{22} + X_{24} = 1290.34$$

$$X_{34} = 1290.34$$

- ограничения неотрицательности:

$$X_{ij} \geq 0, \text{ for all } i, j$$

Уравнения времени:

$$T_1 = \frac{X_{11}}{6 \times 8,775} + \frac{X_{21}}{6 \times 16,8} = 0,019X_{11} + 0,01X_{21}$$

$$T_2 = \frac{X_{12}}{8 \times 5,1} + \frac{X_{22}}{8 \times 17} = 0,0245X_{12} + 0,00735X_{22}$$

$$T_3 = \frac{X_{13}}{5 \times 4,5} = 0,045X_{13}$$

$$T_4 = \frac{X_{14}}{4 \times 11,7} + \frac{X_{24}}{4 \times 22} + \frac{X_{34}}{4 \times 44,2} = 0,0214X_{14} + 0,01136X_{24} + 0,00566X_{34}$$

Алгоритм представлен в виде следующей блок-схемы:

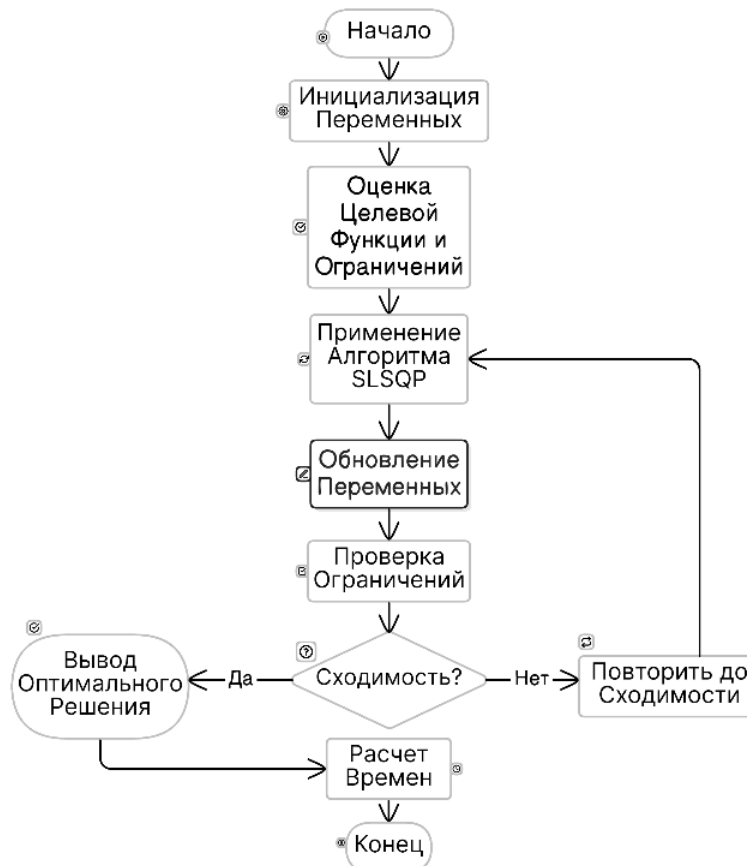


Рисунок 3.18 Процесс оптимизации SLSQP

Алгоритм оптимизации: Последовательное программирование наименьших квадратов (SLSQP).

1. Инициализация переменных: установите начальные значения для X_{11} , X_{12} , ..., X_{34} , убедившись, что они неотрицательны.
2. Оценка целевой функции и ограничений: вычислите целевую функцию и проверьте, выполняются ли все ограничения, включая не-отрицательность.
3. Применить алгоритм SLSQP: использовать SLSQP для итеративного обновления переменных до достижения сходимости.
4. Обновление переменных: изменение переменных с обеспечением не-отрицательности и выполнением других ограничений.
5. Проверка ограничений: проверка соблюдения всех ограничений во время каждой итерации.

6. Повторять до достижения конвергенции: продолжать обновлять переменные до тех пор, пока дальнейшее улучшение станет невозможным или не будет достигнут критерий остановки.

7. Вывести оптимальное решение: предоставить оптимальные значения X_{11} , X_{12} , ..., X_{34} , которые минимизируют целевую функцию, удовлетворяя при этом всем ограничениям.

8. Расчет времени: вычислите T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , используя эти оптимальные значения.

3.7. Оптимизация маршрутов для сельскохозяйственной техники с целью минимизации холостых поездок между полями и парками

В современном сельском хозяйстве оптимизация эффективности работы техники имеет решающее значение для максимизации производительности и снижения эксплуатационных расходов. Одной из важных проблем, с которой сталкиваются фермеры, является минимизация времени простоя в пути между участками и парками, что может привести к потере ресурсов и снижению общей эффективности. Простой путь относится к непродуктивному движению техники, будь то перемещение между различными полями или возвращение в пункты хранения и технического обслуживания.

Внедряя эффективные стратегии оптимизации маршрутов, фермеры могут оптимизировать работу своей техники, сокращая расход топлива, затраты на рабочую силу и износ оборудования. Передовые алгоритмы и технологии, такие как GPS-отслеживание и аналитика данных, могут использоваться для анализа маршрутов движения и определения наиболее эффективных маршрутов для сельскохозяйственной техники.

Чтобы выяснить наилучший маршрут движения агрегата от тракторного парка до участков и возвращение в парк, проезжая наименьшее расстояние за смену и в ходе полевых работ, были найдены координаты центроидов участков, и Google Earth Pro был использован для оцифровки расстояния между каждым участком и парком. Это связано

с тем, что доступ между парком и участком определяет расстояние между ними, а не географические координаты. Расстояния между участками были определены из координат участков с использованием евклидова расстояния. Цель состоит в том, чтобы оптимизировать ежедневные маршруты движения МТА для сельскохозяйственных участков путем минимизации расстояний перемещения при соблюдении ограничений производительности машин.

В этом исследовании используется системный подход к оптимизации маршрутов посева для сельскохозяйственных участков, объединяющий вычислительную геометрию и методы оптимизации. Методика разделена на четыре основных этапа: инициализация данных, расчет матрицы расстояний, оптимизация маршрута и отчет о результатах.

Шаги

1. Сбор данных

1.1.*Координаты:* Географическое положение всех участков и парком определяется с использованием их восточной и северной систем координат, эти координаты использовались для определения матрицы расстояний с помощью алгоритма.

1.2.*Области:* была рассчитана (оцифрована) площадь каждого участка (в гектарах), которую необходимо засеять.

1.3.*Производительность машины:* Суточная производительность техники (га) была рассчитана на основе экспериментов, проведенных в одном и том же хозяйстве, специально для тех, которые использовались на предпосевных и посевных работах.

1.4.*Расстояния от депо:* Google Earth Pro использовался для оцифровки расстояния между каждым участком и парком.

2. Оптимизация маршрута

Суть методологии заключается в оптимизации ежедневных маршрутов используемой техники с использованием эвристического алгоритма, включающего

элементы принципов задачи маршрутизации агрегатов с учетом пропускной способности (CVRP). На данном этапе алгоритм для посевной техники будет подробно описан как типичный, который включает в себя другие операции (основная обработка почвы и предпосевная обработка).

1. Инициализация: Переменные инициализируются для отслеживания оставшихся незасеянных площадей, общего расстояния поездки и ежедневных маршрутов.

2. Ежедневное планирование маршрута:

- Каждый день начинается в парке, приоритет участков определяется на основе их удаленности от текущего местоположения и оставшейся площади для засева.
- Для ранжирования участков используется система подсчета баллов, которая уравнивает близость и размер незасеянной площади. Приоритетный балл рассчитывается следующим образом:

$$\text{Приоритет} = \text{Расстояние} / (\text{Оставшаяся Площадь} + 1)$$

- Участки выбираются последовательно до тех пор, пока не будет достигнута суточная производительность машины.
- В конце каждого дня маршрут возвращается в парк, и регистрируется общее расстояние поездки.

3. Отслеживание прогресса. После каждого дня производятся обновления для отражения засеянных площадей, а незасеянные площади пересчитываются.

4. Результаты вывода. Ежедневно печатаются маршруты посева, в которых подробно описывается:

- Последовательность посещённых участков.
- Посевные площади на каждом участке.
- Общее расстояние, пройденное за этот день.

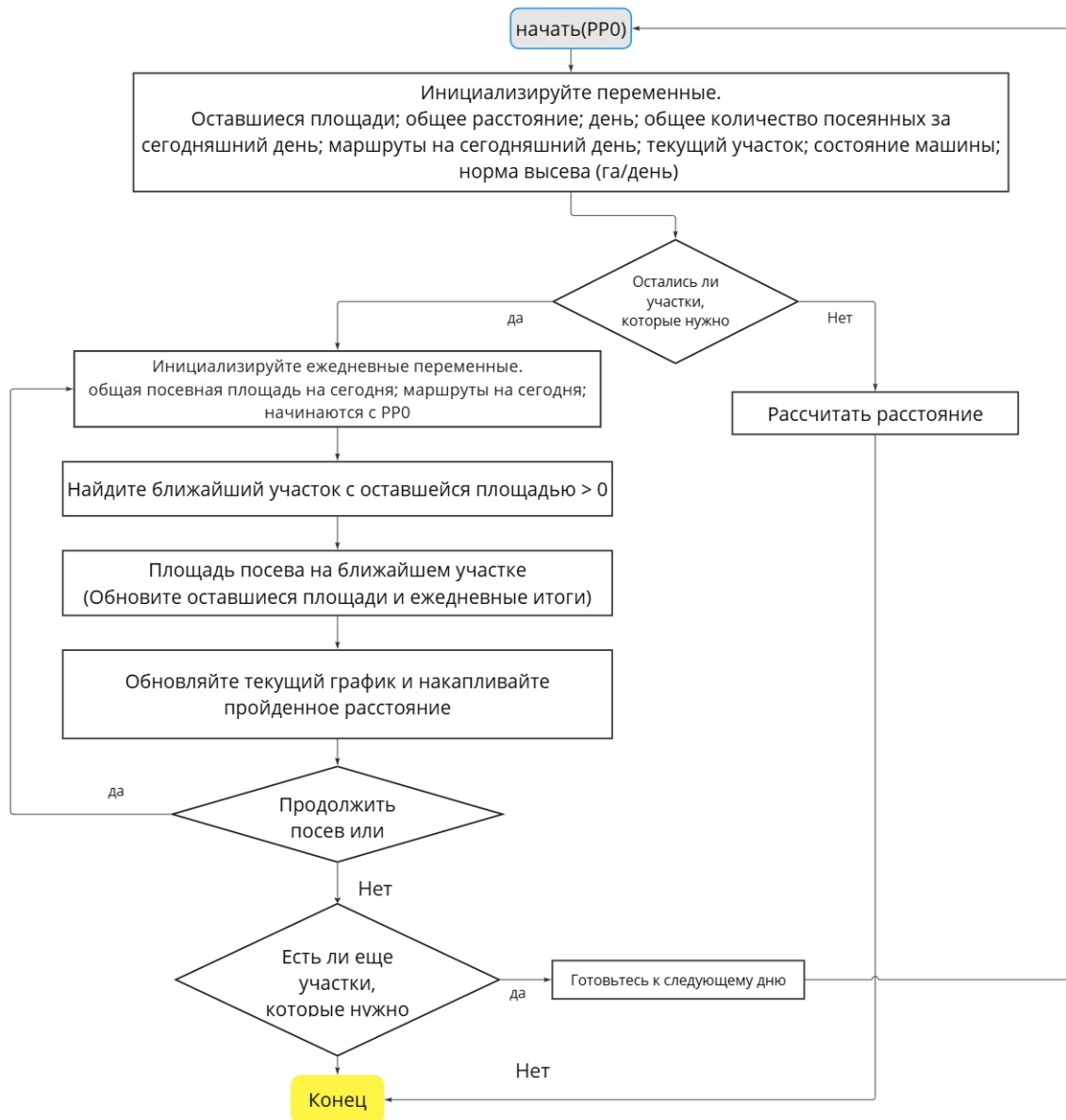


Рисунок 3.19 Эвристический алгоритм для минимизации расстояния простоя при оптимизации маршрута посева

Эта методология гарантирует, что посевные операции оптимизированы для эффективности при соблюдении эксплуатационных ограничений. Используя эвристический алгоритм, который отражает принципы CVRP, он обеспечивает действенные идеи посредством числовых результатов, что делает его пригодным для практического применения в сельскохозяйственном планировании. Используемый алгоритм представлен на рис. 3.19.

Глава 4: Анализ результатов исследования

4.1. Метод определения подходящих сроков сева

Результат анализа представлен ниже для каждого использованного метода, затем из трех методов был выведен специальный результат.

На основе опроса: Общее распределение ответов участников относительно сроков проведения каждого вида сельскохозяйственной деятельности, рассмотренного в опросе, суммировано в рисунок 4.1.

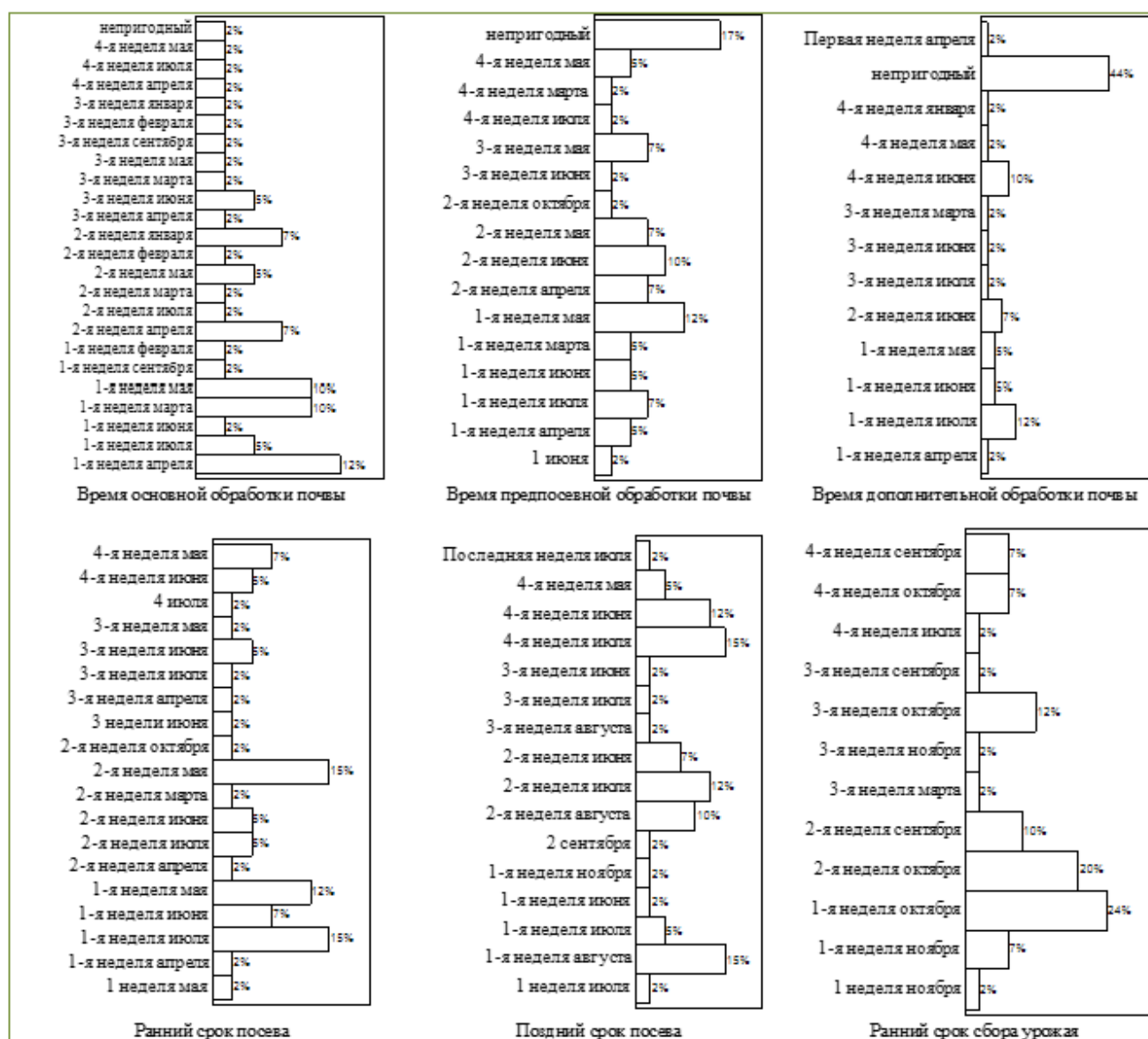


Рисунок 4.1 Распределение ответов участников относительно сроков проведения каждого вида сельскохозяйственной деятельности, рассмотренного в опросе.

Рассмотрев каждый ответ, суммарный график сельскохозяйственных работ представлен в рисунок 4.2. Это время характерно для основных культур, выращиваемых в каждой зоне страны — пшеницы и ячменя в центральных (Маекель), южных (Дебуб) высокогорьях и частях региона Ансэба, а также сорго в регионе Гаш-Барк.

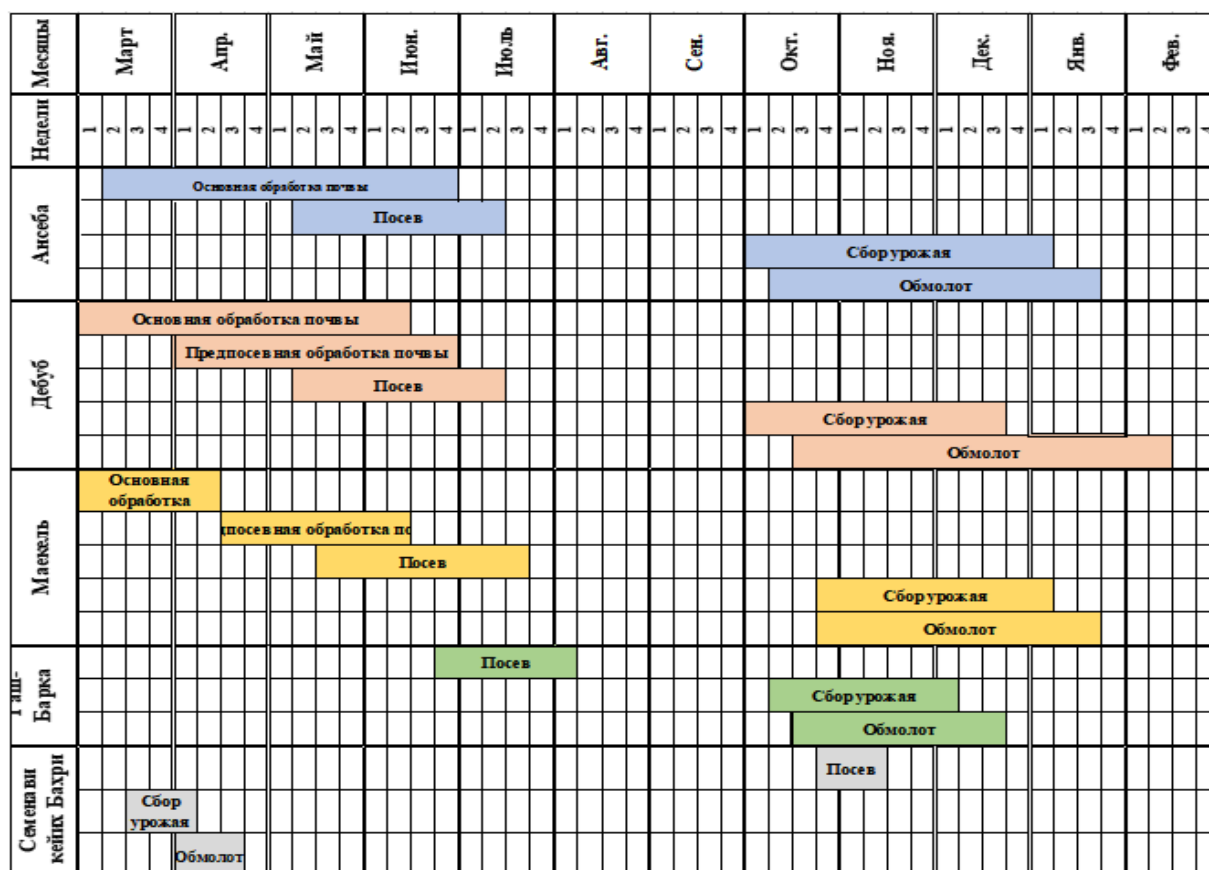


Рисунок 4.2 Календарь посевов основных сельскохозяйственных культур на основе анализа проведенных обследований

На основе информации, полученной от министерства сельского хозяйства: на основании данных (календаря посевов) основные культуры, полученные (без изменений) из отдела агрономии Министерства сельского хозяйства, технического сервиса, представлены в рисунок 4.3.

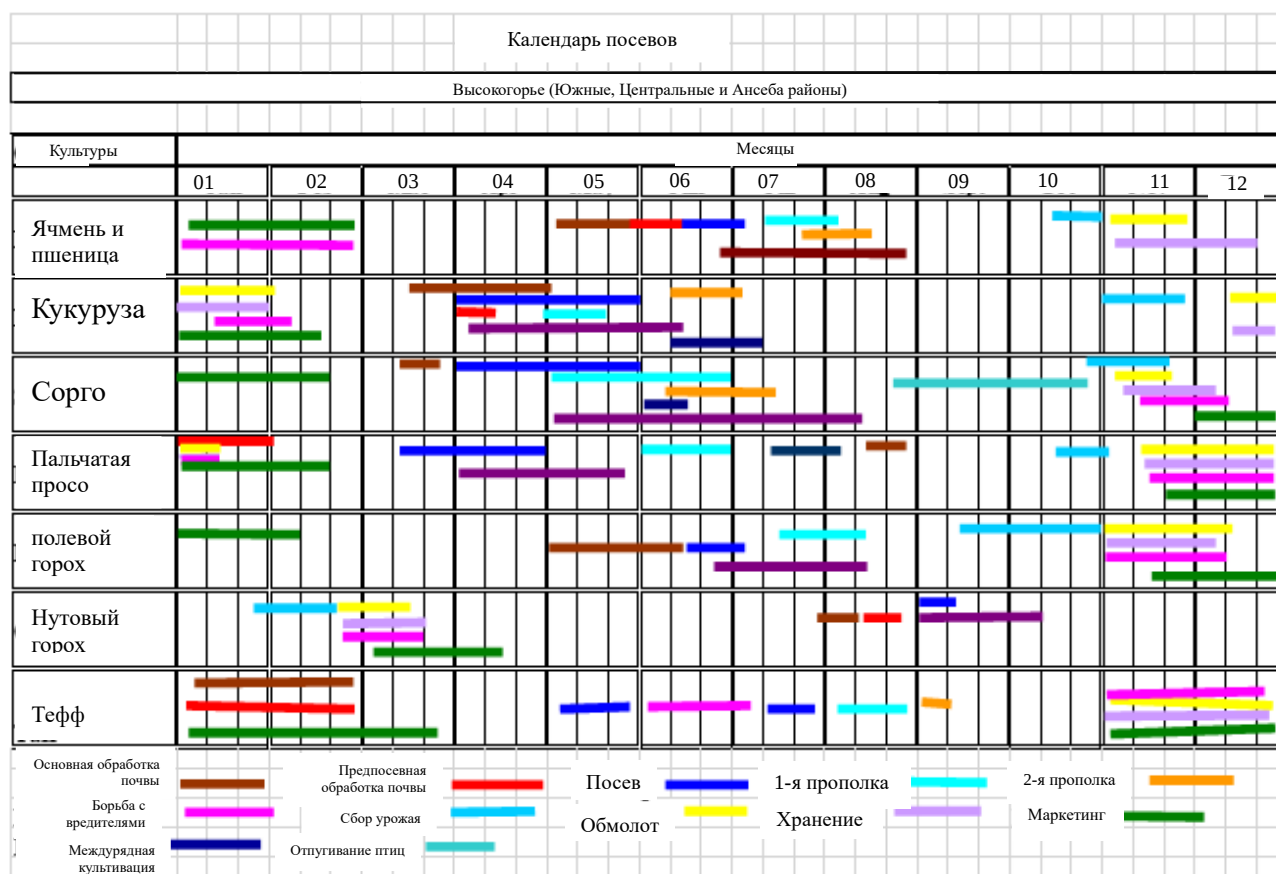


Рисунок 4.3 Календарь посевов основных культур получен (без изменений) из отдела агрономии Министерства сельского хозяйства, отдела технической службы.

На основе ежемесячного распределения осадков: Распределение осадков в каждой зоне страны показано на рисунке 1.10, где показано среднее количество осадков (мм), с которым сравнивалось минимальное количество осадков, необходимое для прорастания семян, и количество дней, необходимых для успешного выращивания культуры, и которое использовалось для определения подходящей температуры. диапазон времени для выполнения необходимых операций на ферме.

Определение даты посева по вероятности превышения нормы осадков. В таблице 4.1 приведена превышенная вероятность выпадения осадков не менее чем на 10 мм в месяц. Исходя из этой вероятности, наименьшая вероятность выпадения осадков на обеих станциях приходится на июнь.

В Адигуададе в первом декаде июня вероятность выпадения суммарного количества осадков не менее 10 мм составляет всего 25%, во втором декаде - 36%,

а в третьем декаде июня - 50%. В Халхале существует нулевая вероятность выпадения не менее 10 мм суммарных осадков в первом декаде июня, 38,5% - во втором декаде и 69,2 % - в третьем декаде июня.

Таблица 4.1 Превышение вероятности выпадения не менее 10 мм осадков в декаде

	Вероятность превышения нормы осадков на декады	Месяцы				Общий
		Май	Июнь	Июль	Август	
Адигуадад	РЕ %	54.3	36.1	68	62.5	62
Халхале	РЕ %	41	35.9	79.5	0.0	61.2

Таким образом, исходя из этого, лучшим декадом для посева пшеницы является июнь, а в июне наиболее подходящим является последний декад. При посеве в мае или начале июня всходы подвергаются более длительному засушливому периоду. С другой стороны, при посеве в июле вероятность хорошего рабочего дня значительно снижается из-за большей интенсивности осадков и особенностей почвы. Использование посевных машин может быть ограничено или значительно сокращено.

Определение даты посева по истории осадков: на основе минимального количества осадков, необходимого для прорастания пшеницы (20 мм [41]) в горной местности Эритреи, учитывая 105 – 115 дней [26] до созревания, пшеницу следует сеять поздно, к 15 июня. Исторические осадки указывают на то, что необходимое количество влаги удовлетворяется в апреле и мае; однако, из исторического опыта и истории осадков вытекают две проблемы. Во-первых, количество осадков в июне может быть недостаточным для роста сельскохозяйственных культур на критической стадии, а осадки в этом месяце очень нерегулярны; во-вторых, посевы, посеянные в этом месяце, готовы к уборке в августе и начале сентября, которые являются центром лета в стране, потери урожая будут очень высокими. Но кукурузу и сорго можно сеять в эти месяцы. С другой стороны, сорго в низинах Эритреи, например, Гаш-Барка, самая поздняя возможная дата посева, учитывая 90-120 дней созревания, приходится на начало 1 июля.

Корпорация по выращиванию и животноводству Эритреи (ECLC) находится

на ферме Халхале в 39 км к югу от Асмэры. Эта корпорация имеет две фермы по производству пшеницы в горной местности, фермы Целот- Целот-Ади'Гуаэдад и Халхале . Ферма Целот-Ади'Гуаэдад находится примерно в 11 км к югу от Асмэры по пути в Халхале , следовательно, эти две фермы находятся на расстоянии около 28 км друг от друга. В этом разделе будут определены подходящие даты посева с использованием исторических данных по количеству осадков.

Ферма Целот-Адигуэдад: Для удобства визуализации данные по осадкам за декады были сгруппированы в четыре группы (1999–2004; 2005–2010; 2011–2016 и 2017–2022 рисунки (рисунок 4.4, 4.5, и 4.6,).

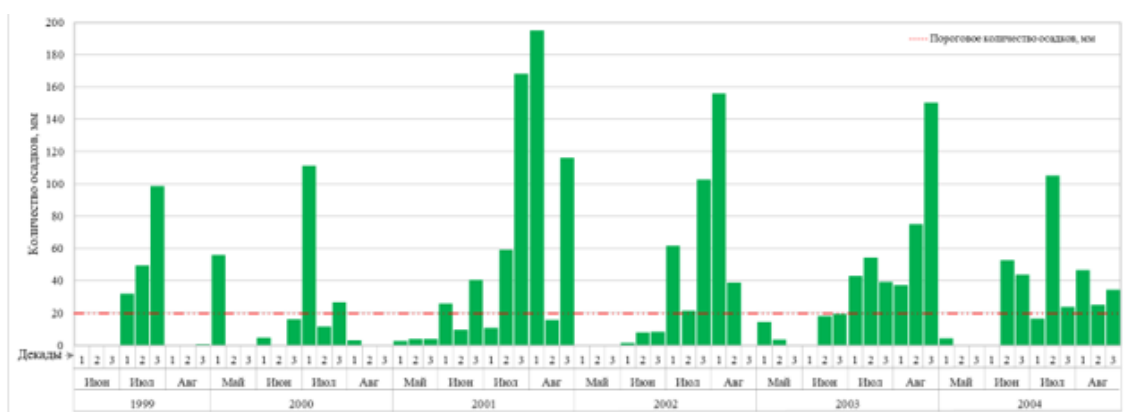


Рисунок 4.4 Декадное обобщение данных о суточных осадках за 1999–2004 гг

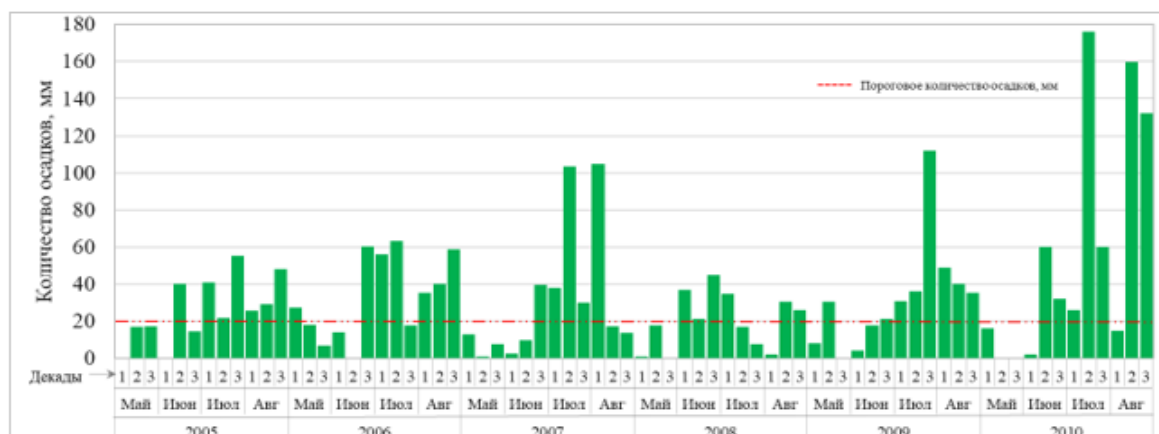


Рисунок 4.5 Декадное обобщение данных о суточных осадках за 2005–2010 гг

Как указано выше, средний вегетационный период пшеницы составляет 105 для Эритрейского нагорья, но как корпорация не рекомендуется заниматься традиционным земледелием (без эффективного планирования). Как указано выше, также осадки не являются постоянными и 100% предсказуемыми; они могут

начаться рано и в мае, как на рисунках выше, а засушливые периоды могут иногда следовать в июне и июле.

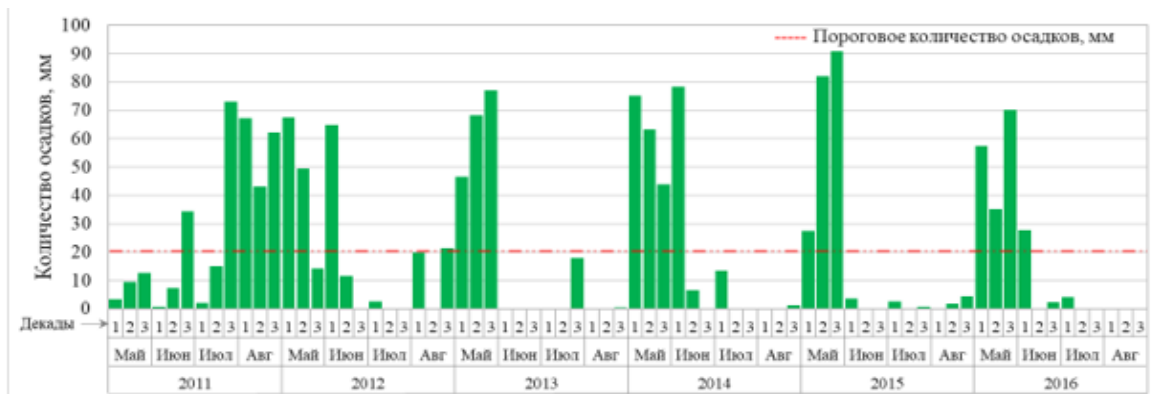


Рисунок 4.6 Декадное обобщение данных о суточных осадках за 2011–2016 годы

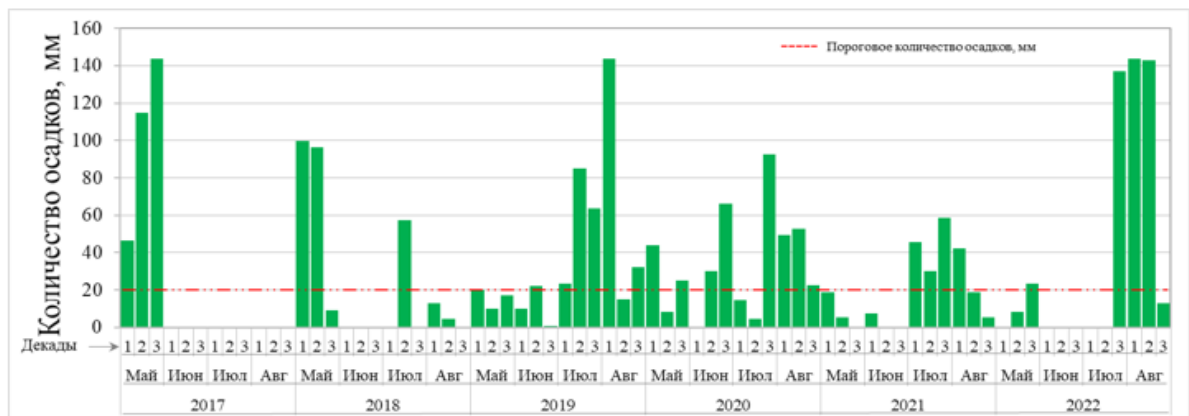


Рисунок 4.7 Декадное обобщение данных о суточных осадках за 2017–2022 годы

На основании рисунков выше (рисунки 4.5 через 4.8) например, в 26,4% декад мая выпадает более 20 мм осадков и в 27,5% — более или равно 10 мм; аналогично, в июне выпадает 27,7% более или равно 20 мм и в 38,9% более или равно 10 мм осадков. Ни один из этих факторов не может гарантировать выживание посеянных саженцев. С другой стороны, посев до середины июня несет риск дождя в сентябре, который может произойти после созревания зерен (когда осадки не требуются); в противном случае риск потери зерна обычно высок. И наоборот, как это часто бывает, ожидая до середины июля, операции могут столкнуться с двумя конечными потерями производства. Во-первых, осадки, скорее всего, будут продолжаться с высокой частотой и интенсивностью. Из-за глинистой почвы, плохого дренажа и низкой инфильтрации посевные работы затруднены, что приводит к плохому качеству работы, задержке работы или полному прекращению

посева в течение всего месяца. Все это приведет к частичной или полной потере производства. Во-вторых, раннее отступление вегетационного периода в большинстве случаев подвергает риску урожай.

Поэтому обычно менее рискованно, если посевная операция завершена до первой декады июля (первая декада 50% вероятности осадков больше порогового значения или 67% больше 10 мм (рисунки 4-21 через 4-24).

Как ясно видно на рисунке, за посевом в мае последует засуха в июне. Однако посев между началом второй декады июня и концом последней декады июня подходит для посева по двум причинам. Во-первых, почва не слишком сухая и не слишком влажная, что делает ее пригодной для посевных работ. Во-вторых, в июле выпало много осадков (значительно выше порогового значения) — меньше риск засухи. Поэтому наилучшая дата посева — 25 июня.

ферма Халхале: на рисунках ниже представлены исторические данные о количестве осадков халяль, разделенные по декадам, сгруппированные по 3 для удобства и усреднения, с использованием тех же методов.

На основе анализа отдельных лет для определения оптимальных дат посева было установлено, что примерно в 61,5% лет было зафиксировано менее 20 мм осадков во второй декаде июня. За этим обычно следовало последовательное накопление осадков, превышающее 20 мм в последующие декады (Рисунок 4.10 – 4.12). Из этого можно сделать следующие выводы:

Во-первых, из-за глинистой природы почвы посев сразу после дождя вызывает трудности; поэтому распространенной практикой является посев в относительно сухие периоды, когда почва менее насыщена влагой. Следовательно, меньшее количество осадков во второй декаде июня благоприятствует посевным работам.

Во-вторых, эти засушливые периоды сменяются постоянными осадками, что имеет решающее значение для обеспечения нормального прорастания семян и предотвращения дефицита влаги в последующие декады. Такая схема способствует здоровому укоренению и росту урожая, в конечном итоге способствуя успешным сельскохозяйственным результатам.

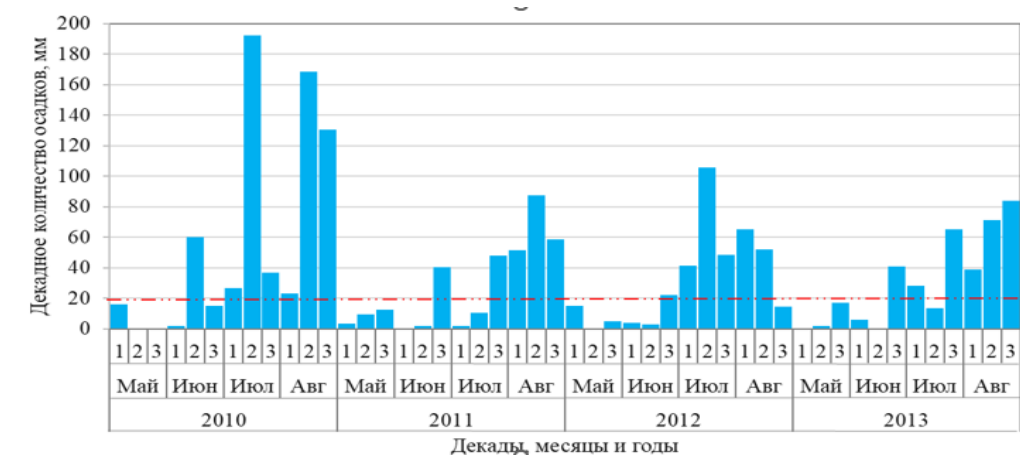


Рисунок 4.8 Декадное обобщение данных о суточных осадках за 2010–2013 гг.

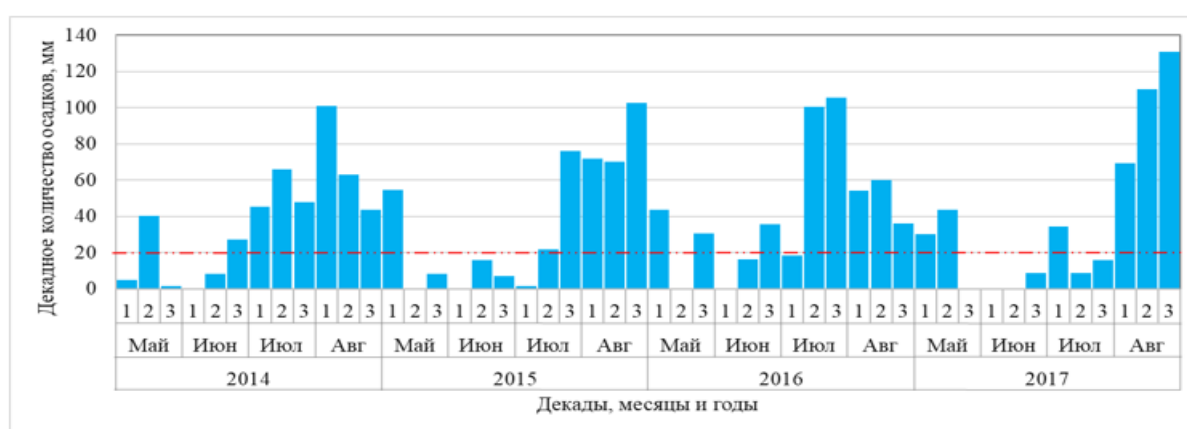


Рисунок 4.9 Декадное обобщение данных о суточных осадках за 2014–2017 годы

Примерно у 15,4% засуха пришлась на период с 3-й декады июня по 1-ю декаду июля, а у 7,7% засуха наблюдалась между 1-й и 2-й декадами июля, а в 2022 году (7,7%) засуха наблюдалась с мая до конца 2-й декады июня, за которой последовала декада с осадками более 20 мм в 3-й декаде, а затем засуха в течение двух последующих декад.

Вероятно, что вторая декада июня представляет собой оптимальное время для посева на ферме Халхале. Это в первую очередь потому, что количество осадков в этот период не чрезмерно низкое (с кумулятивным декадным количеством осадков, превышающим 10 мм) и сопровождается достаточным накоплением осадков в последующие декады.

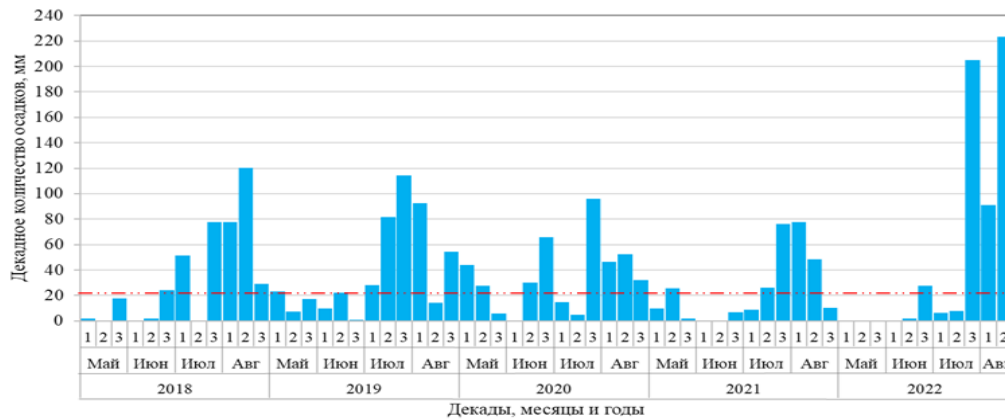


Рисунок 4.10 Декадное обобщение данных о суточных осадках за 2018–2022 годы

Исходя из анализа количества осадков по годам и средних значений по декадам, рекомендуется начинать посев не ранее начала второй декады июня, чтобы сократить продолжительность засушливых периодов после посева и тем самым минимизировать риск плохой всхожести. И наоборот, в идеале посев должен быть завершен до конца третьей декады июня, чтобы свести к минимуму риск задержек, вызванных продолжительными дождями в последующие декады. Поэтому оптимальная дата посева - середина июня.

4.2. Анализ хронометражных наблюдений за работой машинно-тракторных агрегатов

Предпосевная обработка почвы: Эритрейская корпорация растениеводства и животноводства (ECLC) использовала дисковые бороны Gamatechnik maszyny rolnicze (рис. 4.11) спецификации: Тип – T430, количество борон – 24, рабочая ширина 3,0 м, потребляемая мощность – 150 л.с., вес – 1700 кг. Полевой наблюдательный эксперимент был проведен 3 июля 2023 года на ферме Целот, Эритрея, с использованием трех тракторов, оснащенных оборудованием указанного типа (T430), при выполнении операций предпосевной обработки почвы. Отчет о наблюдении состоял из записей учета времени, скорости операций, пройденной площади и количества потребленного топлива. Краткое описание совокупных рабочих параметров оборудования приведено ниже с использованием уравнения (6.3)

Исследование проводилось во время предпосевных работ на пшеничном поле

в начале июля и во время предпосевных работ, которые проводились в начале сентября 2023 года. Наблюдение, проведенное в июле, проводилось в течение одного дня для трех тракторов, оснащенных орудием типа Т430, тогда как те же орудия были установлены на двух тракторах Newholland Т6090 и двух Newholland Т6050 в течение четырех дней.



А



В

Рисунок 4.11 Дисковые бороны GamaTechnik 22 в действии 06 сентября 2023 года.

По хронометражным данным определялись: общая площадь обработанная за смену (га), время, основной работы T_p (ч), технологическое время T_{tex} (ч); время смены T_{cm} (ч); производительность за 1 час основного времени (W_{oi} га/ч), технологического времени за смен W_{tex} ; коэффициент использования технологического времени K_{tex} и использования сменного времени K_{cm} для трех МТА, наблюдавшихся в июле (Таблица 4.2) и четыре МТА, наблюдавшиеся в сентябре (Таблица 4.3). представлены в указанных таблицах соответственно.

Как видно из рисунка 4.12, коэффициент использования сменного времени (K_{cm}) значительно ниже, в частности из-за большого простоя во время работы. Из-за технических проблем Т6090 (А) не использовался на третий день.

Поскольку работа проводилась в сентябре при относительно более высокой влажности, а конструкция орудия не включает скребки для удаления почва, налипающей на диски (рис. 4.11– А), очистка производилась вручную. Ежедневно для этой задачи был назначен отдельный человек. Почва глинистая и известна своими очень липкими свойствами, которые в таких ситуациях, как в рисунке 4.11 (А) потребуется около пяти-десяти минут, чтобы очистить его от почвы, что является значительной потерей времени.

Таблица 4.2. Производительность Машинно-Тракторного Агрегата (МТА) и сопутствующие количества (июльские наблюдения)

МТА	Дата Июль 2023	Обработанная площадь (га)	T_p (ч)	$T_{тех}$ (ч)	$T_{см}$ (ч)	W_o , га/ч	$K_{тех}$	W_{mexi} , га/ч	$K_{см}$	$W_{см}$, га/ч	Расход топлива (л/смена)	Расход топлива (л/га)
T6090 (M)	03	20,5	5,97	7,94	9,4	3,4	0,8	2,6	0,63	2,2	105,2	5,1
T6050 (M)	03	16,42	5,81	8,19	10,0	2,8	0,7	2,0	0,58	1,6	98,6	6,0
T6050 (W)	03	17,11	5,68	8,08	9,9	3,0	0,7	2,1	0,57	1,7	102,7	6,0

Таблица 4.3. Производительность машинно-тракторного агрегата (МТА) и сопутствующие количества (сентябрьские наблюдения)

МТА	Дата Сентя брь 2023	Обработанн ая площадь (га)	$\bar{v}_p$ км/ч	T_p (ч)	$T_{тех}$ (ч)	$T_{см}$ (ч)	W_o , га/ч	$K_{тех}$	$W_{тех}$, га/ч	$K_{см}$	$W_{смi}$, га/ч	Расход топлива (л/смена)	Расход топлива (л/га)
Т6090 (М)	06	13,21										114	8,63
	07	7,80	13,68	2,74	9,25	10,8	4,8	0,3	1,4	0,3	1,2	91	11,67
	08	5,48	12,49	3,38	9,73	10,8	2,3	0,3	0,8	0,3	0,7	113	20,61
	09	8,07	12,80	2,92	8,58	10,3	1,9	0,3	0,6	0,3	0,5	102	12,63
	10	6,91	9,05	3,61	8,48	9,8	2,2	0,4	1,0	0,4	0,8	98,8	14,3
Средний		8,3	12,0	3,2	9,0	10,4	2,8	0,4	1,0	0,3	0,8	103,76	13,57
Т6050 (М)	06	9,59										93,4	9,74
	07	8,14	10,12	4,69	9,72	10,8	1,5	0,5	0,7	0,4	0,6	77,6	9,54
	08	5,57	7,70	4,97	9,76	10,8	1,9	0,5	1,0	0,5	0,9	81	14,53
	09	7,05	8,68	3,69	8,07	8,7	2,2	0,5	1,0	0,4	0,9	63	8,93
	10	5,87	7,31	3,78	7,33	9,8	1,5	0,5	0,8	0,4	0,6	64,6	11,01
Средний		7,24	8,5	4,3	8,7	10,0	1,8	0,5	0,9	0,4	0,8	75,92	10,75
Т6050 (Вг)	06	9,54										77	8,07
	07	3,89	9,17	2,66	8,22	9,4	2,7	0,5	0,9	0,3	0,7	46	11,84
	08	5,46	9,26	4,84	9,83	10,9	1,2	0,5	0,6	0,4	0,5	117	21,44
	09	7,54	9,21	4,46	8,61	9,6	2,1	0,5	1,1	0,5	1,0	100	13,26
	10	6,37	7,04	4,20	9,17	9,9	0,9	0,5	0,4	0,4	0,4	86	13,5
Средний		6,6	8,7	4,0	9,0	9,9	1,7	0,4	0,7	0,4	0,7	85,2	13,62
Т6090 (А)	06	14,00											
	07	7,47	12,87	3,31	9,76	10,9	1,7	0,4	0,6	0,3	0,5	119	8,5
	08	2,74	12,06	2,07	5,00	10,7	3,6	0,4	1,5	0,2	0,7	86	11,51
	09	7,45	12,40	3,12	8,35	10,4	2,0	0,4	0,8	0,3	0,6	87	31,74
Средний		7,92	12,4	2,8	7,7	10,7	2,4	0,4	0,9	0,3	0,6	145	19,47

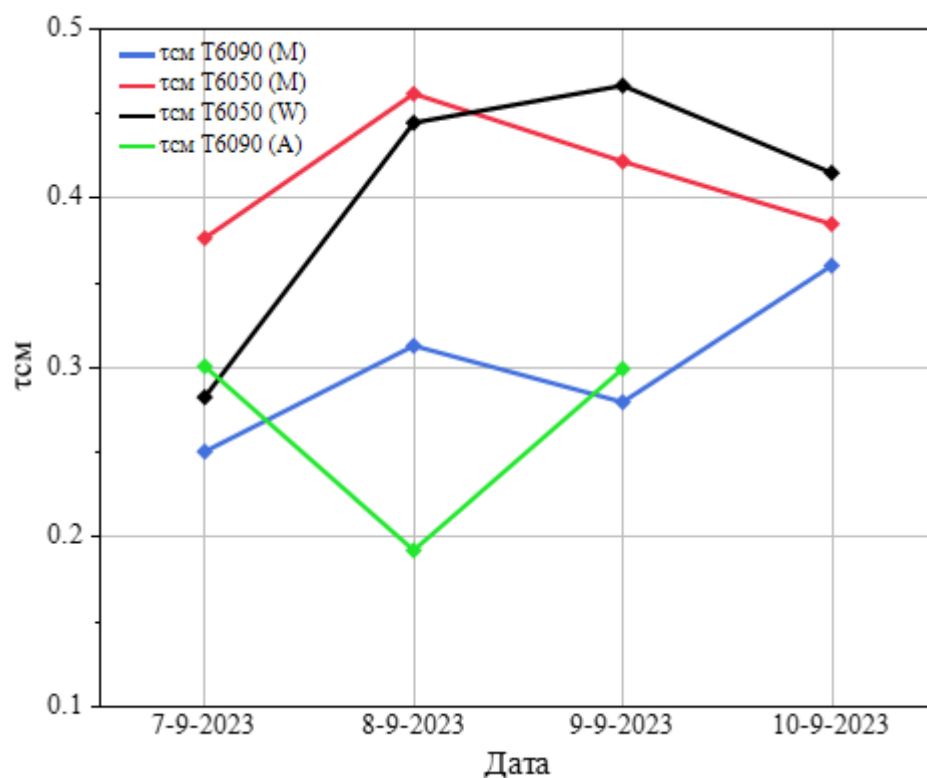


Рисунок 4.12 Коэффициент использования сменного времени – $K_{см}$



А



В

Рисунок 4.13 Почва налипла на орудие (А), а правая задняя шина спущена и отправлена на ремонт (В)

Общее время, затраченное на удаление почвы, а также продолжительность ремонта и технического обслуживания суммированы в Таблице 4.4 максимальные значения продолжительности удаления почвы Т6090 (М), Т6050 (М), Т6090 (W) и Т6090 (М) составили 2 часа (второй день), 2 часа (второй день), 2,2 часа (второй день) и 1,8 часа (третий день) соответственно. Вдобавок ко всему, на второй день Т6090 (М) потребовалось около 1,7 часа для регулировки, а задняя шина Т6050 (W)

была спущена в 12:49:40 в первый день наблюдения рисунке 4.11 – В, исправление которого заняло около 3,4 часов – в конечном итоге смена закончилась, и МТА не вернулась к работе в тот день. Общая сумма времени на удаление налипания и длительности ремонта и обслуживания приведена в Таблице 4.4. Значительная часть времени смены была потрачена на очистку от почвы, ремонт и техническое обслуживание от 11,8 до 46 %. Такое количество простоев значительно снизило производительность МТА.

Таблица 4.4. Сравнение времени простоя с общей продолжительностью смен МТА

МТА	T _{см} (ч)	Продолжительность остановок по удалению залипания(ч)	Время ремонта (ч)	Сумма (ч)	Сумма*100/T _{см} %
Т6090 (М)	10,8	1,7	0,0	1,7	15,7
	10,8	2,0	1,7	3,7	34,6
	10,3	1,6	0,0	1,6	15,7
	9,8	1,6	0,0	1,6	16,3
Т6050 (М)	10,8	1,7	0,3	2,1	19,2
	10,8	2,0	0,2	2,2	20,3
	8,7	1,0	0,0	1,0	11,8
	9,8	0,8	0,0	0,8	8,5
Т6050 (W)	9,4	0,9	3,4	4,3	46,0
	10,9	2,2	0,0	2,2	20,2
	9,6	1,3	0,0	1,3	13,1
	9,9	1,2	0,0	1,2	12,0
Т6090 (А)	10,9	1,7	0,1	1,8	16,6
	10,7	0,6	0,1	0,7	6,7
	10,4	1,8	0,0	1,8	17,1

Преимущества, которые могут быть достигнуты при простом изменении условий эксплуатации: во время предпосевных работ те же МТА показали значительные различия в своих показателях производительности из-за того, что они работали с разницей во времени примерно в три месяца. Первая операция, наблюдаемая в июле, проводилась на более сложной местности, на участках неправильной формы, крайне изменчивых размерах, и можно сказать, что это были участки незаконченного дизайна. Внутриполевых препятствий много, и изменчивость по размеру, форме и ориентации, а каменистость очень высока. Это

указывает на том, что если принять серьезные меры по улучшению конфигурации участка, то характеристики можно изменить и даже улучшить, приблизив их к идеальным пределам. Для большей ясности, МТА Т6090 (М), Т6050 (М) и Т6050 (W) работали с коэффициентом использования времени смены 0,63, 0,58 и 0,57 соответственно в июле; однако в сентябре они показали результаты 0,3, 0,4 и 0,4 соответственно, при этом участки имели более правильную форму, несмотря на относительно хорошую длину гона (около 400 м) и однородный рельеф.

Более того, работы, проведенные в сентябре, проходили примерно в 2 км от исходной точки (точка отправления на работу и прибытие после окончания смены), тогда как в июле расстояние составило более 10 км, более половины из которых проходило по дороге с интенсивным движением, где невозможно двигаться с максимально возможной скоростью. Это говорит о том, что та же машина должна была проехать на 16 км больше в июле по сравнению с сентябрем до места работы и обратно, что оставляет больше времени для полевых работ на ближайших участках. В июле почва была сухой, но в сентябре влажность почвы была очень высокой. Несмотря на все эти преимущества, тот же МТА показал худшие результаты на ближайших участках из-за разных преобладающих условий. Соотношение $K_{см}$ Т6090 (М), Т6050 (М) и Т6050 (W) за июль к сентябрю составило соответственно 2,1, 1,45 и 1,9. Если бы работы выполнялись в июле на тех же участках, что и сентябрьские, коэффициент использования времени смены был бы еще выше. Другими словами, минимальный $K_{см}$ трех МТА будет 0,63, 0,58 и 0,57 соответственно. Основной проблемой, которая снизила производительность МТА в сентябре, была высокая влажность почвы.

Обычно, при тех же погодных условиях, что и в июле, техника будет работать со скоростью не менее 12 км/ч, 8,5 км/ч и 8,7 км/ч, так как по всем показателям участки, обработанные в сентябре, гораздо более регулярны и пригодны для работы. Таким образом, производительность МТА буде $W_{см} (Т6090 (М)) = 0.1B_p v_p K_{см} = 0.1 * 2.4 * 12 * 0.63 = 1.8 \text{ ha/h}$ (фактическая ширина орудия составляет 3 м, и по выборке полевых измерений около 80% ширины было

эффективно использовано). по тому же расчету, $W_{\text{см}}(T6050(M)) = 1.2 \text{ ha/h}$ и . Поскольку это уравновесит более высокую эффективность ($K_{\text{см}}$) из-за преимуществ погодных условий и более низкую скорость из-за ограничений поля на участках, обрабатываемых в июле, по сравнению с участками, обрабатываемыми в сентябре, остальные вычисления будут использовать эти значения в качестве базовых.

$$W_{\text{см}}(T6050(W)) = 1.2 \text{ ha/h}$$

Наконец, чтобы прийти к выводу, производительность МТА была низкой из-за полевых барьеров и обстоятельств (например, погода), которые можно просто обработать в пределах возможностей ресурсов и систем управления корпорации. Главное — дать лицам, принимающим решения, знать, как работает их система, потому что у них нет такого рода оценки. Основная причина, по которой это исследование проводилось в их обычной операционной стратегии, заключалась в том, чтобы наглядно показать им факты производительности их системы.

Таблица 4.5. Краткое описание хронометража пневматической сеялки Nardi Dora, используемой для посева пшеницы

Даты испытаний (2023-07-)	$T_{\text{см}}$	W_{0i} га/ч	V_p км/ч	$\overline{V_p}$	$K_{\text{тех}}$	$W_{\text{тех}}$ га/ч	$K_{\text{см}}$	$W_{\text{см}i}$ га/ч	Засеяная площадь (га)	Потребленное топливо (л/га)
03	10,5 3	9,24	15,01	14,88	0,36	3,31	0,24	2,17	21,66	5,13
04	6,77	8,20	13,32	14,92	0,26	2,11	0,21	1,72	10,82	9,24
05	8,46	10,57	17,18	14,89	0,36	3,84	0,21	2,23	18,90	5,03
06	6,63	4,66	7,57	7,03	0,38	1,78	0,24	1,12	7,07	12,16
07	9,25	5,59	9,08	7,42	0,38	2,10	0,24	1,37	12,00	7,67
08	10,4 1	5,03	8,18	9,15	0,48	2,43	0,24	1,20	12,01	7,32
09	7,76	3,58	5,81	8,26	0,46	1,64	0,36	1,28	9,82	8,66
10	8,62	5,56	9,04	9,84	0,39	2,19	0,32	1,79	15,24	7,02
Avg.	8,55	6,55	10,65	10,8	0,38	2,42	0,26	1,61	13,44	7,11

На рисунке 4.14 показан коэффициент использования технологического и сменного времени, включая (А) и исключая (В) простои из-за крупных поломок.

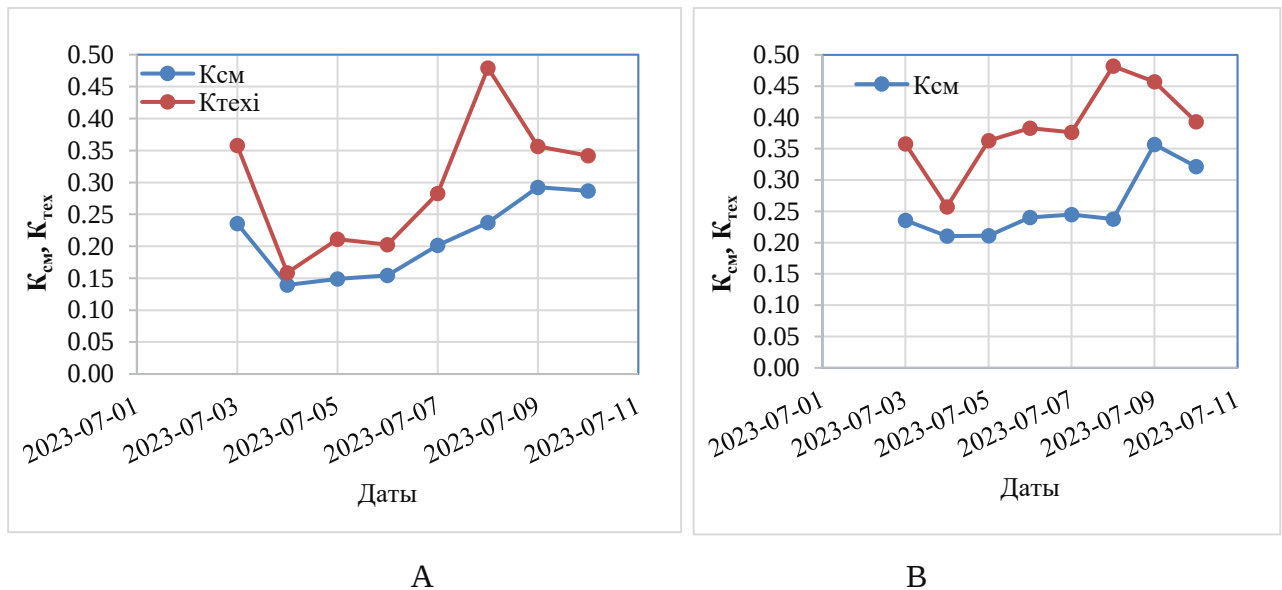


Рисунок 4.14 Коэффициент использования технологического и сменного времени, включая (А) и исключая (В) простои из-за крупных поломок

Коэффициенты использования технологического и сменного времени крайне низкие, что было вызвано несколькими условиями, которые препятствовали нормальной работе машинного подразделения. 04, 05, 06 и 07 июля машина столкнулась с крупными поломками, которые заняли значительное время дня на их устранение, а 9 и 10 июля был выполнен мелкий ремонт, который длился менее двух часов. Это составило 11 часов, 51 минуту и 47 секунд из общих 8 дней (если вычесть из общего времени, т. е.), что эквивалентно 13,34% времени смены или 17,76% общего полевого времени. Эти случаи указаны ниже.



Рисунок 4.15 Повреждение вентилятора в процессе работы



Рисунок 4.16 Передняя шина спущена во время операции



Рисунок 4.17 орудие демонтировано в ходе работы из-за наличия на поле небольшого дренажного канала, перпендикулярного направлению рабочих проходов.

Сравнение личного времени, затраченного на наблюдение, с нормативными значениями: операторы сельскохозяйственной техники [110] имеют право на определенные перерывы на отдых и прием пищи в зависимости от продолжительности смены [110]. Для смен продолжительностью 5 часов или менее право на перерывы не предусмотрено. Однако для смен продолжительностью более 5 часов, но менее 10 часов операторы имеют право, как минимум на один 30-минутный перерыв, который может быть разделен на два периода продолжительностью не менее 15 минут, если согласовано с работодателем [110]. Для смен продолжительностью 10 часов и более операторы имеют право на два 30-минутных перерыва. Работодатели обязаны предоставлять эти перерывы в течение первой половины смены, если только не возникнут непредвиденные обстоятельства. Более того, согласно [37], в течение 8-часового рабочего периода операторы получают два оплачиваемых 10-минутных перерыва на отдых и один неоплачиваемый 30-минутный перерыв на обед. Если работодатель налагает ограничения на деятельность во время перерывов, эти перерывы должны быть

оплачены.

В целом, хотя изложенные правила устанавливают минимальные стандарты для периодов отдыха и обеда, работодатели могут предлагать более длительные перерывы для улучшения благополучия сотрудников. Время, предусмотренное в соответствии со стандартом (время обеда и отдыха составляет 30 минут и 10 минут соответственно), а также время отдыха и обеда указаны в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Сравнение личного времени, затраченного во время наблюдения, с нормативными значениями [37, 49, 110].

Даты проведения операции (07.07.2023-)	T _{см}	Фактическое личное время	
		время обеда (мин)	время отдыха (мин)
03	10,53	16	35
04	6,77	0	0
05	8,46	61	10
06	6,63	0	0
07	9,25	0	8
08	10,41	56	98
09	7,76	0	0
10	8,62	9	0

Изменчивость периодов отдыха операторов значительна, три дня были отмечены нулевым отдыхом. Фактически, в эти дни, поскольку ремонт поврежденной детали машины занимал больше времени, эти периоды отдыха и приема пищи были включены в время ремонта. в первый и третий дни время отдыха операторов было превышено сверх нормы, а на шестой день время отдыха было исключительно большим (более 2 часов 30 минут).

Высокая изменчивость времени отдыха между днями работы, при этом в некоторые дни наблюдается значительно более продолжительное время отдыха, предполагает необходимость лучшего управления графиками работы для обеспечения соответствия стандартам отдыха. Эта непоследовательность объясняется тем, что система следует традиционным методам вместо того, чтобы придерживаться установленных стандартов. Решение этой проблемы имеет решающее значение для поддержания производительности оператора, поскольку адекватный отдых необходим для эффективной работы в таких ответственных

ролях, как управление сельскохозяйственной техникой. Однако также важно отметить, что слишком большое время отдыха может снизить производительность сельскохозяйственной техники. Внедрение стратегий, поощряющих более последовательные и регулярные перерывы, может повысить как удовлетворенность работников, так и эффективность работы.

Контрольный эксперимент: был проведен однодневный контрольный эксперимент для оценки того, могут ли управляемые операции превзойти обычные. Распределение времени, необходимого для выполнения рабочих проходов, и времени поворота МТА указано в рисунок 4.19. Было обнаружено, что модель нормального распределения наилучшим образом соответствует данным, а значения рабочего времени прохода были хорошо распределены вокруг среднего. Статистические параметры и параметры кривой нормального соответствия можно наблюдать из таблицы 4.11

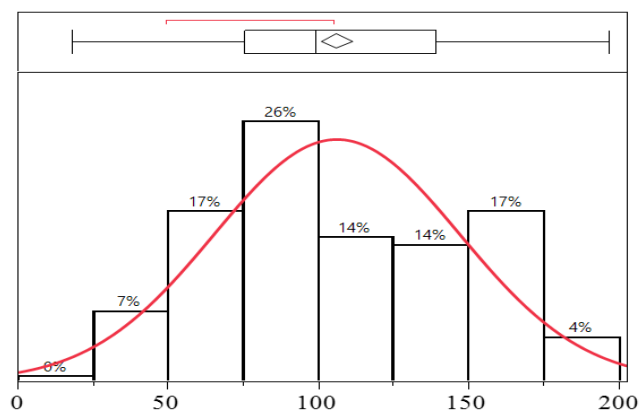


Рисунок 4.18 Распределение времени рабочего хода (сек), соответствующее кривой нормального распределения.

При наблюдении за средним значением и стандартным отклонением рабочее время прохода имело значительную вариацию. Узкий диапазон 95% доверительного интервала (101,38 и 111,39 секунд) для среднего значения и стандартного отклонения (40, 49 и 41,25 секунд) указывает на низкий уровень неопределенности в этих оценках. Кроме того, диапазон между максимальным и минимальным значениями довольно высок (Табл. 4.7); однако межквартильный размах охватывает диапазон от 75,5 до 139 секунд, демонстрируя умеренную изменчивость в центральных 50% данных.

Таблица 4.7. Сравнительная таблица статистических сводок, соответствующих нормальному распределению времени поворота

Статистическая сводка		Теоретическое нормальное распределение		
Статистика	Значение (секунды)	Параметр	Масштаб (мкм)	Форма (σ)
Иметь в виду	106,38	Оценивать	106,38	40,94
Стандартное отклонение	40,94	Стандартная ошибка	2,55	0,283
Стандартная ошибка среднего	2,55	Ниже 95%	101,4	40,4
Ниже 95% среднего	101,35	Верхние 95%	111,4	41,25
Верхний предел 95% среднего	111,41			
Минимум	18			
Максимум	197			
N (размер выборки)	257			

Высокая изменчивость (стандартное отклонение 41) указывает на то, что все еще были определенные факторы, которые были вне контроля исследователя и оператора, которых невозможно было избежать, такие как короткие повороты из-за препятствий на поле, непоследовательность оператора и другие полевые или личные факторы, которые затрудняют завершение одного прохода за более длительное время, чем в среднем. Этот случай может существенно снизить производительность полевых операций.

Для времени поворота данные по своей сути должны быть приближены вокруг среднего значения с приемлемыми исключениями, вызванными трудностями во время поворота, и согласуются с логнормальным распределением. Таким образом, логнормальное распределение захватил наборы данных времени поворота, за исключением выбросов более высоких значений, которые были вызваны примером сложных особенностей рельефа или наличием препятствий в точках поворота. На основе меры центральной тенденции среднее значение распределений времени поворота (21,36) и подобранное логнормальное масштабное распределение (когда среднее логнормального распределения (3,03) преобразуется в масштаб данных, оно эквивалентно 20,7) близки друг к другу, демонстрируя, что подобранная модель захватывает центральную тенденцию в логарифмическом пространстве (рис 4.19).

Параметр формы подогнанного логнормального распределения (σ) также показал умеренную изменчивость -соответствие исходному разбросу при применении обратно к нелогарифмической шкале. В целом, несмотря на наличие небольших отклонений из-за экстремальных значений, логнормальное распределение разумно представляет данные о времени поворота, охватывая как центральную тенденцию, так и изменчивость (рис 4.19).

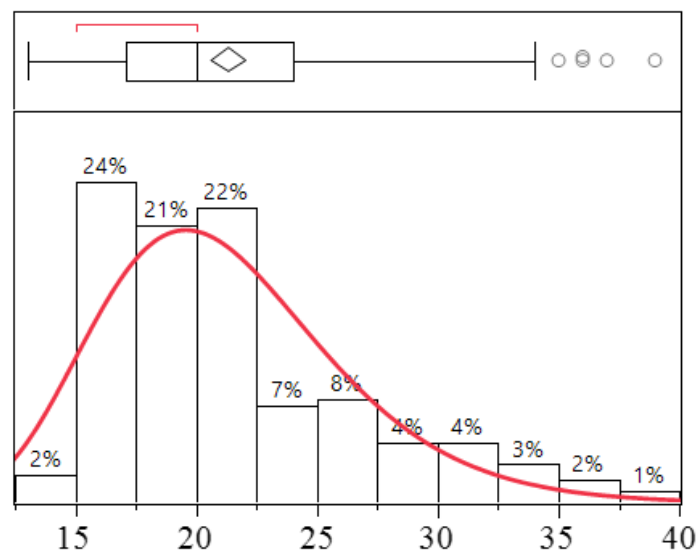


Рисунок 4.19 Распределение времени поворота (сек), соответствующее кривой нормального распределения.

Таблица 4.8. Сравнительная таблица статистических сводок, соответствующих нормальному распределению времени поворота

Статистическая сводка		Теоретическое логнормальное распределение		
Статистика	Ценить	Параметр	Масштаб (μ)	(Форма σ)
Иметь в виду	21.3	Оценивать	3.0293	0,2371
Стандартное отклонение	5.5	Стандартная ошибка	0,0151	0,0107
Стандартная ошибка среднего	0,35	Ниже 95%	2.9995	0,2176
Верхний предел 95% среднего	21.99	Верхние 95%	3.0591	0,2598
Ниже 95% среднего	20.61			
Минимум	13			
Максимум	42			
N (размер выборки)	245			

По мере проведения полевых экспериментов под руководством ведущего, те же показатели фиксировались и оценивались для контрольного эксперимента. Общая площадь, обработанная за одну смену продолжительностью 11 часов, 23

минуты и 17 секунд, составила 50,33 га. Чистая производительность W_0 МТА составила 6,48 га/ч. Поскольку $K_{см}$ был равен 0,68, производительность за смену ($W_{см}$) машины снизилась до 4,42 га/ч, а средняя рабочая скорость составила 10,8 км/ч. Количество израсходованного топлива составило 121 литр, что эквивалентно 2,4 л/га.

Наконец, был проведен t-тест для сравнения коэффициентов использования сменного времени ($K_{см}$) при контролируемой операции (0,68) и при традиционно контролируемой операции (табл. 4.2), который имел восьмидневное среднее значение 0,26. $K_{см}$ при контролируемой операции был значительно выше (более чем в 2,5 раза), чем при традиционной. t-статистика -22,27 и очень низкое р-значение 0,00 дают веские доказательства против нулевой гипотезы об отсутствии значимой разницы между двумя средними. Кроме того, 95% доверительный интервал $K_{см}$ для традиционно контролируемых операций варьировался от 0,22 до 0,3. Это исключает $K_{см}$ контрольного эксперимента (0,68) из диапазона, что дополнительно подтверждает вывод о том, что эффективность оборудования значительно ниже ожидаемой.

Таким образом, результаты свидетельствуют о том, что оборудование работало не так эффективно, как могло бы быть, и эта разница статистически значима. Кроме того, относительно хорошее значение $K_{см}$ на управляемой операции указывает на то, что при хорошем подходе к управлению можно было достичь более высокой производительности. Это привело меня к анализу причин основных простоев, и анализ подробно описан ниже.

Количество сэкономленного топлива: Средний расход топлива при 8-дневном посеве пшеницы составил 7,11 л/га, однако при однодневном контрольном варианте он составил 2,4 л/га. Исходя из этих результатов, с использованием простого математического расчета (деление разницы между двумя расходами топлива на 7,11 л/га), сокращение расхода топлива, в %, составило 66,2%.

Наконец, чтобы прийти к выводу, производительность МТА была низкой из-за полевых барьеров и обстоятельств (например, погода), которые можно просто обработать в пределах возможностей ресурсов и систем управления корпорации.

Главное — дать лицам, принимающим решения, знать, как работает их система, потому что у них нет такого рода оценки.

Таблица 4.9. Сводные данные о коэффициенте использования времени, производительности и расходе топлива за смену

Операция выполнена	Используемая техника New Holland серии T	$K_{см}$	$W_{см}$, га/ч	Расход топлива (л/га)
Предпосевная обработка почвы, проведенная в июле	T6090 (M) +T430	0,63	2,2	5,1
	T6050 (M) +T430	0,58	1,6	6,0
	T6050 (W) +T430	0,57	1,7	6,0
Предпосевная обработка почвы, проведенная в сентябре в течение 4 дней (средние значения)	T6090 (M) +T430	0,3	0,8	13,57
	T6050 (M) +T430	0,4	0,8	10,75
	T6050 (W) +T430	0,4	0,7	13,65
	T6090 (A) +T430	0,3	0,6	19,51
Посев 3-10 июля 2023 г.	T6090 (A) +ДОРА 600	0,26	1,61	7,11
Посев 11 июля 2023 г.	T6090 (A) +ДОРА 600	0,68	4,42	2,4

Основная причина, по которой это исследование проводилось в их обычной операционной стратегии, заключалась в том, чтобы наглядно показать им факты производительности их системы.

4.3. Влияние конфигурации поля на производительность МТА

Эффективность, продуктивность и средняя рабочая скорость, по-видимому, являются основными показателями для оценки эффективности МТА. Обычно η сеялки колеблется от 55 до 80% с идеальным значением 70% [5], а пределы v_p составляют 5, 8 и 12 км/ч. [5,18]. Значения η (%) и v_p (км/ч) находились в диапазоне 30–65,7% и 5,2–17 км/ч соответственно. Как правило, η намного ниже типичных диапазонов; 70% ниже нижнего предела диапазона, 30% между нижним и типичными значениями и ни одно значение не выше типичного значения.

Тест способности v_p оценивал способность v_p придерживаться приемлемых ограничений скорости. Для этого теста приемлемые ограничения скорости определяются LPS, целью и USL. Как показано на рис. 3, данные о скорости были проверены на предмет распределения способности, и модель логнормального распределения нашла наилучшую модель со значениями AIC, AIC Weight и BIC

121,3, 0,4 и 123, каждое по порядку. Среднее значение, стандартное отклонение и результат CV теста составили 10,32, 3,37 и 32,64% соответственно, что означает более высокую изменчивость v_p , которая могла способствовать снижению и вариации η и F_{eff} . Согласно уравнению 7, C_{pk} был равен 0,22, что указывает на то, что сеялка v_p была недостаточно хороша для оптимального соблюдения указанных ограничений, поскольку более низкое значение указывает на слабость процесса [88]. У v_p было 28% значений вне диапазона, с 2% ниже LSL и 26% выше USL. Кроме того, 83% v_p , которые превышают USL, что соответствует эффективности менее 45%; 10% меньше, чем указанный нижний предел эффективности. Это предполагает, что увеличение v_p в области выше USL сопровождалось серьезным снижением η .

Указанная сеялка имеет постоянную конструктивную ширину ($w = 6$ м), поэтому F_{eff} и v_p напрямую коррелируют (рис. 4), в связи с чем оба отрицательно коррелируют (рис. 4) с η ($R^2 = -0,48$), что свидетельствует о том, что по мере увеличения v_p η имеет тенденцию к снижению. Это говорит о том, что увеличение v_p приводит к снижению η производительности сеялки.

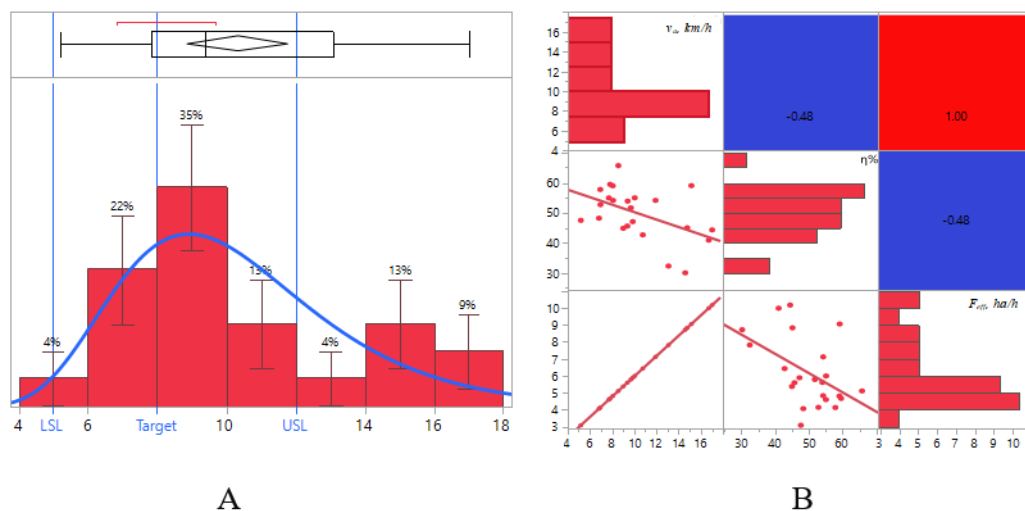


Рисунок 4.20 Распределение скорости и предельные значения спецификации (А), матрица корреляции длины участков, эффективности, эффективной пропускной способности и рабочей скорости (В)

Отрицательная корреляция является предупреждающим сигналом для операторов сеялок и менеджеров ферм о необходимости поддержания баланса между увеличением v_p и сохранением оптимального η . Поскольку, как указано на

рис. 3, более высокий v_p может повысить производительность сеялки, однако может привести к снижению η из-за таких проблем, как износ оборудования, снижение точности и повышенное потребление энергии. Понимание этой взаимосвязи может помочь операторам принимать обоснованные решения и корректировать эксплуатационные параметры для максимизации производительности при оптимизации эффективности. Повышенный расход топлива может привести к более высоким выбросам, что повлияет на экологическую устойчивость.

Таблица 4.10. Значение индексов отдельного поля

Поля	Показатели формы и размера				
	Выпуклость (I_{con})	Отношение периметра к площади (P/A)	Компактность (I_{com})	Квадратный периметр (I_{sp})	Прямоугольность (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	0,9	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(B + C)	0,65	0,04	0,17	0,46	0,5
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	0,7	0,59
P10.7	0,95	0,05	0,5	0,8	0,79
P11	0,63	0,02	0,29	0,61	0,52
P12.1	0,97	0,03	0,7	0,94	0,86
P12.2	0,9	0,02	0,5	0,8	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

Значения показателей, рассчитанные для каждого графика, представлены в

Таблице 4.10. Исходя из того, что наиболее подходящая модель характеризуется наименьшими значениями AIC и BIC и наибольшим весом AICс, модель с $AIC = 167,96$, $BIC = 169,63$ и весом $AICс = 0,25$ была определена как наиболее подходящая. Было установлено, что наилучшей моделью является закон нормального распределения (рисунок 4).

Из таблиц анализа квантилей: наибольшее значение, первый квантиль, медиана, третий квантиль и минимальное равенство 65,74%, 55,04%, 51,71%, 44,91 и 30,1 соответственно. Из сводных статистических данных следует, что среднее значение, стандартное отклонение выше и ниже 95%, составляет соответственно 49,9, 8,62, 53,6 и 46,15.

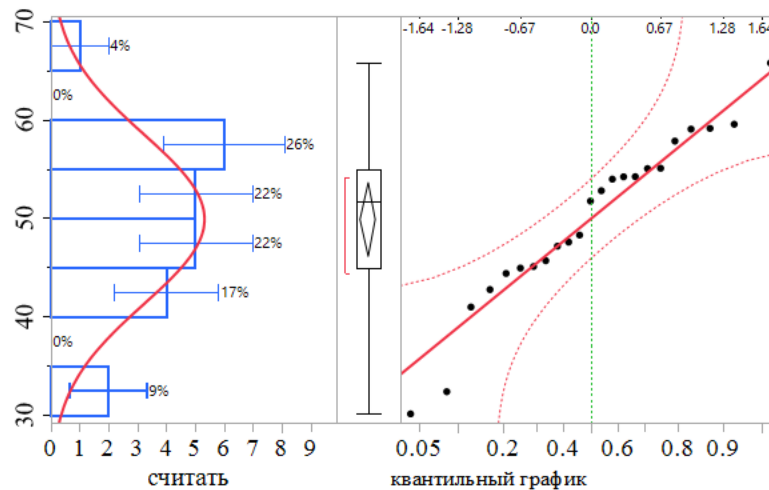


Рисунок 4.21 Распределение η (Нормальное распределение) и квантильный график

Диапазон между максимумом и минимумом довольно высок (35,64), а коэффициент вариации составляет 17,3%, что также относительно высоко, указывая на относительно высокую дисперсию η . Среднее значение составляет около 50%, что, с одной стороны, 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%.

Значения индексов, определенные для каждого поля, приведены в таблице 2, в то время как минимальные ограничивающие прямоугольники и выпуклые оболочки результатов ArcGIS приведены на рисунке 5.

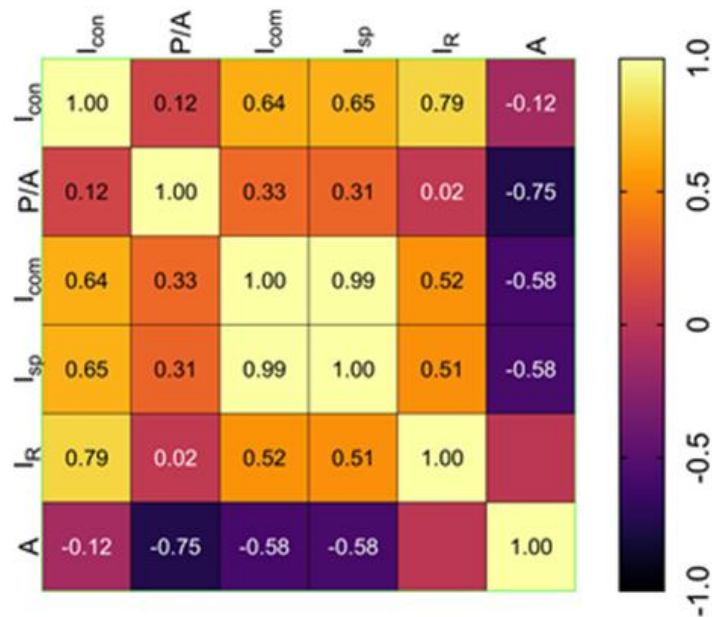


Рисунок 4.22 Корреляционная матрица показателей размера и формы.

По данным многомерного корреляционного анализа, I_{com} и I_{sp} высоко значимо (положительно) коррелировали (Пирсон $r = 0,99$), за ними следовали I_r и I_{con} ($r = 0,79$), I_{con} и I_{sp} ($r = 0,65$), и 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 некоррелированные.

Чтобы предотвратить столкновение модели с парадоксом мультиколлинеарности и обеспечить надежность коэффициентов, связанных с двумя сильно коррелирующими переменными, поскольку I_{com} очень сильно коррелирует с I_{sp} и поэтому исключается из дальнейшего анализа, в то время как другие индексы сохраняются. Подход двумерной регрессии использовался для оценки пяти индексов (I_{con} , P/A , I_{sp} , I_r и A), чтобы определить, какой индекс или индексы имели наиболее сильную корреляцию с η МТА.

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 η . Коэффициент детерминации был относительно выше ($R^2 = 0,79$), показывая, что факторы внесли значительный вклад в снижение производительности МТА (рис. 4.23). Уравнение

большой оси эллипса рассеивания представлено прямой $\eta\% = -37.037 + 105.07K_{об}$, а синяя пунктирная линия представляет эллипс плотности 90%.

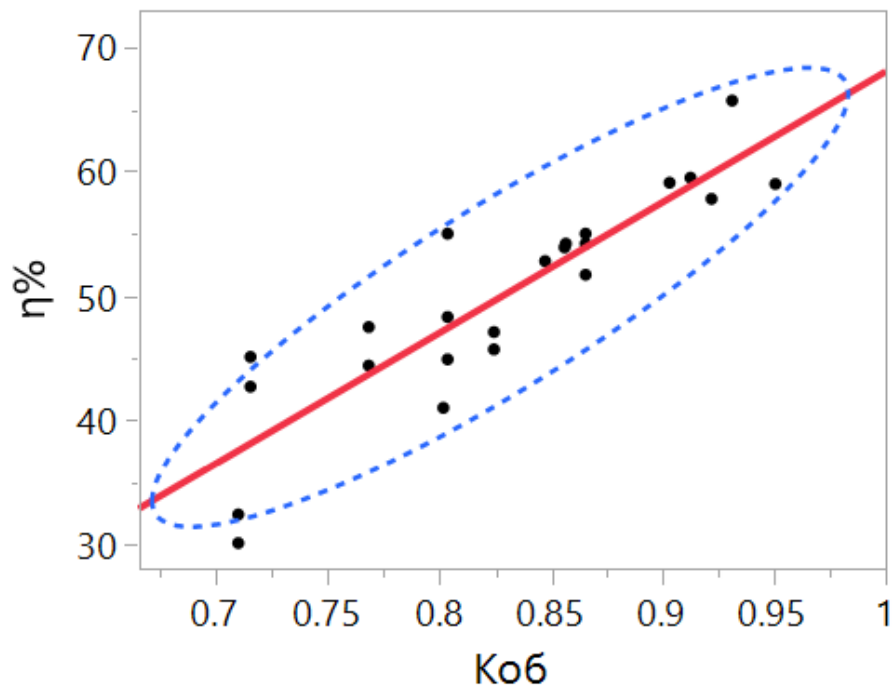


Рисунок 4.23 Корреляция между коэффициентом снижения эффективности ($K_{об}$) и η МТА

Кроме того, в этом разделе обсуждалась корреляция между индексами размера и формы и продуктивностью (F_{eff}), результаты которой представлены на рисунке 4.25. Р/А показал умеренно сильную корреляцию с F_{eff} , что указывает на 51% от F_{eff} , можно объяснить изменчивостью Р/А. F_{eff} снижался по мере того, как Р/А рос с уменьшающейся скоростью; более высокий Р/А указывает на более сложную и нерегулярную границу. Периметр выше для Полигоны с очень нерегулярными границами имеют более высокий периметр, что приводит к увеличению значения Р/А. Как показано на рис. 5, Р/А имеет самую высокую корреляцию, что означает, что этот индекс формы оказал наибольшее влияние на F_{eff} . Как показано на рис. 5, Р/А имеет самую высокую корреляцию, что означает, что этот индекс формы оказал наибольшее влияние на F_{eff} . Поскольку чем сложнее граничные условия, тем сложнее маневренность, что заставляет оператора предпочитать ехать медленнее и работать на переменных скоростях. Таким образом, более высокая сложность границ участка сопровождается относительно

более низкой производительностью сеялки.

Более того, коэффициент корреляции 0,41 иллюстрирует, что F_{eff} умеренно реагировал на изменчивость длины участков (длину серии). Ассоциация статистически значима, что означает умеренную ассоциацию, хотя только 41% изменения F_{eff} можно объяснить средней длиной участков, что предполагает, что связь недостаточно надежна, чтобы обещать идеальную связь. По мере увеличения средней длины участка F_{eff} также увеличивался с уменьшающейся скоростью.

Аналитически F_{eff} является произведением η , v_p и w , где v_p прямо пропорционален длине пробега участка. Исходя из этого соотношения, максимальная длина, как ожидается, приведет к максимальному F_{eff} ; однако, из-за разницы во времени простоя, более длинные участки не обязательно соответствуют более высокому F_{eff} . На практике, более длинные участки требуют меньшего количества поворотов, чем более короткие участки той же площади, которые, соответственно, в идеале, должны иметь более высокий η . Однако η , по-видимому, не коррелирует с длиной пробега. Это может быть связано с увеличением времени, необходимого для ремонта и осмотра на поворотных полосах, в результате многократной разборки функциональных компонентов сеялки, вызванной превышением v_p USL, что приводит к более высокой механической вибрации, особенно на относительно неровных участках.

F_{eff} также имел тенденцию к увеличению с ростом I_{con} и I_R и уменьшению с I_{com} и I_{sp} , хотя корреляции не были значительными. I_R , I_{con} , I_{com} , и I_{sp} более слабые отношения с F_{eff} рисунке 4.24, подразумевая более слабое влияние на производительность машины. Кроме того, превышение допустимого уровня выбросов на 26% свидетельствует о том, что сеялка часто эксплуатировалась за пределами допустимых пределов допустимого уровня выбросов, что могло привести к неоптимальной производительности и потенциальному снижению качества.

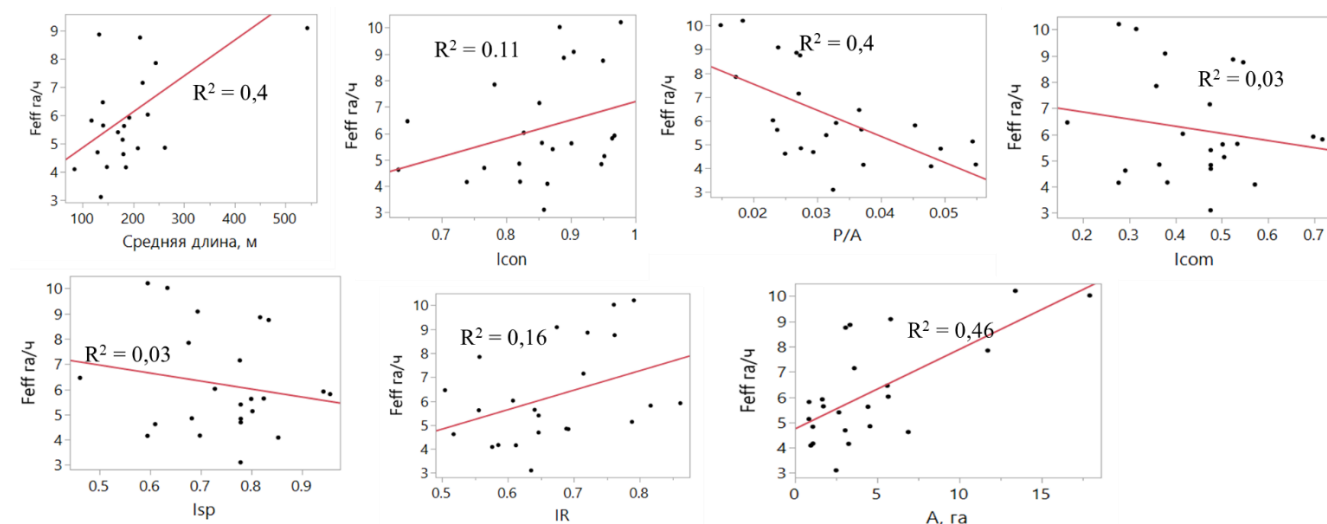


Рисунок 4.24 Корреляция между эффективной производительностью и индексами формы и размера.

Это может привести к 3-мерному размещению семян (вертикально под поверхностью почвы, горизонтально вдоль рядов и поперек полосы), имеющему изменчивость, которая может привести к различному воздействию влаги и температуры на семена, что приводит к различному прорастанию, и, следовательно, может возникнуть вариация плотности популяции растений. Аналогичные исследования также показали, что более высокие скорости вызывают проблемы с качеством работы и производительностью [38].

Анализ рельефа поверхности почвы.

Классификация текстуры почвы исследуемой области сделана в предыдущем разделе. Она показывает заражение или преобладание глины на одной стороне поля и преобладание суглинка на другой стороне. Несколько участков попали в несколько классов почв, в то время как другие попали только в один класс.

Несмотря на различия в структуре почвы, каменистости и влагоемкости, тип и количество обработок почвы перед посевом были одинаковыми. Участки предполагались однородными, а частота обработки, орудия и тракторы, используемые для обработки почвы во время предпосевных операций, были схожими. Рисунок 4.25 (а и б) были взяты из близко расположенных участков одного и того же поля, но демонстрируют различия в текстуре поверхности, в то время как те, что на рис. 6 (с и d), находятся на расстоянии нескольких сотен метров

друг от друга, демонстрируя различные классы почвы и различные отделки поверхности.

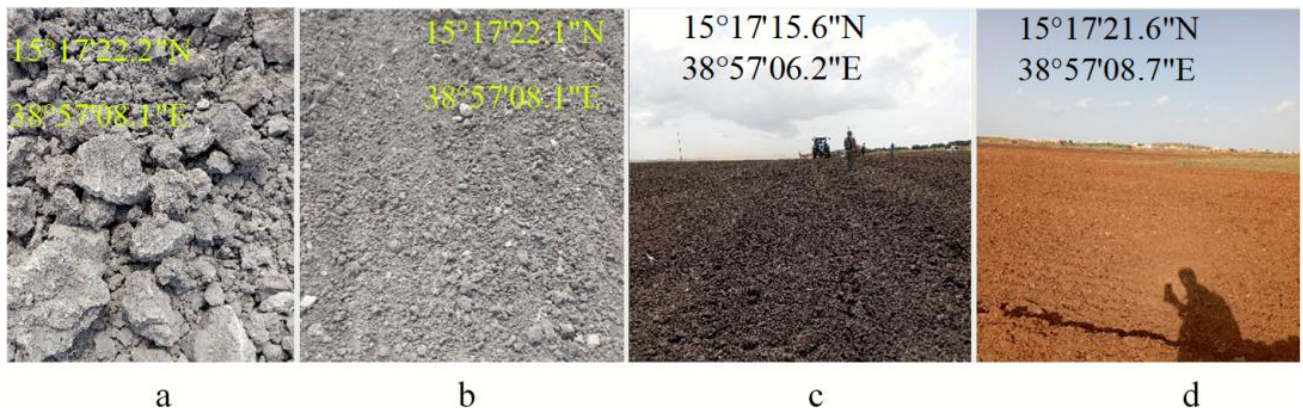


Рисунок 4.25 Участки полей с разной фактурой отделки (автор источника)

Для лучшей визуализации топографической изменчивости и неравномерности участков, разница высот поверхности и средних высот участка была нанесена на 3D-график на рисунке 4.26 с помощью программы Python. На этом Рис. показаны пики и надирь участков, которые сеялка прошла при выполнении операций. Как показано, участки совсем не плоские по рельефу, что потребовало от сеялки на некоторых участках частого подъема и спуска на короткие расстояния, в то время как другие участки имеют наклон, что может усложнить маневренность и наложить проблемы боковой неустойчивости на функциональные компоненты сеялки. Эти неудобства привели к снижению рабочей скорости, повлияли на F_{eff} и способствовали изменению производительности сеялки.

Более того, дренажные каналы различных порядков потоков также были дополнениями к осложнениям неровности. Участки 4, 6, 9, 10.1 и 11 пересекаются неглубокими естественными дренажными каналами потоков 2-го порядка, в то время как участки 2 и 13 пересекаются потоками 1-го порядка. Эти дренажные каналы добавили осложнений к топографии и запутали полевую работу (рис. 4.26), создавая проблемы маневренности и прилагая усилия для снижения и изменения скорости работы.

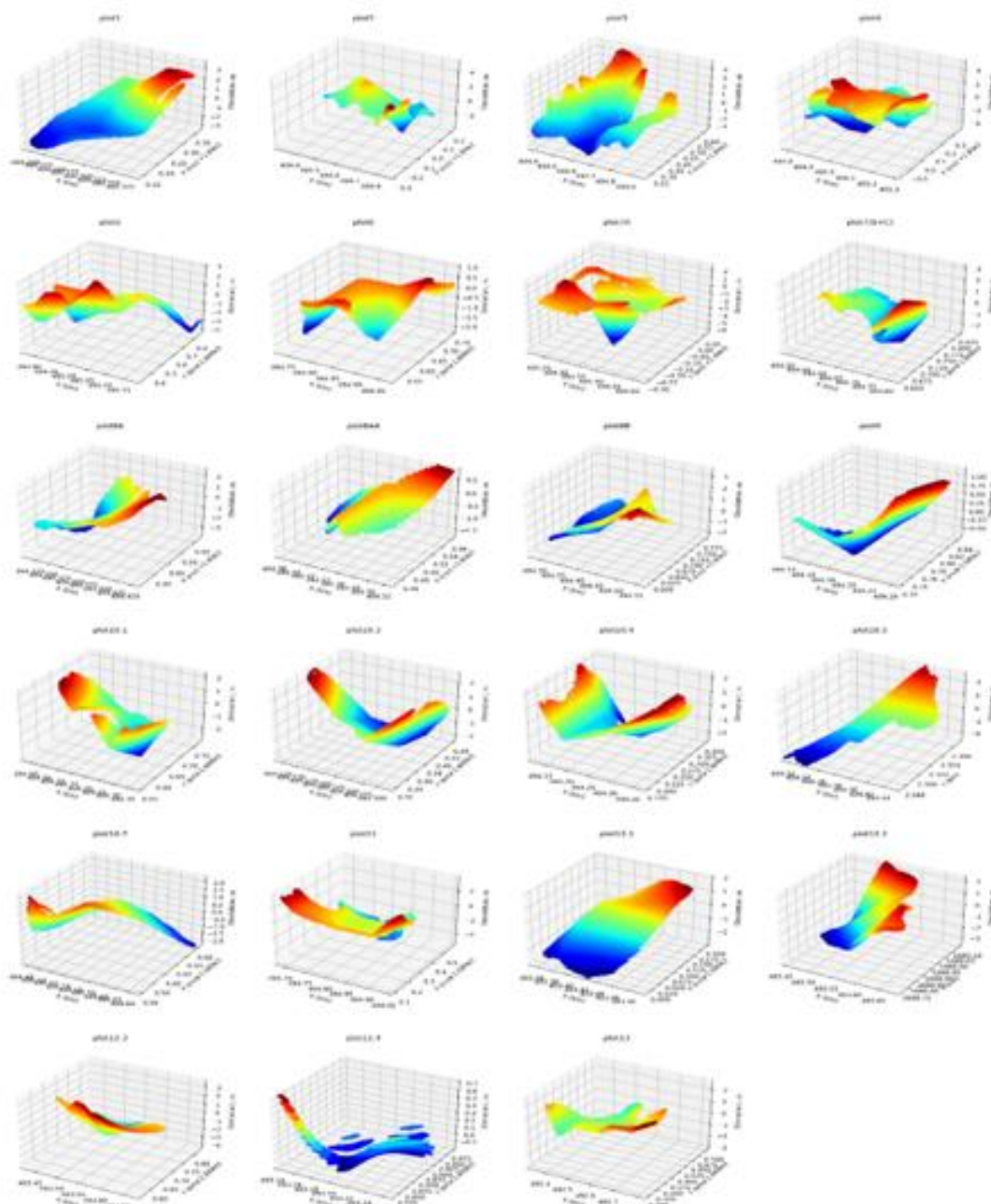


Рисунок 4.26 Топографические изменения и неровности участков, возникающие из-за отклонения высоты поверхности от средней высоты участка

Ориентация дренажных каналов естественным образом заложена таким образом, что сеялка должна пересекать их на значительно больших участках участка, через который они проходят. Это требовало от оператора частого переключения передач для регулирования скорости при приближении и удалении от каналов. Поэтому сеялка должна была замедляться при приближении к дренажным каналам и надирам или пикам, а затем ускоряться, что способствовало

изменению скорости и, следовательно, производительности.

Влияние участки микрорельефа на параметры производительности сеялки анализировалось с использованием стандартного отклонения высоты (σ_e) в качестве меры индекса неровности поверхности. На основании этого участки были классифицированы на 3 категории: высокая (самая высокая 25%), умеренная (средняя 50%) и низкая микрорельеф (самая низкая 25%) (Табл. 4.15).

В этом разделе анализ прошел два этапа: изначально тренд η анализировался по отношению к общим моделям участки микрорельефа. Затем проводился индивидуальный анализ категорий для сравнения η среди категорий участки микрорельефа и изучения тренда внутри каждой категории по отношению к участкам микрорельефа и v_a , аналитически. В этой части учитывались экстремальные значения v_a , т. е. выше USL, по отношению к значению σ в целом и более высокие значения σ_e в частности.

Общая тенденция η по отношению к целостным индексам участки микрорельефа изображена на рис. 8а. Поскольку участок 10.5 имеет небольшой размер (0,8 га), а η сеялки исключительно выше, чем вторая по величине η примерно на 7%, она исключена из анализа, приведенного на рис. 8а, для лучшей визуализации. η показала тенденцию к снижению по мере увеличения σ_e с коэффициентами корреляции 0,24. Это указывает на то, что η относительно слабо отреагировала на общую участки микрорельефа.

Для наглядности классифицированный микрорельеф поверхности почвы и соответствующие показатели эффективности представлены в таблице 4.15. Данные условно разделены на три группы: 25 % низкого, 50 % умеренного и 25 % высокого индекса рельефа.

Как показано в таблице 4.11, среднее значение $\eta\%$ уменьшалось по мере увеличения категории Неровность поверхности, т. е. среднее значение η для категорий низкой, средней и высокой Неровность поверхности составляло 51,9%, 49,6% и 48,2% соответственно.

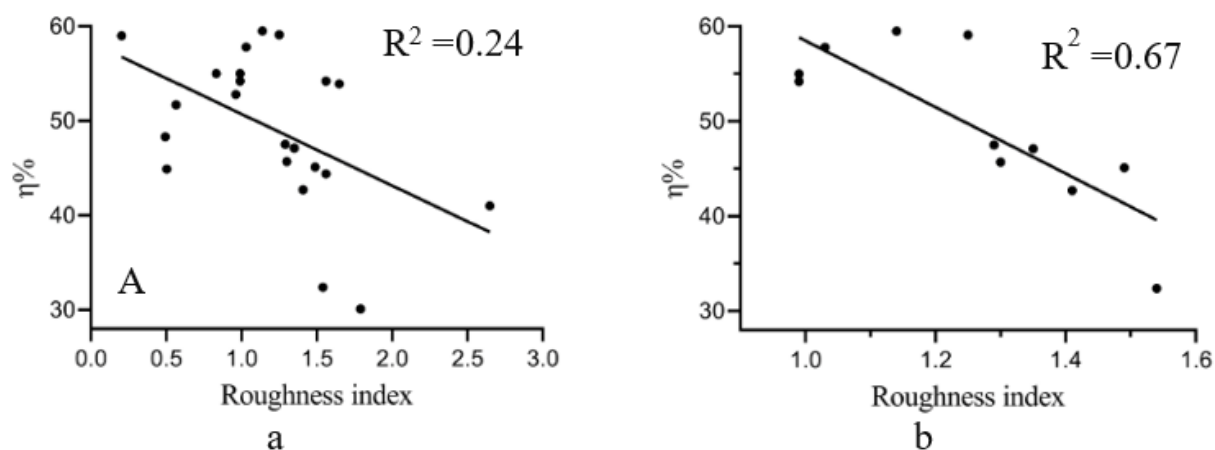


Рисунок 4.27 Зависимость между эффективностью (η) и σ_e для 22 участков (а) и для участков с умеренной неровностью поверхности почвы (b).

Низкая категория Неровность поверхности: v_p был в пределах допустимого предела на всех участках; похоже, что меньшая длина участков мешала оператору ускоряться так же быстро, как на более длинных участках. η показал слабую тенденцию с увеличением индекса Неровность поверхности (Табл. 4.11).

Таблица 4.11. Среднеквадратическое отклонение высоты (над средним уровнем моря) как мера индекса участки микрорельефа

Нижний индекс участки микрорельефа					Средний индекс участки микрорельефа					Высокий индекс участки микрорельефа				
Название участка*	σ_e	V_a (км/ч)	$\eta\%$	F_{eff} (га)	Название участка*	σ_e	V_a (км/ч)	$\eta\%$	F_{eff} (га)	Название участка*	σ_e	V_a (км/ч)	$\eta\%$	F_{eff} (га)
12.4	0,20	8,1	59,0	4,8	10,1	0,99	8,1	54,2	4,8	12,3	1,56	11,9	54,2	7,1
8A'	0,49	6,8	48,3	4,1	13	0,99	10,0	55,0	6,0	2	1,56	17	44,4	10,2
6	0,50	9,0	44,9	5,4	7A	1,03	6,9	57,8	4,2	11	1,65	9,4	53,9	5,6
9	0,57	9,7	51,7	5,8	10,3	1,14	7,8	59,5	4,7	1	1,79	14,6	30,1	8,8
10.7	0,83	7,7	55,0	4,6	5	1,25	15,1	59,1	9,1	10.5	2,44	8,6	65,7	5,1
10.4	0,96	6,9	52,8	4,2	8A	1,29	5,2	47,5	3,1	4	2,65	16,7	41	10
					12,2	1,30	9,4	45,7	5,6					
					12.1	1,35	9,9	47,1	5,9					
					7(B+C)	1,41	10,8	42,7	6,5					
					8B	1,49	14,8	45,1	8,9					
					3	1,54	13,1	32,4	7,8					
Среднее $\eta\% = 51,9$					Среднее $\eta\% = 49,6$					Среднее $\eta\% = 48,2$				

*столбец имени графика следует читать как участках, например, имя графика, указывающее 12.4, совпадает с участком 12.4.

Категория Неровность поверхности: средняя: поскольку эти данные представляют 50% от общего числа участков, для визуализации тенденции η с индексом Неровность поверхности был использован график корреляции (рис. 8b). По мере увеличения участки микрорельефа η уменьшался с коэффициентом корреляции 0,67, что указывает на сильную и последовательную связь. Это показывает, что 67% изменчивости η можно охарактеризовать изменчивостью участки микрорельефа. Другими словами, участки микрорельефа действительно оказал сильное влияние на производительность техники, т. е. по мере увеличения Неровность поверхности (например, из-за неровной местности и текстуры поверхности почвы) η уменьшался по крайней мере для 50% участков. Следовательно, по мере увеличения участки микрорельефа сеялки могут испытывать снижение производительности.

Высокая категория Неровность поверхности: В целом, в этой категории, когда сеялка v_p превышала USL, η уменьшалась (названия участков: plot1, plot 2, plot 4). Кроме того, операции при высоком участки микрорельефа и более высокой скорости характеризуются уменьшенным η (участок 1, участок 4 в Таблице 4.11.). Таким образом, когда сеялка работала при v_p выше USL, а поверхность почвы была более неровной, значения η были одними из самых низких.

Таким образом, на основе сложного взаимодействия между участки микрорельефа и η сеялки, работающие на более гладких почвах, соответствующие эксплуатационным ограничениям, могут эффективно эксплуатироваться без влияния условий Неровность поверхности почвы. Однако, когда микрорельеф почвы увеличилась до умеренного уровня, производительность сеялки стала более чувствительной к изменчивости Неровность поверхности почвы, что явно повлияло на производительность сеялки. Это могло быть связано с увеличением механических вибраций, которые привели к временному демонтажу компонентов сеялки или повреждению деталей, чувствительных к механическим вибрациям, что в конечном итоге увеличило время простоя. Однако в самой высокой категории участки микрорельефа совокупный эффект взаимодействия между высоким участки микрорельефа и превышением средней рабочей скорости от USL

чрезмерно усложнил производительность техники, что привело к низкой эффективности. Таким образом, управляющие фермами и операторы техники могли понять эту динамику и разработать целенаправленные методы для максимизации производительности техники в различных почвенных условиях, чтобы добиться повышения производительности и долговечности в сельскохозяйственных операциях.

4.4. Оценка точности работы пневматической сеялки

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

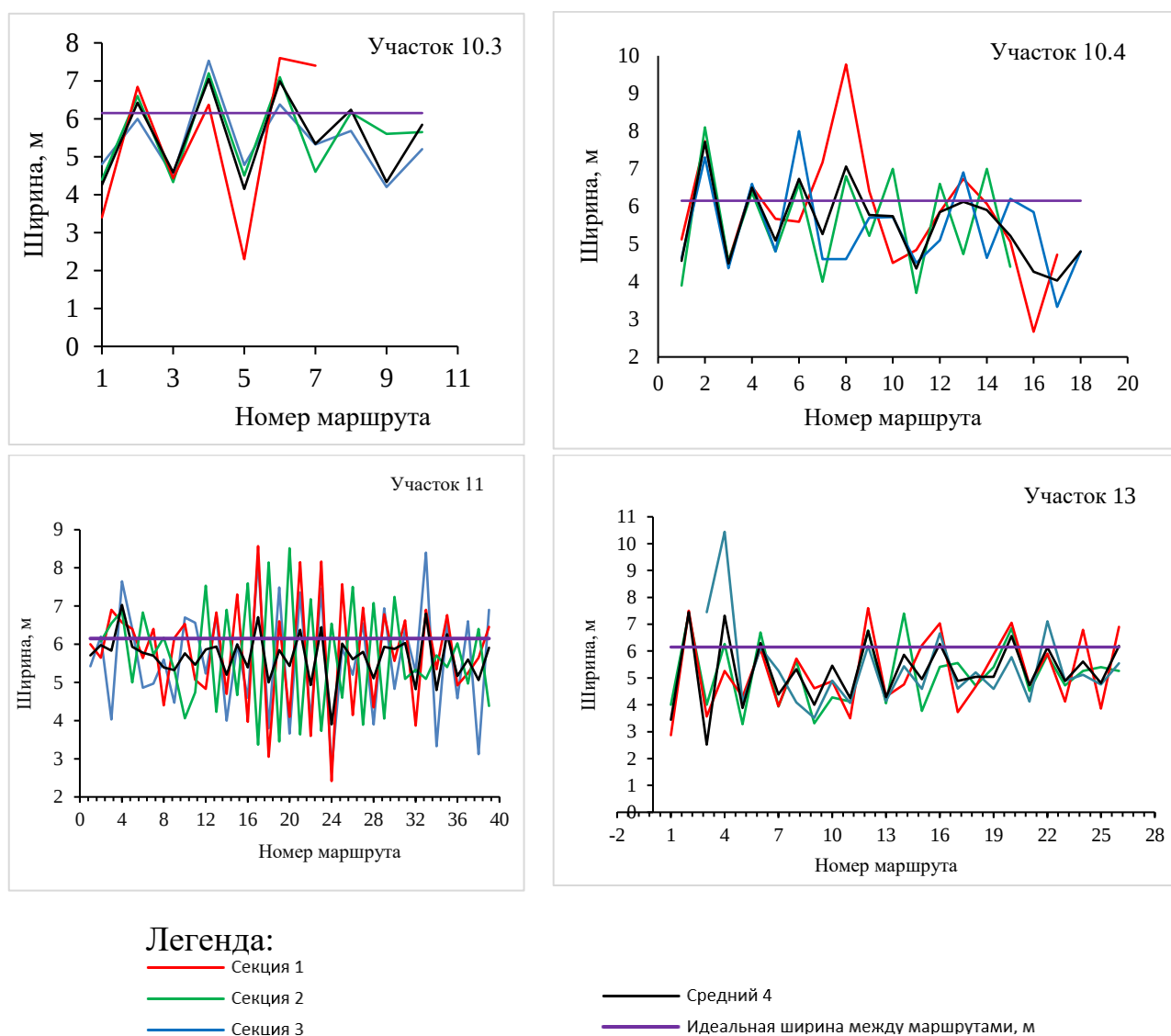


Рисунок 4.28 Фактическое расстояние между маршрутами репрезентативных участков участков по ширине участков.

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

Значения площади незасеянных участков (RM) и имеющих повторный высев (RP), и коэффициент рабочих ходов (φ_{PO}) приведены в таблице 4.12. 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, что указывает на процент повторно засеянной и незасеянной площади соответственно. 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.

Таблица 4.12. RP и MP участков и коэффициент рабочих ходов

Параметр	Участок				Среднее значение
	10.3	10.4	11	13	
Повторно засеянная площадь, (RP) %	14,64	15,09	10,52	21,15	16,05
Незасеянная площадь (MP), %	2,34	3,75	1,27	2,51	2,38
Средняя длина гона, м	156,6	197,6	184,9	344,6	220,7
Коэффициент рабочих ходов (φ_{PO}), %	62,00	52,30	73,20	74,10	66,90

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 стране 1,1 т/га [52] с трех гектар незасеянной площади можно получить 3300 кг, что может удовлетворить потребность в зерновых более 34 человек (при годовой потребности в зерновых 96 кг/чел [52]). При точном высеве 107 га будут обработаны за 6,7 дней 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, 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 из-за сложной формы полей и относительно короткой длины хода. Значение находится в пределах, указанных в стандарте ASAE D497.7 (2011) [42]. 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) [42], но есть возможность его повышения.

Точность и согласованность МТА оценивали по статистическим показателям – среднему значению, стандартному отклонению и коэффициенту вариации (табл. 4.13). 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 и стандартное отклонение 124,1 см, и наибольший коэффициент вариации 24,1%).

Статистический анализ показали высокий уровень превосходства сеялок с GPS-наведением в сравнении с обычным посевным агрегатом. Средняя ошибка GPS-наведения составляет 2,2 см [66], что удовлетворяет 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.

Таблица 4.13. Сводные статистические данные о точности посева на всех участках

Метрическая	Участок			
	10.3	10.4	11	13
Количество измерений	10	18	39	26
Средняя ширина захвата, см	550,0	551,90	568,10	514,70
Стандартное отклонение, см	114,60	104,0	60,20	124,10
Стандартная ошибка среднего значения	36,2	24,5	9,6	24,3
Коэффициент вариации %	20,80	18,90	10,60	24,10

Точность управления во многом зависит от скорости агрегата. Из-за 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. 4.30).

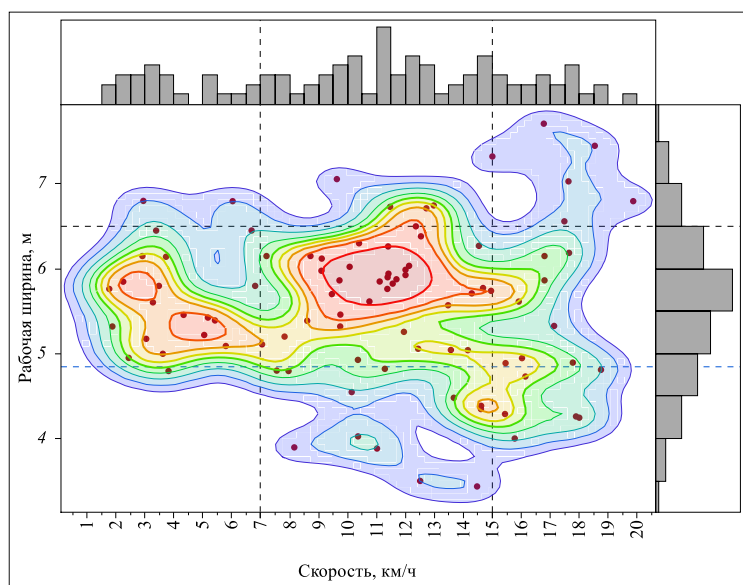


Рисунок 4.29 Плотностные зависимости рабочей скорости от рабочей ширины

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

4.5. Методы оценки качества работы машинно-тракторных агрегатов

Оценка качества работы сельскохозяйственной техники имеет важное

Таблица 4.14 показатели и баллы по основным показателям качества
основной обработки почвы

No	Глубина обработки почвы, см	Количество на Неподрезанные сорняки, 1м ²		Отклонение профиля поверхности почвы		
		Градация нормативов	Балл	Длина профиля, м	Выравненность поверхности, %	Балл
1	17	0	3	10,3	2,91	3
2	29	0	3	10,3	2,91	3
3	9,5	0	3	10,7	6,54	1
4	21,5	0	3	10,6	5,66	1
5	30	0	3	10,4	3,85	3
6	18	0	3	10,8	7,41	1
7	20	Обработка почвы была произведена до начала дождей, поэтому на поле не было сорняков. Следовательно, этот компонент неприменим.		средней = 4,88		2
8	22			Умеренный, основанный на среднем показателе		
9	21,5					
10	22					
средней фактической глубины обработки = 21 см						
Данной глубины = 23см						
Градация нормативов = 2см						
Балл = 2; умеренное						
Общее качество работы = умеренное						

Глубина обработки почвы: Основная обработка почвы была проанализирована на предмет распределения, и было проведено два теста для определения отклонений глубины обработки от допустимых значений. Были проведены тесты среднего и стандартного отклонения, а результаты анализа представлены в обобщенном виде в таблицах и графиках. Было отобрано десять образцов, среднее значение и стандартное отклонение составили 21,05 и 5,83 соответственно, а CV - 27,7%. Среднеквадратическая ошибка среднего составила 1,84, а верхнее и нижнее 95% средние значения соответственно составили 25,22 и 16,88. Для двух тестов гипотетическое среднее значение было средним между самым высоким и самым низким значением идеальной глубины обработки почвы (23 см), а предполагаемое стандартное отклонение было принято равным 2 см [46]

Результаты t-критерия следующие: Тестовая статистика (t) равна -1,0580, что указывает на величину и направление разницы между средним значением выборки и предполагаемым средним значением. Вероятность получения значения, превышающего $|t|$, равна 0,3176, что говорит о том, что разница не является статистически значимой при общих уровнях значимости (0,05). Кроме того, вероятность наблюдения значения, превышающего t, равна 0,8412, в то время как вероятность наблюдения значения, меньшего t, равна 0,1588. Эти вероятности еще больше подтверждают тот факт, что наблюдаемая разница, скорее всего, обусловлена случайным изменением, а не истинным эффектом.

Распределение по глубине, соответствующее нормальному распределению (А) и двустороннему тестовому распределению для гипотетического среднего значения (Б), показано на рисунке 4.30.

Таким образом, не было выявлено существенной разницы между средними значениями глубины обработки и идеальным значением глубины. По результатам теста несмотря на то, что отдельные наблюдения отличаются друг от друга, они существенно не отличаются от ожидаемого итогового значения.

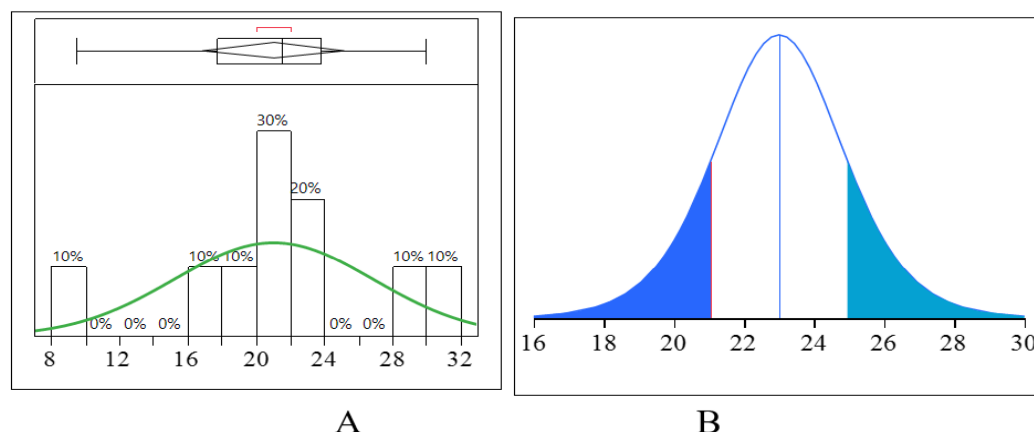


Рисунок 4.30 Распределение глубины, соответствующее нормальному распределению (А) и двухстороннему Тестовое распределение при гипотетическом среднем (В)

Выравненность поверхности (%) и Неподрезанные сорняки: на основе сравнительных значений, приведенных в методологии, для шести записей, взятых с поля, приращения профиля в процентах от горизонтальной гладкой поверхности составили 2,91, 2,91, 6,54, 5,66, 3,85 и 7,41, а среднее из этих значений составляет 4,88%. Два из этих значений меньше 3, приведенных в [46] который оценивается как отличный (3). Один находится между 3 и 5 – оценен как хороший (2), и два были выше 5 (не очень высокий) - оценены как плохой (1). Средний балл находится в хорошей степени (<5). Таким образом, операцию можно оценить как среднюю по качеству. Поскольку первичная обработка почвы проводилась в сухой сезон (без осадков), на всем поле не было сорняков до момента регистрации этих данных.

Оценка предпосевной обработки почвы: Сбор данных о предпосевных работах проводился в два разных периода времени: первый — для операций, выполненных до начала выпадения осадков, второй — для операций, выполненных после начала выпадения осадков.

Перед началом дождя

Статистический анализ глубины обработки почвы: Результат предпосевной операции оценивался по-разному, чтобы определить, соответствует ли выход операции стандарту и готово ли поле к посеву. Было 20 образцов со средним значением 12,45, стандартным отклонением 0,83, стандартной ошибкой среднего 0,83 и коэффициентом вариации 29,76. верхние 95% средние значения =

10,14 и нижние 95% средние значения = 10,71. Значения асимметрии и эксцесса данных составили 0,80 и 0,31 соответственно. Данные продемонстрировали логнормальный характер распределения. Рассматриваемая средняя глубина теста составила 12 см (Табл. 3.4), а стандартное отклонение теста составило 1,75 (среднее значение в Таблице 3.4).

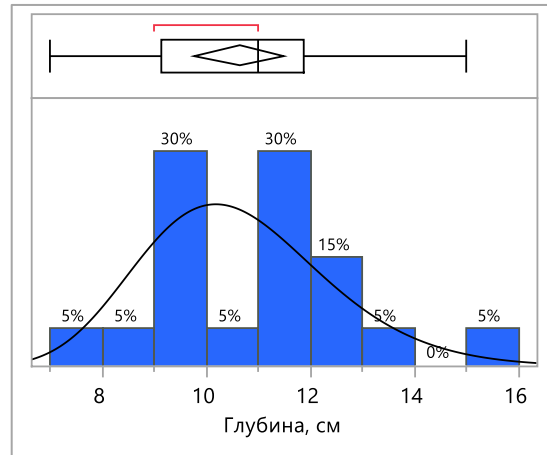


Рисунок 4.31 Распределение глубины обработки почвы в соответствии с логарифмически нормальной моделью распределения.

Результаты краткого обзора теста представлены в Таблице 4.19 все p -значения анализа t -теста превышают любые типичные значения, что указывает на отсутствие существенной разницы между средним значением теста и фактическими значениями. Стандартное отклонение фактических данных было относительно больше, что означает большую изменчивость данных. Это также подтверждается высоким значением CV (29,76%).

Результаты t -теста показывают, что тестовая статистика (t -значение) равна 0,5374, а вероятность $> |t|$ (двуххвостовое p -значение) равна 0,5972. Абсолютное значение t -статистики ($|0,5374|$) относительно невелико, что говорит о том, что наблюдаемая разница между средним значением выборки и гипотетическим средним значением популяции не является статистически значимой. Значение p -0,5972 значительно превышает обычный порог значимости 0,05, что означает недостаточность доказательств для отклонения нулевой гипотезы. Это означает, что данные выборки не дают убедительных доказательств значимых различий между тестируемыми группами или против гипотетического среднего. Низкая

величина *t*-статистики еще больше подкрепляет вывод о том, что любые наблюдаемые различия, скорее всего, обусловлены случайностью, а не систематическим эффектом.

На основе альтернативного метода (оценка по шкале от плохого качества (0) до отличного качества (3)) 40 % глубин были зарегистрированы в приемлемом диапазоне (отличное качество), 5 % — со средним качеством и 55 % — с плохим качеством. Это согласуется с наличием высокого стандартного отклонения и коэффициента вариации, обсуждавшихся в предыдущих подразделах этого раздела.

Количество комков и неподрезанных сорняков, шт/м²: на основе того же метода подсчеткомков представлено в 1 м² области были оценены и получили оценки. В зависимости от оценок, полученных между плохими (1), средними (2) и отличными (3), в зависимости от того, было ли число Комки, имеющие средний диаметр более 5 см, считаются менее 20, от 20 до 30 или более 30, 85% комков имели средний диаметр менее 5 см и 15% находились в диапазоне 20...30. Распределение числа комков изображено на рисунке 4.33. Таким образом, текстурная отделка поля была превосходной и была готова к посеву любыми сеялками. Поскольку эта операция была проведена до начала дождя, сорняки на участках отсутствовали.



Рисунок 4.32 Фотографии, сделанные во время сбора данных на двух участках поля с разным типом почвы

Количественное распределение комьев на 1 метр квадратный площади

показано на рисунке 4.34. Количество комочков колеблется от 0 до 25 на квадратный метр, при этом 70% приходится на 10-20

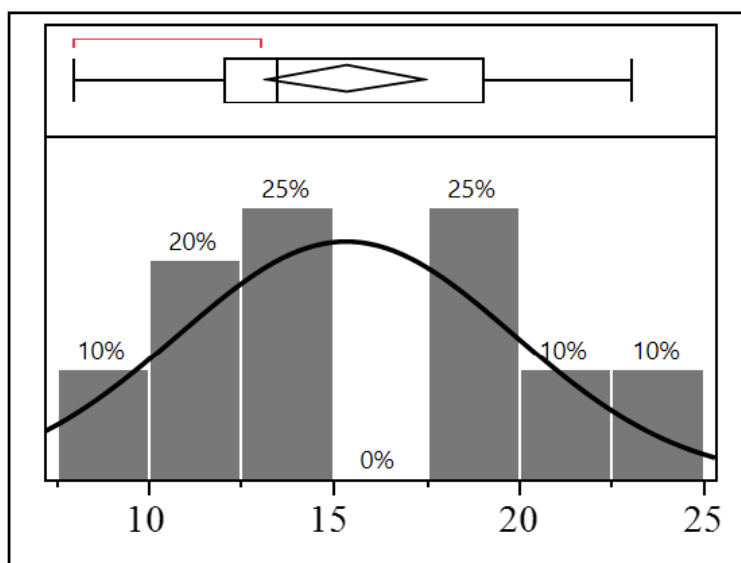


Рисунок 4.33 Распределение количества комков/м²

После начала выпадения осадков

Статистический анализ глубины обработки почвы: Для этой цели были записаны 20 образцов глубины со средним и стандартным отклонением 10,63 см и 1,84. CV составил 17,27, верхнее и нижнее 95% средние значения, соответственно, 11,49 и 9,77, значения асимметрии и эксцесса – 0,33 и 0,51, а стандартная ошибка составила 0,41. Из этого резюме ясно, что стандартное отклонение и коэффициент вариации (CV) относительно малы по сравнению с операцией до начала осадков того же типа. Это может быть связано с влиянием осадков на равномерность глубины и разницей в полевых условиях. Было обнаружено, что модель логнормального распределения представляет распределение глубин с определенным уровнем асимметрии в сторону нижних значений.

По результатам t-теста p-значение = 0,0035 означает, что вероятность наблюдения t-значения, столь экстремального, как -3,33 (в любом направлении) при нулевой гипотезе, составляет 0,0035. Это значительно ниже общего уровня значимости ($\alpha = 0,05$). Это означает, что глубина обработки почвы для операций после выпадения осадков была меньше идеальной.

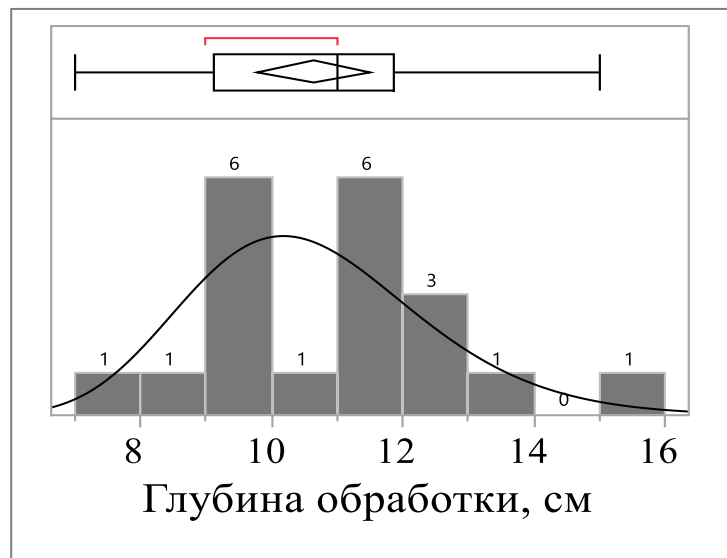


Рисунок 4.34 Распределение глубины, соответствующее логнормальному закону

На основе альтернативного метода (выставления оценок между плохим качеством (0) и отличным качеством (3)), 40% глубин были зарегистрированы как отличные глубины, 15% как умеренные глубины, а остальные 45% как более мелкие (плохое качество). Это также согласуется со статистическим распределением, упомянутым выше, т. е. данные были смещены в сторону более мелкой глубины записей операций. Более низкие значения асимметрии (0,33) и куртозис (0,51) указывают на то, что данные слегка смещены влево (более низкие значения в рисунке 4.34), но более плоское, чем нормальное распределение.

Количество комков и неподрезанных сорняков, шт/м². Агрегатный состав почвы определяли до дождя и 2 дня после дождя (Рис.4.35). При обработке сухой почвы количество комков более 5 см на 20% превысили допустимую норму (20 шт. на 1 м²). После дождя 70% опытных площадок насчитывали менее 10 комков размером более 5 см (рис. 4.35). Экспериментальные данные показали, что мере количество комков размером более 5 см уменьшается экспоненциально. Таким образом, текстурная отделка поля была хорошей и была готова к посеву любыми сеялками.

Другим важным показателем качества предпосевной обработки почвы является способность уничтожать все сорняки, имеющиеся на поле. В опытах до дождя не было всходов сорняков. После дождя на второй день оказалось среднее

число неподрезанных сорняков 22 шт. на 1 м². На отдельных участках поля в ходе предпосевной обработки оказались необработанные участки (рис. 4.36). Оценка от 0 до 3 была дана для определения качества выполненной обработки почвы на основе подсчета не срезанных сорняков, оставшихся после операции. С этой точки зрения 16,67% образцов показали равную долю отличного качества, умеренно хорошего и умеренно низкого. Остальные 50% показали низкогое качество работы. Этот результат указывает на то, что качество работы было неудовлетворительным.

Наличие комков более 5 см. на поле, подготовленном под посев, существенно снижает качество работы посевного агрегата. Рекомендуется использовать на предпосевной обработке почвы комбинированные агрегаты или установить дополнительные прикатывающие устройства.

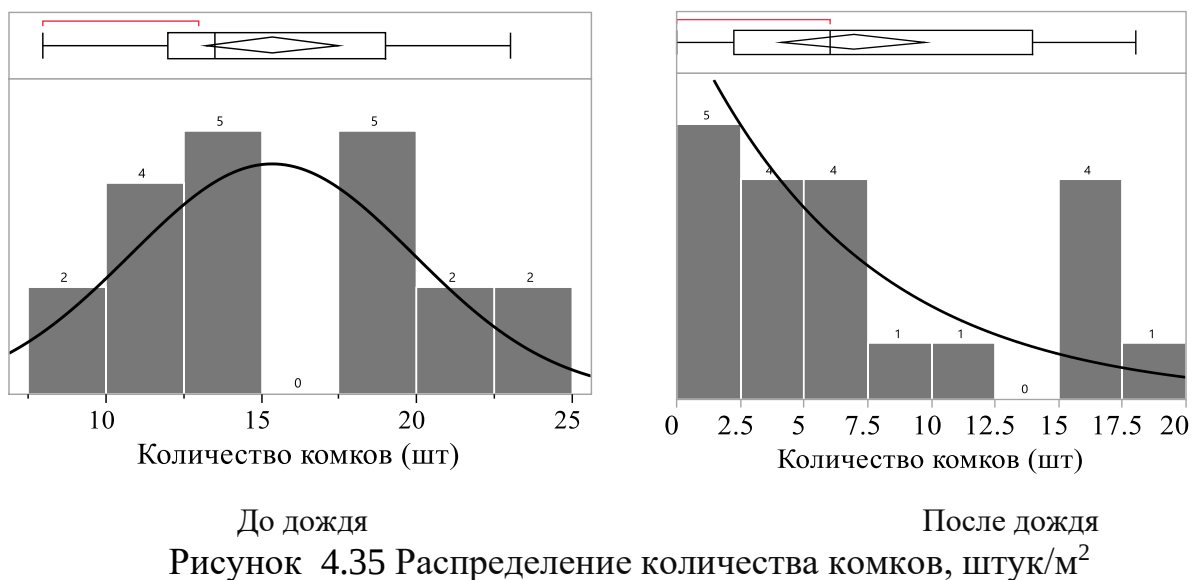


Рисунок 4.36 Измерение показателей в полевых условиях после выпадения

осадков

Процесс посева: как указано в методологии, в этом разделе рассматривается та же оценка глубины и нормы высева семян, но для разных целей, во-первых, для определения того, была ли глубина работы равномерной и соответствовала ли она идеальной глубине заделки семян и норме высева. Другой подход был предназначен для определения оптимальной скорости работы путем анализа тех же показателей с первым.

Показатели качества процесса посева, рассмотренные в данном исследовании, обобщены в таблице 4.15, а также представлены значения оценочных баллов по каждому показателю.

Таблица 4.15 Показатели и баллы начисляются по показателям качества проведения посевной операции.

S.No.	Расстояние между двумя соседними проходами			Средняя глубина заделки семян (см) (Требуемая-3,75 см)			Норма высева на 1 м длины (количество)		
	Фактическое расстояние	Перекрытие, м	Баллов	Фактический	Отклонение, см	Баллов	Количество семян	Отклонение	Баллов
1	11,7	0,45	0	2,85	1,53	2	78	37,18	1
2	11,5	0,65	0	1,98	2,40	1	53	7,55	1
3	11,8	0,35	0	1,68	2,70	1	53	7,55	1
4	11,5	0,65	0	1,97	2,41	1	113	56,64	1
5	11	1,15	0	2,1	2,28	1	61	19,67	1
6	10,8	1,35	0	2	2,38	1	43	-13,95	1
7	11,6	0,55	0	2,15	2,23	1			
8	10,2	1,95	0	2,29	2,09	1			
9	11,5	0,65	0	3,01	1,37	2			
10	11,7	0,45	0	3,6	0,78	2			
Средний	11,33	0,82	0	2,36	2,01	1	67	19,1	1
Описание качества	Низкое		Низкое				Низкое		

Анализ расстояния между последовательными проходами сеялки: Поддержание точного оптимального расстояния между последовательными рабочими проходами сеялки влияет на качественные и количественные параметры производительности сеялки. В соответствии с конструкцией пневматической

сеялки Nardi Dora ширина междурядий составляет 15,4 см (т.е. 40 рядов при ширине конструкции 6 м). Расстояние между двумя последовательными проходами, превышающее 15,4 см, оставляет незасеянное пространство между проходами, а меньшее - означает повторение (перекрытие) посева.

Повторные исследования в 2024 году с непосредственным измерением расстояний между смежными проходами показаны на рисунке 4.37. Фактическое расстояние между двумя последовательными рядами (в отрицательном направлении) и идеальное расстояние между рядами (в положительном направлении). Во всех случаях преобладало определенное перекрытие при обработке. Среднее расстояние между смежными проходами должно составлять 15,4 см, однако среднее фактическое перекрытие составило 82,4 см. Это приводит к большому перерасходу посевного материала, расходу топлива и загущению посевов и соответственно снижению урожайности.

По точности вождения, качество работы было неудовлетворительным. Использование систем автоматического вождения позволяет снизить допустимое отклонение в среднем, до 2-2,5 см. Для решения этой проблемы рекомендуется использовать современную навигационную систему.

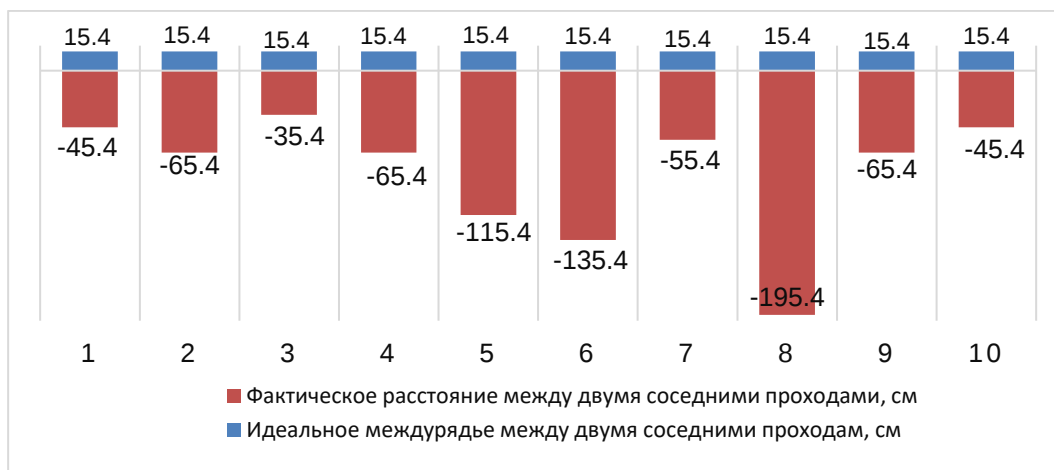


Рисунок 4.37 расстояние между двумя последовательными проходами сеялки

На основе метода, описанного в Таблице 3.5, все отклонения были достаточно большими, чтобы не допустить попадания показателей в диапазон «отлично» и «умеренно».

Равномерность распределения семян: Равномерный посев пшеницы с заданной нормой высева имеет важное значение для достижения оптимальной урожайности, обеспечения эффективного использования ресурсов, подавления сорняков и поддержания экономической жизнеспособности производства. Поэтому способность сеялки соответствовать этим требованиям имеет первостепенное значение. Крайне важно оценить сеялку по этим параметрам производительности для эксплуатационных улучшений и калибровок.

Для этой цели было отобрано семь учетных делянок в соответствии с методикой, приведенной в таблице 3.5. Получено среднее значение 66,8 семян на метр длины рядка и стандартное отклонение - 23,35 семян. Средние значения верхнего и нижнего уровней (95%) составили 87 и 44 растения на метр длины, а коэффициент вариации (CV) - 35,37%. Распределение норм высева показано на рисунке 4.38. Средняя норма высева была на 24 семени на 1 м длины превышало рекомендуемую норму (49 живых растений на 1 м длины), что примерно на 39% больше. Все это приводит к снижению качества распределения семян и увеличению густоты посевов и снижению освещенности растений.

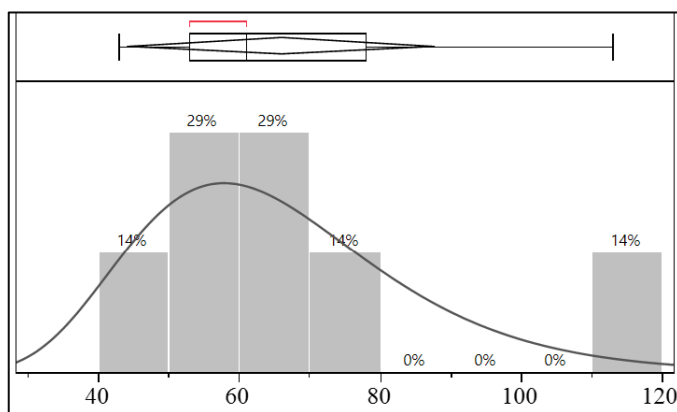
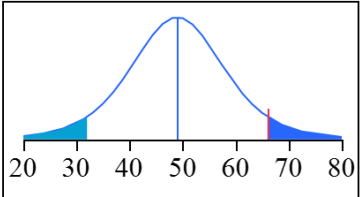


Рисунок 4.38 распределение количества семян/м

Для оценки уровня значимости различий со стандартно принятым средним значением диапазона нормы высева был проведен t-тест. Оптимальный диапазон высева для пшеницы составляет около 250–400 живых растений на м², что эквивалентно 38–60 растениям на метр длины ряда, посеянного с междурядьем 15 см. Среднее значение этого диапазона, составляет 49 растений на м, а результат t-

теста суммирован в таблице 4.16.

Таблица 4.16. сводка t-критерия Стьюдента по количеству растений на квадратный метр.

	т Тест	
Статистика теста	1.9266	
Вероятность $> t $	0,1023	
Вероятность $> t$	0,0512	
Вероятность $< t$	0,9488	

Значение p двухстороннего t-критерия (Вероятность $> |t|$) составила 0,102, что выше типичного уровня значимости ($\alpha=0,05$). Это указывает на то, что нет достаточных статистических доказательств сделать вывод о наличии значительной разницы между средними значениями собранных данных и средним значением теста. Однако, поскольку значение CV относительно высокое, наблюдалась значительная изменчивость в нормах высева. На основе метода, изложенного в Таблице 3.5 отклонение всех показателей количества семян на квадратный метр, превысило заданные пределы, поэтому равномерность распределения была плохой.

Глубина размещения: Глубина заделки семян играет важную роль в определении того, прорастет ли семя или возникнет риск прорастания. Посев глубоко в почву или слишком мелкое размещение определяет вероятность того, что семя прорастет или погибнет. Следует избегать размещения семян глубже рекомендуемого, поскольку это может серьезно повлиять на всхожесть и энергию растения, что приведет к снижению урожайности. С другой стороны, мелкое размещение семян может привести к риску прорастания из-за высокой вероятности недостаточной влажности. Учитывая это, собранные данные были проанализированы на предмет изменчивости глубины и соответствия идеальным глубинам. Диапазон рассматриваемых оптимальных глубин составил 3,75 ... 5 см (среднее = 4,375). Общее количество собранных образцов составило 10; среднее и стандартное отклонение фактических глубин составили 2,36 см и 0,6 соответственно; коэффициент вариации (CV) составил 25,25; а значения асимметрии и эксцесса составили 1,16 и 0,58 соответственно.

Статистика теста составила -10,66, а вероятность наблюдения t-значения, столь же экстремального, как и рассчитанное, в любом направлении, составляет менее 0,0001 ($\text{Prob} > |t| < 0,0001$). Это указывает на то, что фактическое среднее значение значительно ниже тестового среднего (4,375 см).

На основе метода присвоения баллов 3, 2 и 1, представляющих отличное, среднее и плохое качество работы соответственно, 30% глубин были оценены как отличные (хорошее качество), а остальные 70% — как средние.

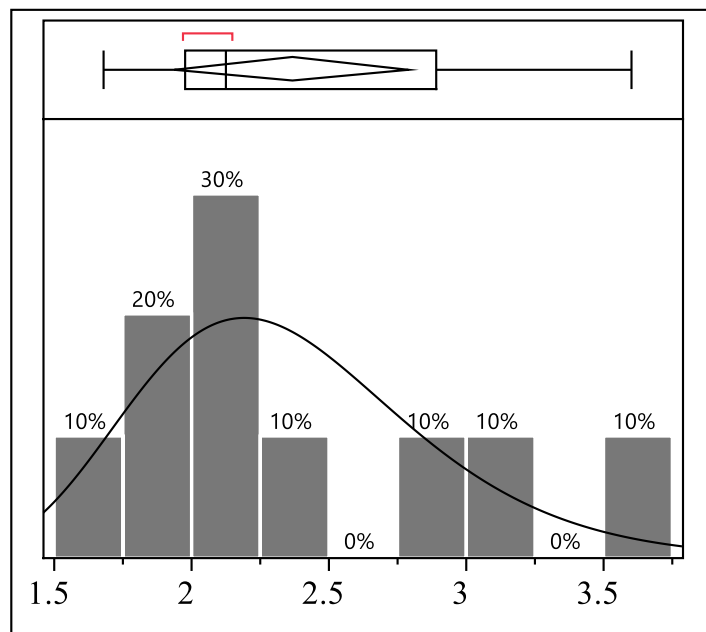


Рисунок 4.39 распределение глубины размещения

Определение оптимальной скорости для обеспечения заданной глубины заделки семян. Влияние скорости на глубину заделки пшеницы с помощью пневматической сеялки Nardi Dora было проведено в рандомизированном блочном режиме с тремя повторениями при скорости работы 4, 6, 8, 10, 12, и 14 км/ч. Результат Анализа fitModel с использованием программного обеспечения JMP TRIAL показал зависимость глубины заделки семян от скорости обработки. Средние значения глубины заделки для каждой скорости приведены на рисунке 4.40. Фактическая средняя глубина заделки семян составила 3,2 см, в то время как оптимальная глубина заделки семян пшеницы составляет от 3,75 до 5 см [116], Результаты анализа показывают, что глубина посева обычно находилась в пределах приемлемого (оптимального) диапазона при скорости 4 км/ч, 6 км/ч, 8 км/ч

(рис.4,40) и незначительно меньше минимального порогового значения допустимого диапазона при 10 км/ч, однако при 12 км/ч и 14 км/ч глубины были значительно меньше порогового значения допустимого диапазона (рис.4,40).

Рисунок 4.42 представляет собой графическую демонстрацию модели, позволяющей подобрать глубину заделки и скорость обработки. представляет собой среднее значение зависимости глубины заделки от скорости обработки.

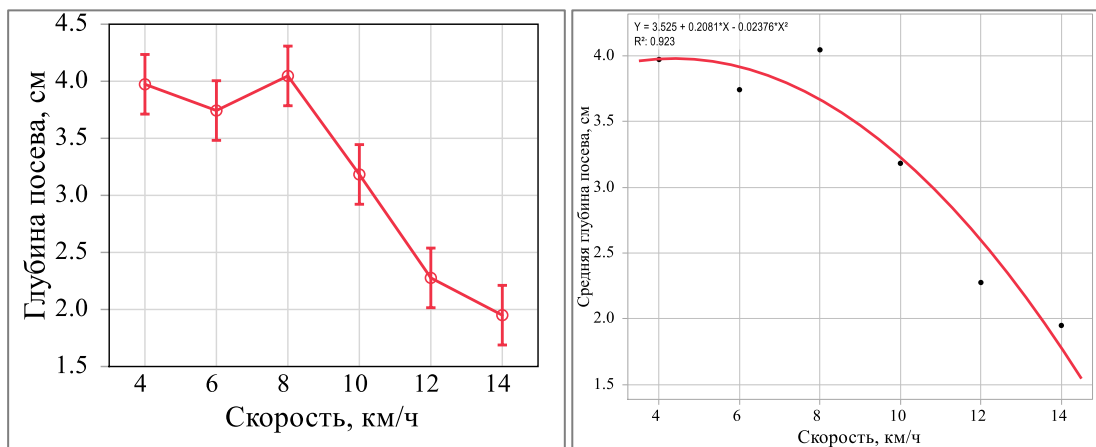


Рисунок 4.40 глубина заделки семян зависит от скорости работы сеялки.

Анализ дисперсии дал значение F-критерия, равное 45.92, и уровень вариантности <0.0001 , что указывает на статистически значимую взаимосвязь между скоростью обработки и глубиной заделки семян. Высокое F-критерия показывает, что скорость работы в модели эффективно объясняет различия в глубине заделки семян. Более того, значение p (уровень вариантности <0.0001), которое было значительно ниже общепринятого порога в 0,05, стало убедительным доказательством того, что между средними значениями в группах существуют существенные различия.

Модельное выражение, представляющее реакцию глубины посева на скорость выполнения операции, имеет вид

$$y = 3,525 + 0,208x - 0,024x^2$$

Кроме этого, с помощью предиктивного профайлера программного комплекса JMP Trial опробовали математическую модель прогнозирования глубины посева для заданной скорости. Была смоделирована модель на двух

уровнях скорости (10 км/ч и 12 км/ч) при доверительной вероятности 95% и определены верхние и нижние интервалы варьирования. Доверительные границы были проверены на предмет того, что они попадают в допустимые пределы (рис. 4.41). Имитационная модель показала лучшие результаты при 10 км/ч с верхним и нижним 95% доверительного интервала. Таким образом, на основе приведенного выше анализа было установлено, что наилучшая скорость, которая обеспечивает заданную глубину глубокого посева - 8 км/ч. Однако с небольшими эксплуатационными корректировками также возможно эксплуатировать машину на скорости от 8 км/ч до 10 км/ч, как также показала имитационная модель с приемлемым 95% доверительным интервалом.

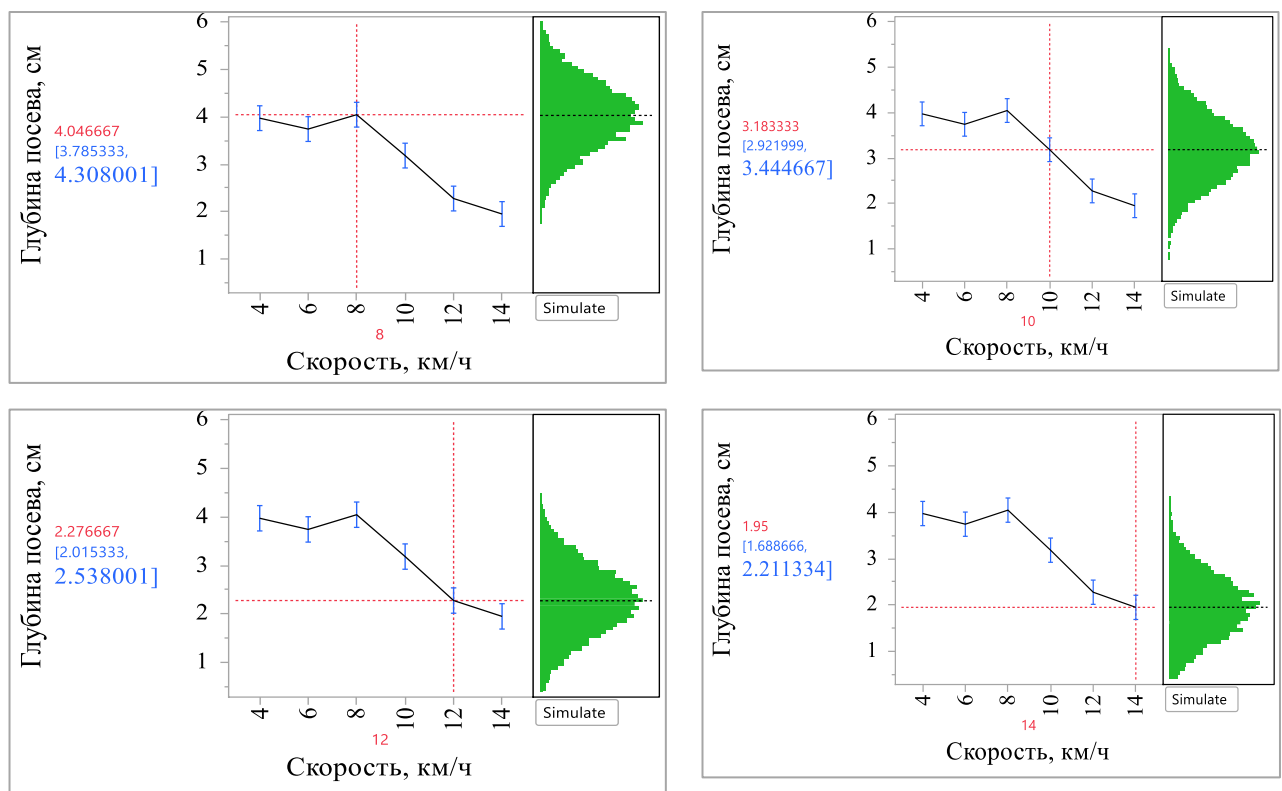


Рисунок 4.41 Моделирование прогностического профиля глубины посева на рабочих скоростях 8, 10, 12 и 14 км/ч

Согласно эксперименту, проведенному с глубиной заделки семян, в зависимости от скорости работы сеялки качество работы ухудшится, если машина будет работать на скорости выше 10 км/ч. Наилучшей скоростью, с точки зрения повышения производительности и снижения затрат на качество, является скорость

выполнения операций от 8 до 10 км/ч. При незначительных изменениях в калибровке и эксплуатационных критериях (например, при правильной предпосевной подготовке почвы) эта скорость может привести к снижению производительности машины и качества ее работы.

4.6. Оптимальное использование техники при одновременном выполнении производственных процессов:

Целью этого подраздела было оптимизировать распределение производственных площадей для трех основных операций, обычно выполняемых в эритрейской сельскохозяйственной практике (практика ECLC в производстве пшеницы), между различными рабочими механизмами, при минимизации максимального времени обработки, необходимого для каждой операции. Оптимизация проводилась с использованием метода последовательного программирования методом наименьших квадратов (SLSQP), который позволил эффективно учесть ограничения как на равенство, так и на неравенство. Цель состояла в том, чтобы гарантировать, что все рабочие периоды были постоянными и не превышали заданного максимального времени. В результате процесса оптимизации были получены следующие оптимальные значения для переменных принятия решений, которые представляют площади (га), обрабатываемые соответствующим оборудованием (Табл. 4.21). Эти значения указывают, как следует распределять площади обработки (га) между различными машинами для достижения оптимального распределения задач. Расчетное время обработки для каждого агрегата техники составило $T_1=T_2=T_3=T_4=19,54$ дня. Такое единообразие во времени обработки указывает на то, что оптимизация успешно сбалансировала нагрузку на все агрегаты оборудования, гарантируя, что ни один агрегат не будет перегружен непропорционально. Наконец, было определено, что минимальное максимальное время выполнения всех операций составляет 14 дней.

Для большей наглядности будет проведено сравнение Forguison465 и Новой Зеландии T6090. Пять тракторов Forguison 465 будут работать в течение 14 дней, чтобы обработать 291,71 га во время основной обработки почвы, в то время как

четыре трактора "Новая Голландия" Т6090 будут обрабатывать 182,7 га во время основной обработки, 390,21 га во время предпосевной обработки и 1290,34 га (общая площадь) во время посевной и других работ. Завершите обработку в то же время, что и другие детали счетчика (например, Forguson 465), т.е. на выполнение всех трех операций потребуется одинаковое количество времени. Этот результат демонстрирует эффективность оптимизационного подхода в достижении сбалансированного распределения производственных площадей при минимизации максимального времени, необходимого для обработки на всех действующих станках. Полученные результаты подчеркивают потенциал повышения эффективности управления ресурсами за счет методов систематической оптимизации и позволяют предположить, что тщательный анализ распределения оборудования может привести к значительным улучшениям в работе.

Таблица 4.21. Оптимальная площадь, обрабатываемая техникой для каждого типа полевых работ (га)

Тип операции	Объем работы га	Часовая производительность, га/ч				Объем работ, выполняемых агрегатами на базе тракторов			
		Новая голландия Т7060 (6)	Новая голландия Т6050 (8)	Форгусон 465 (4wd) (5)	Новая голландия Т6090 (4)	Новая голландия Т7060 (6)	Новая голландия Т6050 (8)	Форгусон 465 (4wd) (5)	Новая голландия Т6090 (4)
Основная обработка почвы	1290,34	0,8775	0,51	0,45	1,17	451,53	416,05	302,07	120,7
Предпосевная обработка почвы	1290,34	1,68	1,7	0,0	2,2	501,41	462,58	0	326,35
Посев	1290,34	0	0,0	0,0	4,42	0	0	0	1290,34
Требуемое время						14	14	14	14

Теперь, если операции выполняются последовательно в порядке – Основной обработки почвы → предпосевной обработки → посева, максимальное количество дней, подходящих для посева, составляет 14 дней, как описано в предыдущих разделах (Определение сроков посева) для фермы Целот-Ади'Туаэдад (11-30 июня); однако для фермы Халхале Однако подходящими днями являются только вторые декады (11-20 июня). Таким образом, сроки посева в Халхале находятся в

пределах фермы Целот-Ади'Туаэдад, что указывает на то, что максимально доступные сроки посева составляют 14 дней. Это указывает на то, что полевые работы, которые проводятся перед посевом, должны проводиться вне указанных дат. Таким образом, общее количество дней, доступных для завершения работ, составит 14 плюс количество дней, доступных для выполнения других операций, помимо посева. Однако, если операции выполняются одновременно, как описано выше в этом разделе, при имеющихся ресурсах оборудования, это занимает минимум 14 дней, как указано в таблице 4.40 выше. Этот срок находится в пределах доступного максимального времени для всех операций последовательно. Таким образом, есть возможность для любой гибкости в тех случаях, когда погодные условия вынуждают вносить изменения в работу.

4.7. Оптимизация маршрутов движения сельскохозяйственной техники

На основе алгоритма, описанного в разделе 3.7, определяются оптимальные маршруты для процесса посева, значения которых представлены в Таблице 4.21. Процесс оптимизации начинается с построения ежедневного маршрута, который начинается и заканчивается на парке (PP0). Каждый день сеялка начинает с PP0 и продолжает засеивать участки один за другим, следя за тем, чтобы общая площадь, обработанная в течение дня, не превышала суточной производительности машины. Суть этой оптимизации заключается в функции `advanced_route_optimization`, которая выбирает следующий участок на основе системы приоритетов. Алгоритм определяет приоритет участков с большей оставшейся площадью, а также учитывает расстояние до участка, гарантируя, что будет выбран ближайший участок с ненулевой оставшейся площадью. Эта стратегия сводит к минимуму ненужное время в пути и повышает эффективность.

После выбора участка машина определяет, какую часть участка можно засеять, исходя из его доступной производительности в течение дня. Площадь, которую нужно засеять, равна минимальной оставшейся площади участка и оставшейся производительности машины. После обработки участка обновляется оставшаяся мощность машины, и участок добавляется к текущему маршруту. Этот

процесс продолжается до тех пор, пока не будет заполнена дневная мощность машины или не будет засеяна вся оставшаяся площадь.

В конце рабочего дня машина возвращается на парка (PP0) для завершения смены. Этот обратный путь включается в общее расстояние, пройденное за день, что позволяет не только свести к минимуму расстояние, пройденное в процессе посева, но и учесть время, необходимое для возврата машины в исходную точку, что делает весь маршрут максимально эффективным. Затем общее расстояние, пройденное по этому маршруту и обслуживаемому району, рассчитывается путем суммирования всех сегментов путешествия.

Этот метод обеспечивает эффективный способ планирования сельскохозяйственных работ, обеспечивая оптимальное использование ресурсов при минимизации расстояний между участками. Гибкость изменения конкретных маршрутов позволяет адаптироваться к условиям реального времени или оперативным изменениям, что делает его ценным подходом в управлении точным земледелием.

В этом разделе будут использованы результаты, полученные в разделе “Оптимальное использование техники при одновременном выполнении производственных процессов”. Рассматриваются три основные операции с сельскохозяйственной техникой и рассчитывается производительность каждой машины.

Для удобства управления и обслуживания предполагается, что машины будут работать одновременно на одном участке, насколько это возможно для всех. Таким образом, ежедневный объем обрабатываемой площади (один день состоит из 10 часов в соответствии с нормами, полученными в ходе полевых экспериментов, рассмотренных выше) равен сумме дневной производительности каждой машины.

Фермы Целот-Ади'Гуаэдад

Исходя из этого, первой операцией является основная обработка почвы, которая рассчитана на четыре разных трактора, причем каждый тип трактора состоит из нескольких тракторов. Суммарная производительность была рассчитана

как 92 га/день. Поэтому, учитывая, что ежедневно будет обрабатываться площадь в 92 га, был проведен процесс оптимизации. Результаты процесса оптимизации приведены в Таблице 4.26, а оптимальные маршруты – в Таблице 4.21.

Результаты предпосевных работ представлены в Таблице 4.22., краткие маршруты суммированы, а оптимальный маршрут показан на рисунке 4.47

Таблица 4.22. Краткое описание оптимизированных маршрутов основной обработки почвы с использованием жадного алгоритма с расширенными возможностями транспортного средства

День	Маршрут (предпосевная обработка почвы)	Общая посевная площадь (га)	Расстояние по маршруту (км)
1	PP0→PP1→PP3→PP0	162,27	3,356
2	PP0→PP3→PP0	162,27	3,05
3	PP0→PP3→PP4→PP0	162,27	5.806
4	PP0→PP2→PP4→PP5→PP5→PP14→PP12→PP0	162,27	12.51
7	PP0→PP16→PP17→PP6→PP7→PP18→PP9→PP11→PP10→PP13→PP12→PP0	162,27	13.711
8	PP0→PP8→PP12→PP0	162,27	12.695
Итого			51.128

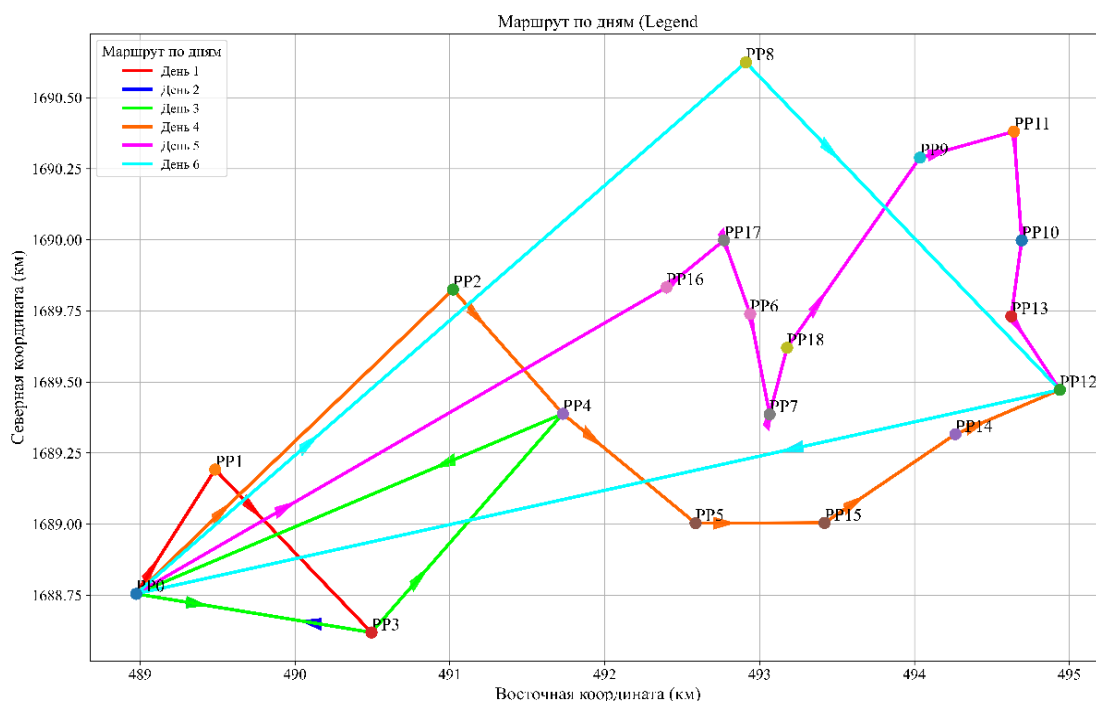


Рисунок 4.42 Оптимальные ежедневные маршруты движения МТА от депо до участка(ов) и обратно - основная обработка почвы

Таблица 4.23. Краткое описание оптимизированных маршрутов предпосевной обработки почвы с использованием жадного алгоритма с учетом возможностей транспортного средства

День	Маршрут (предпосевная обработка почвы)	Общая посевная площадь (га)	Расстояние по маршруту (км)
1	PP0→PP1→PP3→PP0	323,8	4,586
2	PP0→PP3→PP4→PP16→PP17→PP6→PP7→PP15→PP14→PP12→PP10→PP11→PP9→PP0	323,8	19,787
3	PP0→PP2→PP8→PP9→PP13→PP18→PP5→PP0	214,93	15,501
Итого		862,68	39,847

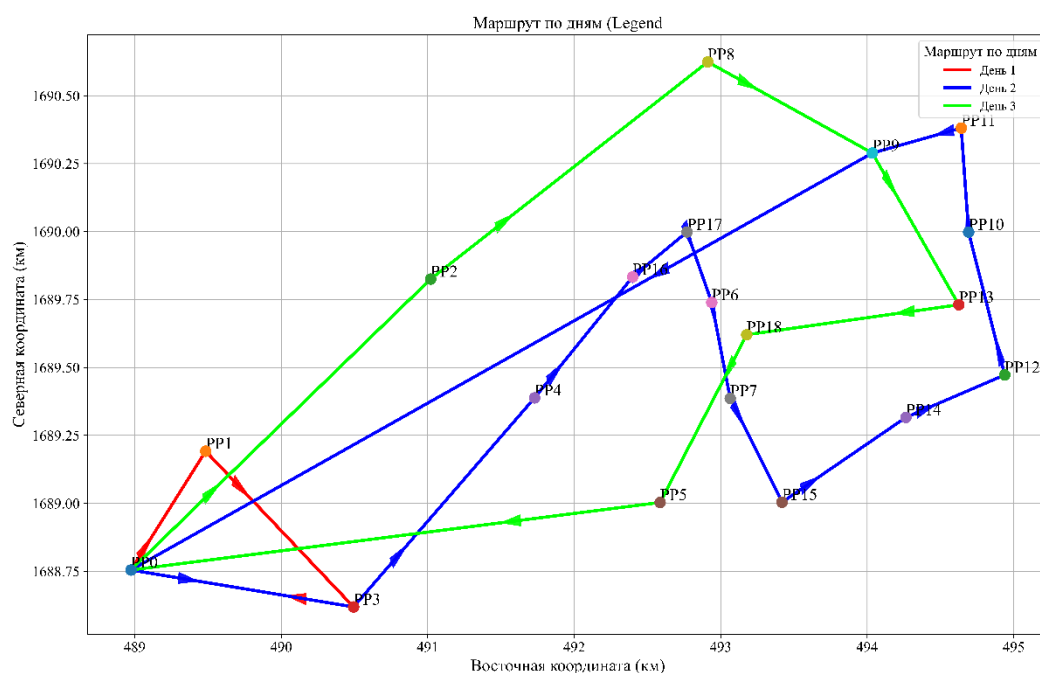


Рисунок 4.43 Оптимизированные маршруты для ежедневной работы машины для предпосевной обработки почвы

Процесс посева также должен быть оптимизирован на основе того же принципа. Оптимальные маршруты представлены ниже в таблице 4.24, а оптимальные маршруты показаны на рисунке 4.49.

Таблица 4.24. Краткое описание оптимизированных маршрутов проведения посевной операции

День	Маршруты посевных работ	Общая посевная площадь (га)	Общее расстояние (км)
1	PP0 → PP1 → PP3 → PP0	176,8	4,586
2	PP0 → PP3 → PP0	176,8	5,798
3	PP0 → PP3 → PP4 → PP16 → PP7 → PP6 → PP0	176,8	13,905
4	PP0 → PP2 → PP8 → PP9 → PP10 → PP0	176,8	17,391
5	PP0 → PP5 → PP15 → PP14 → PP12 → PP10 → PP11 → PP13 → PP18 → PP6 → PP7 → PP0	176,8	20,682
Итого		862,68	62,362

Полученные графические маршруты процесса представлены на рисунке 4.50; в необходимых случаях альтернативные более короткие маршруты указаны в таблице 4.29.

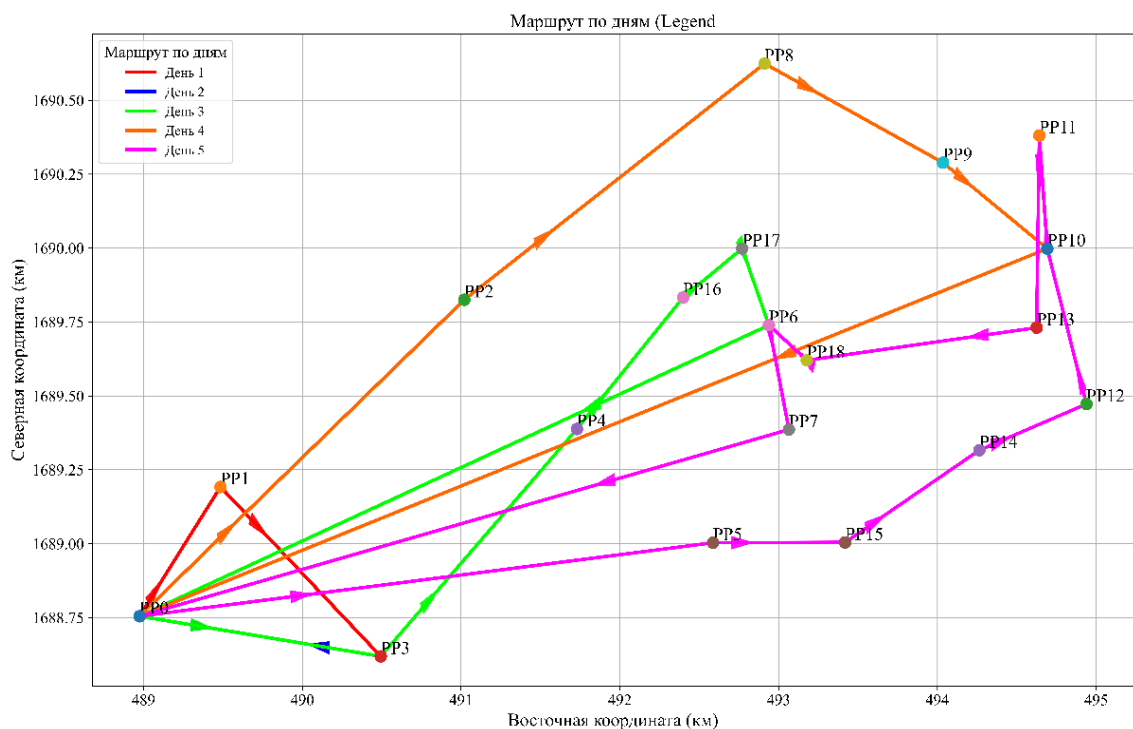


Рисунок 4.44 Маршруты посева на сельскохозяйственных участках, иллюстрирующие оптимизированные траектории движения сеялки.

Маршруты обозначены цветом в зависимости от дня, и каждая линия представляет путь от парка (PP0) к различным участкам и обратно на парк. Эта визуализация помогает понять логистическое планирование, связанное с процессом посева, обеспечивая оптимальное использование ресурсов при

минимизации расстояний между участками.

Фермы Халхале

В соответствии с тем же принципом, что и на ферме Целот-Ади'Гуаэдад, результаты оптимизации основной обработки почвы, предпосевной обработки и посевных работ на ферме Халхале приведены представленной в таблице 4.24 и таблице 40.25 и рисунке 4.31 и 4.32.

Таблица 4.24 Оптимизированные маршруты для ежедневной работы основной почвообрабатывающей машины

День	Маршруты посевных работ	Общее расстояние (км)	Общая посевная площадь (га)
1	H0 → H5 → H1 → H0	5.649	92
2	H0 → H6 → H4 → H0	4.248	92
3	H0 → H4 → H0	4.186	92
4	H0 → H4 → H3 → H0	7.388	92
5	H0 → H1 → H2 → H3 → H0	10.072	59.76
	Итого	35.729	427.76

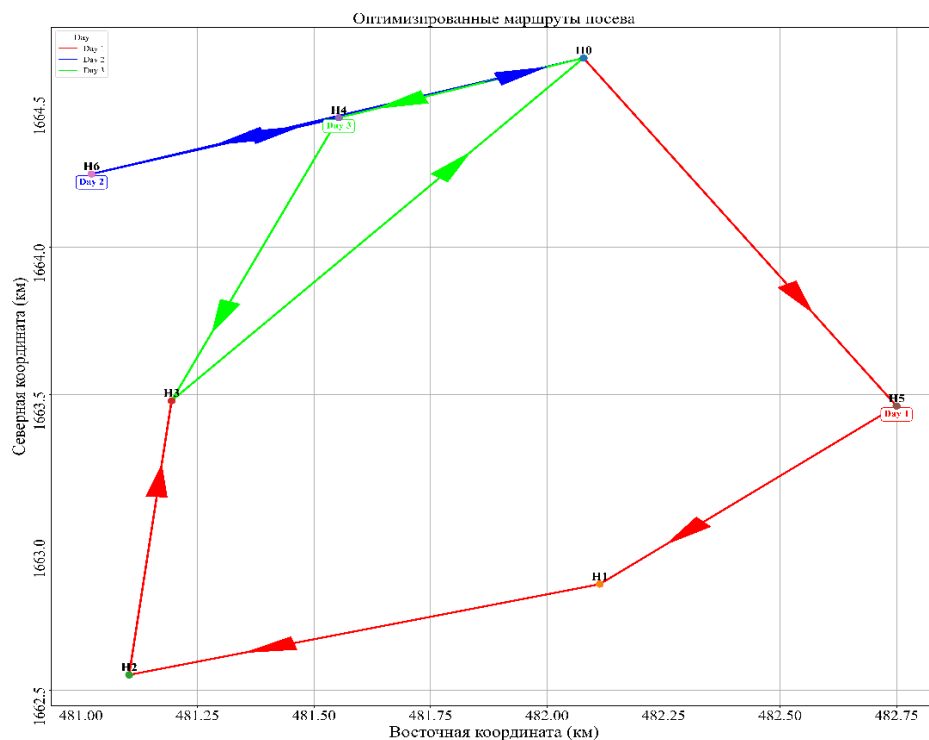


Рисунок 4.45 Основные маршруты обработки почвы на сельскохозяйственных участках, иллюстрирующие оптимизированные траектории движения сеялки.

Таблица 4.25 Оптимизированные маршруты для ежедневной работы машины для предпосевной обработки почвы

День	Маршруты посевных работ	Общая посевная площадь (га)	Общее расстояние (км)
1	H0 → H5 → H1 → H2 → H3 → H6 → H4 → H0	315.7	7,265
2	H0 → H4 → H0	111.76	4,186
3	Итого	427.46	11,451

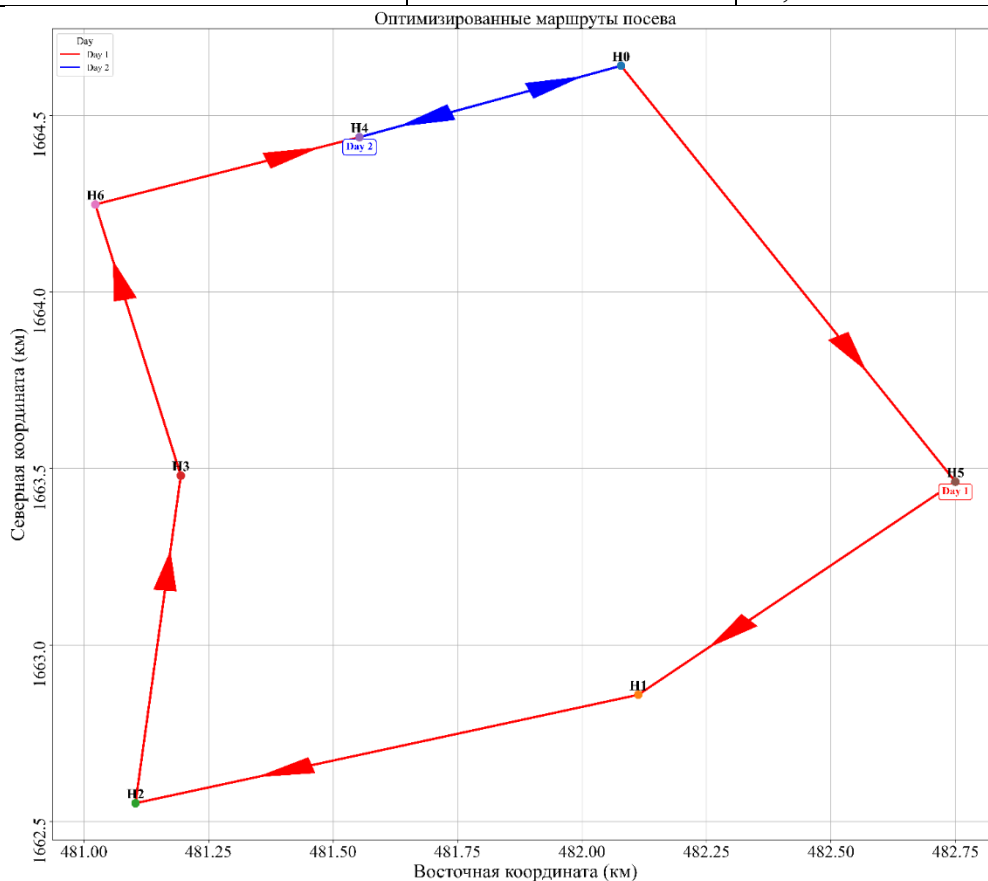


Рисунок 4.46 Оптимизированные маршруты для ежедневной работы машины для предпосевной обработки почвы

Таблица 4.26: Оптимизированные маршруты для ежедневной работы посевной и почвообрабатывающей машины

День	Маршруты посевных работ	Общее расстояние (км)	Общая посевная площадь (га)
1	H0 → H5 → H1 → H2 → H3 → H0	8.095	176.8
2	H0 → H6 → H4 → H0	4.248	176.8
3	H0 → H4 → H3 → H0	7.388	74.16
Итого		19.731	427.76

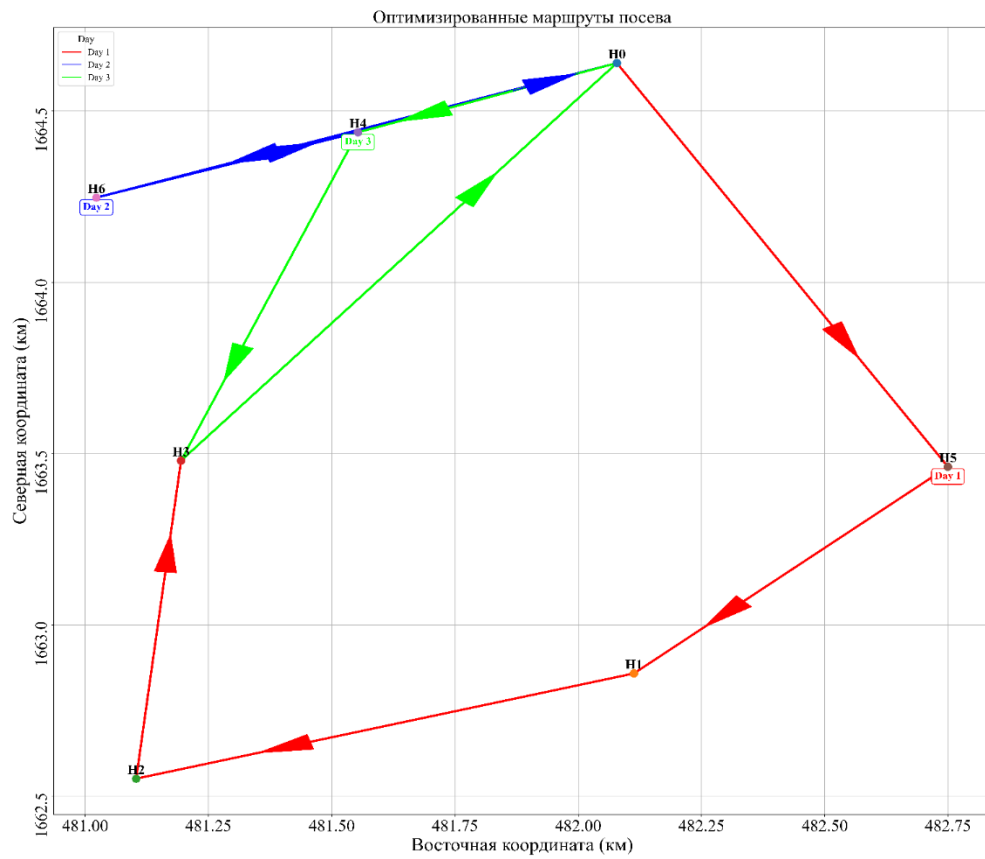


Рисунок 4.47 Оптимизированные маршруты для ежедневной работы посевной и почвообрабатывающей машины

Заключение:

1. По природно-климатическим и почвенным характеристиками наиболее благоприятными для возделывания пшеницы являются южный (осадки 300-600 мм) и центральный регионы (осадки 100-500) Эритреи. Средняя температура увеличилась за последние годы на 1,7 °С. В этой зоне производится около 70% зерновых культур.

2. По данным хронометражных наблюдений при посеве пшеницы на ферме «Целот» с использованием пневматической сеялки Nardi DORRA среднее значение коэффициента использования времени смены $K_{см}$ составило 0,26. При соблюдении оптимальных рекомендаций среднее значение для того же МТА было 0,68, что в 2,5 раза выше, чем в обычной практике. Среднее значение $K_{см}$ для трех МТА, работавших в июле, и четырех МТА, работавших в сентябре, на предпосевной обработке почвы составило 0,59 и 0,37, соответственно. Такое различие объясняется потерей времени на очистку рабочих органов от налипающей почвы, вызванной ошибочным выбором орудий без учета состояния почвы и ее влажности.

3. Топографические особенности, микрорельеф и конфигурация поля оказывают существенное влияние на производительность МТА при посеве. Совокупный коэффициент снижения эффективности $K_{об}$ показал значительное влияние ($R^2 = 0,79$) на снижение эффективности. Поэтому необходимо улучшить общую планировку поля и его выравнивание, а также проводить полевые работы с учетом специфики поля.

4. Идеальное время для посева пшеницы для южных и центральных регионов Эритреи с 11 по 30 июня. Этот период снизит риск от повышенного количества осадков в конце июня и засушливого периода при раннем посеве.

5. При посеве пшеницы пневматической сеялкой Nardi Dora среднее значение перекрытия достигало до 71 см. При посеве на площади 107 га повторный посев составил 17 га и не засеяно – 3 га. При посеве стандартные следоуказатели (маркеры) не обеспечивают заданную точность вождения из-за особенностей климата и низкого качества предпосевной подготовки почвы.

Использование систем автоматического вождения позволяет снизить допустимое отклонение в среднем, до 2-2,5 см.

6. При заданной глубине основной обработки почвы 23 см среднее значение фактической глубины оказалось равным 21,05 см, отклонение более 2 см, значение коэффициента вариации (CV) 27,7%, что указывает на высокую вариабельность глубины обработки почвы. Выравненность поверхности 4,88 %. На основании балльного метода оценки качество оценивается как умеренное. Исходя из этой информации, эксплуатационное качество было от умеренного до плохого. Дисковый плуг не обеспечивает требуемое качество обработки, поэтому необходимо рассмотреть возможность использования безотвальной технологии.

Средняя глубина предпосевной обработки почвы равна 12,45 см., коэффициент вариации – 29,76 %. В допустимый диапазон попадает только 40% значений, 5% - среднее качество, а 60 % не удовлетворительное качество. Количество комков размером более 5 см существенно зависит от влажности почвы. При обработке сухой почвы количество комков более 5 см на 20% превысили допустимую норму (20 шт. на 1 м²). После дождя 70% опытных площадок насчитывали менее 10 комков размером более 5 см. Наличие комков более 5 см. на поле, подготовленном под посев, существенно снижает качество работы посевного агрегата. Рекомендуется использовать на предпосевной обработке почвы комбинированные агрегаты или установить дополнительные прикатывающие устройства на дисковую борону.

7. Оценка соблюдения нормы высева показала высокий коэффициент вариации (CV) 35,37% количества семян на 1 м рядка. Среднее количество семян на 1 м рядка превышает норму высева на 24 растения по сравнению с рекомендуемой нормой (49 живых растений на 1 м длины).

8. Наилучшее значение глубины посева находится в диапазоне 3,75 ... 5 см (среднее = 4,375). По данным исследований средняя глубина посева составила 2,36 см, коэффициент вариации - 25,25%. Т-тест подтвердил, что среднее значение теста и среднее фактическое значение показали

статистическую разницу. По методике балльной оценки 30 % глубин были признаны хорошим посевом, а остальные (70 %) - средним.

Зависимость глубины посева от скорости аппроксимируется уравнением второй степени $y = 3,252 + 0,208x - 0,024x^2$, коэффициент детерминации $R^2 = 0.92$. Для обоснования рабочей скорости разработана имитационная модель прогнозирования глубины посева с помощью предиктивного профайлера программного комплекса JMP Trial. С доверительной вероятностью 0,95 будет обеспечена средняя глубина посева 4,1 см, доверительный интервал 3,8-4,3 см при скорости 8 км/час. При повышении качества предпосевной обработки, возможно увеличить рабочую скорость до 10 км/час.

9. Сбалансировав нагрузку между имеющимися МТА, можно одновременно обработать 1290,34 га земли для основной и предпосевной обработки почвы и посева минимум в течение 14 дней. Данная модель может быть адаптирована (с изменениями или без) к любым аналогичным полевым операциям и поможет лицам, принимающим решения, заранее спланировать эффективное выполнение полевых операций в напряженный период.

10. Модель оптимизации маршрута позволила минимизировать холостые пробеги машинно-тракторного агрегата между участками и парком. Эта модель помогает планировать перемещения на нужные участки в течение смены (дня), а также может быть адаптирована к другим аналогичным полевым работам с внесением или без внесения изменений в модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Верещагин Н. И. Организация и технология механизированных работ в растениеводстве: учебное пособие для начального профессионального образования / Н. И. Верещагин, А. Г. Левшин, А. Н. Скороходов [и др.]. – 7-е издание, стереотипное. – Москва: Издательский центр «Академия», 2013. – 416 с. – ISBN 978-5-7695-9632-2. – EDN MWBBVZ.
2. Дидманидзе, О. Н. Тенденции развития цифровых технологий диагностирования технического состояния тракторов / О. Н. Дидманидзе, А. С. Дорохов, Ю. В. Катаев // Техника и оборудование для села. – 2020. – № 11(281). – С. 39-43. – DOI 10.33267/2072-9642-2020-11-39-41. – EDN SUTTJS.
3. Журавлев, С. Ю. Оценка эффективности использования МТА : Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки 110800.62 "Агроинженерия" / С. Ю. Журавлев. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2015. – 88 с. – EDN VMAOGL.
4. Зангиев, А. А. Практикум по эксплуатации машинно-тракторного парка / А. А. Зангиев, А. Н. Скороходов. – Издание 3-е, Стереотипное. – Санкт-Петербург : Издательство "Лань", 2018. – 464 с. – ISBN 978-5-8114-2097-1. – EDN URHBQY.
5. Искандаров, И. А. Алгоритм определения оптимальных режимов работы МТА для посева пропашных культур / И. А. Искандаров, Н. И. Джабборов // Вестник НГИЭИ. – 2024. – № 5(156). – С. 59-69. – DOI 10.24412/2227-9407-2024-5-59-69. – EDN RLRIJT.
6. Каштанов А. Н., Краснощеков Н. В., Кирюшин В. И. Система технологий для производства продукции растениеводства/А. Н. Каштанов, Н. В. Краснощеков, В. И. Кирюшин, Москва: Россельхозакадемия, Минсельхозпрод РФ, 1999.
7. Краснощеков Н. В. Инновации в машиноиспользовании в АПК России / Н. В. Краснощеков, В. И. Кирюшин, Э. И. Липкович [и др.]. Том 1. – Москва: Министерство сельского хозяйства РФ, 2008. – 403 с. – EDN QKZLTN.
8. Левшин А. Г. Влияние конфигурации и топографических особенностей

поля фермы Целот (Эритрея) на производительность посевного агрегата / А. Г. Левшин, Т. А. Медхн, И. Н. Гаспарян, С. Г. Теклай // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 2. – С. 33-41. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-2-33-41. – EDN TEARZQ.

9. Технологии механизированных работ в растениеводстве: Учебник / А. Г. Левшин, А. Н. Скороходов, С. Н. Киселев [и др.]. – Москва: Издательский центр "Академия", 2018. – 336 с. – ISBN 978-5-4468-7191-9. – EDN ZYJRBE.

10. Личман Г. И. Концепция точного земледелия на основе понятий идеального поля и цифрового двойника / Г. И. Личман, В. М. Коротченя, И. Г. Смирнов, Р. К. Курбанов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67, № 3(40). – С. 81-86. – DOI 10.22314/2658-4859-2020-67-3-81-86. – EDN LXJBTE.

11. Мартынов Б. П. Агротехнические требования для механизаторов / Б. П. Мартынов, И. С. Шатилов, А. С. Семин, 2-е изд-е изд., Москва: Росагропромиздат, 1988. 0–255 с.

12. Медхн Т.А., Левшин А.Г., Теклай С.Г. Оценка эксплуатационной точности пневматической сеялки на ферме Эритреи/ Т. А. Медхн, А. Г. Левшин, С. Г. Теклай // Агроинженерия. 2025;27(2):21-29

13. Митягин, Г. Е. Повышение эффективности работы сервисных служб машинно-технологических станций: специальность 05.20.03 "Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Митягин Григорий Евгеньевич. – Москва, 2002. – 142 с. – EDN NMAHWZ.

14. Орманджи К. С. Правила производства механизированных работ в полеводстве (пособие для бригадиров и звеньевых) / К. С. Орманджи, 2-е изд-е изд., Москва: Россельхозиздат, 1983. 0–285 с.

15. Скороходов А. Н., Левшин А. Г. Производственная эксплуатация машинно-тракторного парка / А. Н. Скороходов, А. Г. Левшин, Москва: БИБКОМ; ТРАНСЛОГ, 2017. 1–478 с.

16. Смелик, В. А. Управление мобильными машинами в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур с использованием спутниковых

навигационных систем / В. А. Смелик, И. З. Теплинский, М. Н. Поликарпов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2012. – № 26. – С. 349-353. – EDN PIQTSX.

17. Тухтакузиев А. Обеспечение равномерности глубины обработки почвы // Сельскохо-зяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13. N3. С. 34-38. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-3-34-38.

18. Шарипов, И. Н. 898. Состояние и проблемы трудового потенциала сельского хозяйства России. Кушнарев Л.И., Дидманидзе О.Н. -Москва: Триада, 2010.-69 с.: ил., табл.-Библиогр.: с. 68-69 (23 назв.). - ISBN 978-5-9546-0065-0. Шифр 11-1811 / И. Н. Шарипов // Экономика сельского хозяйства. Реферативный журнал. – 2011. – № 4. – С. 898. – EDN OJIZCB.

19. ADF - Augmented Dickey Fuller Test - Statistics How To [Electronic resource]. URL: <https://www.statisticshowto.com/adf-augmented-dickey-fuller-test/> (accessed: 02.04.2025).

20. Affenzeller M. et al. Genetic algorithms and genetic programming: modern concepts and practical applications. Taylor & Francis, 2009.

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

22. Agricultural Tractors TD Straddle | New Holland ZA [Electronic resource]. URL: <https://agriculture.newholland.com/en-za/africamiddleeast/products/agricultural-tractors/td-straddle> (accessed: 13.03.2025).

23. Al-Dulaimi Z.S., Al Ubori R.S., Ahmed S.A.H. Effects of Water Stress on Water Consumption, Water Use Efficiency of Different Wheat Varieties // Ecological Engineering & Environmental Technology. Polskie Towarzystwo Inzynierii Ekologicznej (PTIE), 2024. Vol. Vol. 25, iss. 10, № 10. P. 268–281.

24. Ale M.O., Manuwa S.I., Olukunle. Effect of Forward Speed and Drive Wheel on the Performance of a Semi-Automatic Cassava Planter // Achievers journal of scientific research . 2023. Vol. 4, № 2. P. 85–94.

25. Alexey S. IoT in Agriculture: 9 Technology Use Cases for Smart Farming (and

Challenges to Consider). 223AD.

26. Amdneh M.W., Gebul M.A. Determination of water requirement and crop coefficient of wheat crop in Central Ethiopia // *Ethiopian Journal of Crop Science*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 145–160.

27. ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE POWER AND WIDTH OF THE HEADER AND THE EFFICIENCY OF AUTOMATION OF THE WORKING PROCESS OF A GRAIN HARVESTING COMBINE [Electronic resource]. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60781880&pff=1> (accessed: 11.03.2025).

28. Augmented Dickey-Fuller Table | Real Statistics Using Excel [Electronic resource]. URL: <https://real-statistics.com/statistics-tables/augmented-dickey-fuller-table/> (accessed: 02.04.2025).

29. Azizov Z.M. The effect of primary tillage practices on the agrophysical properties of southern Chernozems in the Volga region // *Eurasian Soil Science*. Springer, 2006. Vol. 39. P. 1336–1343.

30. Badua S.A. et al. Ground speed and planter downforce influence on corn seed spacing and depth // *Precis Agric*. Springer, 2021. Vol. 22, № 4. P. 1154–1170.

31. Bayisa G.D. et al. Drainage lysimeter based measurement of water requirement and crop coefficient of bread wheat under semi-arid climate of Melkassa, Ethiopia // *Heliyon*. Elsevier Ltd, 2024. Vol. 10, № 17.

32. Bazzaz M.M. et al. Growth, yield attributes and yield of irrigated spring wheat as influenced by sowing depth // *Open Agric*. Sciendo, 2018. Vol. 3, № 1. P. 72–83.

33. Belaqqiz S. et al. Optimizing the sowing date to improve water management and wheat yield in a large irrigation scheme, through a remote sensing and an evolution strategy-based approach // *Remote Sens (Basel)*. MDPI, 2021. Vol. 13, № 18. P. 3789.

34. Benos L., Tsaopoulos D., Bochtis D. A Review on Ergonomics in Agriculture. Part I: Manual Operations // *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 1905. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 10, № 6. P. 1905.

35. Bochtis D., Sørensen C.A.G., Kateris D. Effectiveness and Efficiency of Agricultural Machinery // *Operations Management in Agriculture*. 2019. 47–78 p.

36. Bochtis D.D., Sørensen C.G.C., Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review // *Biosyst Eng. Elsevier Ltd*, 2014. Vol. 126. P. 69–81.
37. BOLI : Meals and breaks : For Workers : State of Oregon [Electronic resource]. URL: <https://www.oregon.gov/boli/workers/Pages/meals-and-breaks.aspx> (accessed: 15.11.2024).
38. Brandelero E.M. et al. Seeder performance under different speeds and its relation to soybean cultivars yield // *Journal of Agronomy. Asian Network for Scientific Information*, 2015. Vol. 14, № 3. P. 139–145.
39. Case IH Tractors: Farmall C Utility Series [Electronic resource]. URL: <https://www.bandsent.com/agriculture/tractors/tractors-case-ih/farmall-c-series-detail> (accessed: 13.03.2025).
40. CEMIS 1200 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).
41. Clarke G. et al. Management of early sown wheat: soil water requirements for establishment. 2019.
42. Condra C. et al. Influence of planter width, planting speed, and perimeter-to-area ratio on Field efficiency for row crop planters // 2017 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2017. P. 1.
43. Conesa-Muñoz J., Pajares G., Ribeiro A. Mix-opt: A new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment // *Expert Syst Appl. Elsevier*, 2016. Vol. 54. P. 364–378.
44. Demchuk E. V et al. К вопросам совершенствования технологии посева зерновых культур // *Тракторы и сельхозмашины. ECO-Vector LLC*, 2016. Vol. 83, № 6. P. 45–48.
45. Demetriou D., See L., Stillwell J. A parcel shape index for use in land consolidation planning // *Transactions in GIS*. 2013. Vol. 17, № 6. P. 861–882.

46. Disc Plough vs. Disc Harrow: Which Tool to Use and When? [Electronic resource]. 2025. URL: <https://www.patelagroindustries.com/blog/difference-between-disc-plough-and-disc-harrow> (accessed: 28.11.2024).

47. DJI Starts Shipping Eagerly Anticipated Inspire 1 RAW Edition - DJI [Electronic resource]. URL: <https://www.dji.com/newsroom/news/dji-starts-shipping-eagerly-anticipated-inspire-1-raw-edition> (accessed: 12.03.2025).

48. Drone seeding – does it have the edge over down-to-earth techniques? | Australian Plants Society [Electronic resource]. URL: <https://resources.austplants.com.au/stories/drone-seeding-does-it-have-the-edge-over-down-to-earth-techniques/> (accessed: 03.10.2024).

49. Employment standards rules – Hours of work and rest | Alberta.ca [Electronic resource]. URL: <https://www.alberta.ca/hours-work-rest> (accessed: 15.11.2024).

50. Eritrea - Climatology | Climate Change Knowledge Portal [Electronic resource]. URL: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/eritrea/climate-data-historical> (accessed: 05.02.2025).

51. Eritrea climate: average weather, temperature, precipitation [Electronic resource]. URL: <https://www.climatestotravel.com/climate/eritrea> (accessed: 18.01.2023).

52. 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).

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

54. Fan D.K., Shi P. Improvement of Dijkstra's algorithm and its application in route planning // Proceedings - 2010 7th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2010. 2010. Vol. 4. P. 1901–1904.

55. Fan J., Smith A.P. The impact of workload and fatigue on performance // Communications in Computer and Information Science. Springer Verlag, 2017. Vol.

726. P. 90–105.

56. Fessehaye M., Franke J., Brönnimann S. Evaluation of satellite-based (CHIRPS and GPM) and reanalysis (ERA5-Land) precipitation estimates over Eritrea // *Meteorologische Zeitschrift*. Schweizerbart, 2022.

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

58. 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).

59. Fuller W.A.. Introduction to statistical time series. John Wiley & Sons, 1976. P. 470.

60. Griffel L.M. et al. Machinery maneuvering efficiency and perennial crops: Field shape complexity defines the efficiency // *ASABE 2018 Annual International Meeting*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2018.

61. Grisso R.D. et al. Precision farming tools: variable-rate application. Virginia Cooperative Extension, 2011.

62. Gurtner M. et al. Land management in the central highlands of Eritrea: a participatory appraisal of conservation measures and soils in Afdeyu and its vicinity. *Geographica Bernensia*, 2006.

63. Herodowicz-Mleczak K. et al. Estimating soil surface roughness with models based on the information about tillage practises and soil parameters. // *J Adv Model Earth Syst*. John Wiley and Sons Inc, 2022. Vol. 14, № 3.

64. Höffmann M., Patel S., Büskens C. Optimal Coverage Path Planning for Agricultural Vehicles with Curvature Constraints // *Agriculture* 2023, Vol. 13, Page 2112. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Vol. 13, № 11. P. 2112.

65. Houmy K. et al. Agricultural Mechanization in Sub-Saharan Africa : Guidelines for Preparing a Strategy // *Integrated Crop Management*. 2013. Vol. 22. 105 p.

66. <https://www.technika->

ma.ru/storage/2024/05/17/7eaa74e545cc45e5722e7871a424592bdcead0dc.pdf
[Electronic resource].

67. Huang H. et al. A Multiregional Agricultural Machinery Scheduling Method Based on Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm // *Agriculture* 2023, Vol. 13, Page 1042. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Vol. 13, № 5. P. 1042.

68. Huang S., Islam M.U., Jiang F. The effect of deep-tillage depths on crop yield: A global meta-analysis // *Plant Soil Environ. Czech Academy of Agricultural Sciences*, 2023. Vol. 69, № 3. P. 105–117.

69. Huang S., ISLAM U.L., Jiang F. The effect of deep-tillage depths on crop yield: A global meta-analysis. // *Plant Soil Environ.* 2023. Vol. 69, № 3.

70. Ivančan S., Sito S., Fabijanić G. Effect of precision drill operating speed on the intra-row seed distribution for parsley // *Biosyst Eng.* 2004. Vol. 89, № 3. P. 373–376.

71. Janulevičius A. et al. Estimation of farm tractor performance as a function of time efficiency during ploughing in fields of different sizes // *Biosyst Eng. Academic Press*, 2019. Vol. 179. P. 80–93.

72. Jensen M.F., Bochtis D., Sørensen C.G. Coverage planning for capacitated field operations, part II: Optimisation // *Biosyst Eng. Academic Press*, 2015. Vol. 139. P. 149–164.

73. Josephinum F. SUMMARY OF OECD TEST 2426–NEBRASKA SUMMARY 627 NEW HOLLAND T7060 DIESEL 19 SPEED. 2007. № 6.

74. Kahlown M.K. et al. Determination of crop water requirement of major crops under shallow water-table conditions // *Pakistan Council of Research in Water Resources*, Islamabad. 2003.

75. Katerji N., Rana G. FAO-56 methodology for determining water requirement of irrigated crops: critical examination of the concepts, alternative proposals and validation in Mediterranean region // *Theor Appl Climatol.* Springer, 2014. Vol. 116. P. 515–536.

76. Khadka K. et al. A Physio-Morphological Trait-Based Approach for Breeding Drought Tolerant Wheat // *Frontiers in Plant Science.* Frontiers Media S.A., 2020. Vol. 11.

77. Kirkegaard Nielsen S. et al. Seed drill depth control system for precision seeding // *Comput Electron Agric.* Elsevier B.V., 2018. Vol. 144. P. 174–180.

78. Kiru O.K. The agricultural mechanization in Africa: micro-level analysis of state, drivers and effects // 6th African Conference of Agricultural Economists. Abuja, Nigeria Copyright: Research in agricultural & applied economics, 2019. P. 1–30.

79. Kurok O. et al. Applying ploughs for determining the optimal depth of soil cultivation: the development of the scientific views // *Revista Amazonia Investiga.* Editorial Primmate, 2023. Vol. 12, № 62. P. 327–335.

80. Kutz M. Handbook of farm, dairy and food machinery engineering. Academic Press, 2019.

81. Laryushin N.P. et al. Innovative seed planter implements for resource-saving sowing technologies // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* IOP Publishing Ltd, 2022. Vol. 953, № 1.

82. Li Y. et al. Evaluation of Agricultural Machinery Operational Benefits Based on Semi-Supervised Learning // *Agriculture (Switzerland).* MDPI, 2022. Vol. 12, № 12.

83. Liu T. et al. Evaluation of seed emergence uniformity of mechanically sown wheat with UAV RGB imagery // *Remote Sens (Basel).* MDPI, 2017. Vol. 9, № 12. P. 1241.

84. Lu Y. et al. Optimal Sowing Windows under Rainfall Variability in Rainfed Agriculture in West Africa // *Agronomy* 2023, Vol. 13, Page 167. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023. Vol. 13, № 1. P. 167.

85. Marco NDOMBA P. Development of Rainfall Curves for Crops Planting Dates: A Case Study of Pangani River Basin in Tanzania // *Nile Basin Water Science & Engineering Journal.* 2010. Vol. 3.

86. Mašek J., Pálková A., Bulková Z. Application of the Clark–Wright Method to Improve the Sustainability of the Logistic Chain // *Applied Sciences (Switzerland).* Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 2024. Vol. 14, № 21. P. 9908.

87. Mathison C. et al. Estimating sowing and harvest dates based on the Asian summer monsoon // *Earth System Dynamics.* Copernicus GmbH, 2018. Vol. 9, № 2.

P. 563–592.

88. Matsuura S. Bayes estimator of process capability index Cpk with a specified prior mean // *Commun Stat Theory Methods*. Taylor and Francis Ltd., 2023. Vol. 52, № 7. P. 2215–2227.

89. Mawunya F. et al. Characterisation of Seasonal Rainfall for Cropping Schedules // *West African Journal of Applied Ecology*. 2011. Vol. 19, № 1.

90. Measho S. et al. Spatio-temporal analysis of vegetation dynamics as a response to climate variability and drought patterns in the Semiarid Region, Eritrea // *Remote Sens (Basel)*. 2019. Vol. 11, № 6.

91. Meskelu E., Woldemichael A., Hordofa T. Effect of moisture stress on yield and water use efficiency of irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.) at Melkassa, Ethiopia // *Acad. Res. J. Agri. Sci. Res*. 2017. Vol. 5, № 2. P. 90–97.

92. Miu P.I., Kutzbach H.D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units-Part I // *Comput Electron Agric*. 2008. Vol. 60, № 1. P. 96–104.

93. Montgomery D.C. Introduction to Statistical Quality Control. Seventh Edition. New York City: Wiley, 2013. 1–754 p.

94. Munna M.A. et al. Site-specific seeding using multi-sensor and data fusion techniques: A review // *Advances in Agronomy*. Academic Press Inc., 2020. Vol. 161. P. 241–323.

95. Ogbazghi W., Brigitta S., Karl H. Sustainable Land Management A textbook with a focus on Eritrea First edition. Bern: Geographica Bernensia , 2011.

96. Oksanen T. Path planning algorithms for agricultural field machines. Helsinki University of Technology, 2007.

97. Oksanen T. Shape-describing indices for agricultural field plots and their relationship to operational efficiency // *Comput Electron Agric*. Elsevier B.V., 2013. Vol. 98. P. 252–259.

98. Optimizing Field Traffic Patterns to Improve Machinery Efficiency: Path Planning Using Guidance Lines | Ohioline [Electronic resource]. URL: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-5531> (accessed: 11.03.2025).

99. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // *Automatica*. 1975. Vol. 11, № 285–296. P. 23–27.
100. Our history - Househam Sprayers [Electronic resource]. URL: <https://househamsprayers.co.uk/about/our-history/> (accessed: 03.10.2024).
101. Pan W., Wang J., Yang W. A Cooperative Scheduling Based on Deep Reinforcement Learning for Multi-Agricultural Machines in Emergencies // *Agriculture* 2024, Vol. 14, Page 772. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. Vol. 14, № 5. P. 772.
102. 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 // *Comput Electron Agric*. Elsevier B.V., 2018. Vol. 152. P. 393–400.
103. Petukhova M.S. Innovative development of the Russian grain sector // *Russian Journal of Economics*. 2022. Vol. 8. P. 49–59.
104. 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).
105. 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).
106. Quality of field work ★ Arable farming [Electronic resource]. URL: <https://universityagro.ru/en/arable-farming/evaluation-of-the-quality-of-fieldwork/?ysclid=m8c8e9q6ct519827799#Plowing> (accessed: 19.03.2025).
107. Radočaj D. et al. A Low-Cost Global Navigation Satellite System Positioning Accuracy Assessment Method for Agricultural Machinery // *Applied Sciences*. Applied sciences, 2022. Vol. 12, № 2. P. 693–693.
108. Raes D. et al. Evaluation of first planting dates recommended by criteria currently used in Zimbabwe // *Agric For Meteorol*. 2004. Vol. 125, № 3–4. P. 177–185.
109. Rena R. Agriculture development and food security policy in Eritrea-an analysis // *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*. 2007.

Vol. 7, № 5.

110. Rest Breaks & Meal Periods [Electronic resource]. URL: <https://www.lni.wa.gov/workers-rights/agriculture-policies/rest-breaks-and-meal-periods> (accessed: 15.11.2024).

111. Rodias E. et al. Energy savings from optimised in-field route planning for agricultural machinery // Sustainability. MDPI, 2017. Vol. 9, № 11. P. 1956.

112. Sallinen M., Hublin C. Fatigue-Inducing Factors in Transportation Operators // Reviews of Human Factors and Ergonomics. SAGE Publications Inc., 2015. Vol. 10, № 1. P. 138–173.

113. Samuel B. Farm Mechanization in Eritrea. Amara, 2007.

114. Šarauskis E. et al. Variable Rate Seeding in Precision Agriculture: Recent Advances and Future Perspectives // Agriculture (Switzerland). MDPI, 2022. Vol. 12, № 2.

115. Šarauskis E., Sokas S., Rukaitė J. Variable Depth Tillage: Importance, Applicability, and Impact—An Overview // AgriEngineering 2024, Vol. 6, Pages 1870-1885. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. Vol. 6, № 2. P. 1870–1885.

116. Seeding depth | UMN Extension [Electronic resource]. URL: <https://extension.umn.edu/planting-small-grains/how-deep-do-i-drill-wheat-barley> (accessed: 24.02.2025).

117. Sharaby N. et al. A comparative analysis of precision seed planters // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. Vol. 135.

118. Srivastava A. et al. Engineering principles of agricultural machines. second / ed. Peg McCann. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.

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

120. Sułek A., Ogórkiewicz M. Impact of sowing depth and seed size on the dynamics of germination and productivity of spring wheat // Polish Journal of Agronomy. 2020. № 43. P. 63–69.

121. Tesfamichael F., Tripathi R.P., Tesfai M. Irrigation and Nitrogen Requirements of Wheat under Shallow Water Table Conditions of Asmara, Eritrea // Journal of Geoscience and Environment Protection. Scientific Research Publishing, 2016. Vol. 4, № 4. P. 80–87.
122. The Eritrean Crops and Livestock Corporation (ECLC) Progressing Production [Electronic resource]. URL: <https://tesfanews.net/eritrea-crops-livestock-corporation-progressing-production/> (accessed: 21.01.2023).
123. Toba A.L., Griffel L.M., Hartley D.S. Devs based modeling and simulation of agricultural machinery movement // Comput Electron Agric. 2020. Vol. 177, № August.
124. Toscano P. et al. Workability Assessment of Different Stony Soils by Soil–Planter Interface Noise and Acceleration Measurement // AgriEngineering. MDPI, 2022. Vol. 4, № 4. P. 1139–1152.
125. TractorData.com Hesston 80-66 tractor information [Electronic resource]. URL: <https://www.tractordata.com/farm-tractors/006/0/7/6076-hesston-80-66.html> (accessed: 12.03.2025).
126. TractorData.com Massey Ferguson 393 tractor information [Electronic resource]. URL: <https://www.tractordata.com/farm-tractors/000/8/0/802-massey-ferguson-393.html> (accessed: 13.03.2025).
127. TractorData.com New Holland T7030 tractor information [Electronic resource]. URL: <https://www.tractordata.com/farm-tractors/005/4/7/5474-new-holland-t7030.html> (accessed: 13.03.2025).
128. TractorData.com New Holland T8040 tractor dimensions information [Electronic resource]. URL: <https://www.tractordata.com/farm-tractors/005/4/8/5482-new-holland-t8040-dimensions.html> (accessed: 13.03.2025).
129. Trimble RTX Frequently Asked Questions TRANSFORMING THE WAY THE WORLD WORKS [Electronic resource]. 2019.
130. User Manual INSPIRE RAW. 2017.
131. Utamima A., Reiners T. Navigating route planning for multiple vehicles in multifield agriculture with a fast hybrid algorithm // Comput Electron Agric. Elsevier,

2023. Vol. 212. P. 108021.

132. Vahdanjoo M., Sorensen C.G. Novel Route Planning Method to Improve the Operational Efficiency of Capacitated Operations. Case: Application of Organic Fertilizer // *AgriEngineering* 2021, Vol. 3, Pages 458-477. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Vol. 3, № 3. P. 458–477.

133. View of A Travelling Salesman Problem Approach to Efficiently Navigate Crop Row Fields with a Car-Like Robot [Electronic resource]. URL: <https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/7751/1933> (accessed: 19.03.2025).

134. Virk S.S. et al. Row-crop planter performance to support variable-rate seeding of maize // *Precis Agric.* Springer, 2020. Vol. 21, № 3. P. 603–619.

135. Wang Y. et al. Effect of Vibration Conditions on the Seed Suction Performance of an Air-Suction Precision Seeder for Small Seeds // *Agriculture* 2024, Vol. 14, Page 559. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. Vol. 14, № 4. P. 559.

136. Wheat Irrigation Requirements and Methods | Wikifarmer [Electronic resource]. 2025. URL: https://wikifarmer.com/library/en/article/wheat-irrigation-requirements-and-methods?utm_source=chatgpt.com (accessed: 08.03.2025).

137. Wu C.-W., Pearn W.L., Kotz S. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance // *Int J Prod Econ.* 2009. Vol. 117, № 2. P. 338–359.

138. YTO group corporation. YTO-tractor-catalogue. United Agro, 2021.

139. Yuzenko Y.A. et al. Method for assessing the performance of agricultural machinery // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Institute of Physics, 2022. Vol. 1045, № 1.

140. Zewenghel G. et al. Land Management in the Central Highlands of Eritrea A Participatory Appraisal of Conservation Measures and Soils in Afdeyu and its Vicinity Mats Gurtner // *Umschlag.qxd.* 2006. Vol. 28. P. 18–19.

141. Zhang G. et al. Study on path planning of mechanized harvesting of ratoon rice in the first season based on the capacitated arc routing problem model // *Front*

Plant Sci. Frontiers Media S.A., 2022. Vol. 13. P. 963307.

142. Zhang Y., Hu Y., Xu Y. Agricultural Machinery Automatic Navigation Path Planning Based on Shortest Path Algorithm with Turning Delay // Pakistan Journal Agricultural Sciences. 2021. Vol. 61, № 2. P. 713–724.

143. Zhou K. et al. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas // Comput Electron Agric. Elsevier B.V., 2014. Vol. 109. P. 12–22.

144. Zhou K., Bochtis D. Route Planning For Capacitated Agricultural Machines Based On Ant Colony Algorithms. 2015.

145. Zubina V.A. Justification of priority factors affecting the efficiency of the tractor fleet.

Приложение 1

Таблица 1.6. Технология производства зерна пшеница в Эритреи

Процесс	Операция	Технологические параметры	Сроки	Техника
Обработка новой почвы	Основная обработка почвы	На 20-22 см без огрехов с полной запашкой стерни	за 10-14 дней до предпосевной обработки	Дисковые плуги
основные внесения удобрений	1. Погрузка навоза из хранилища 2. Транспортировка Разбрасывание	Навоз или торфнавозные компосты в дозе 20-30 т/га (в зависимости от предшественника вносятся): Чистый пар	Под перепашку пара	Навозоразбрасыватель погрузчики машины для внесения органических удобрений
Подготовка семян к посеву	1. Сушка на открытом воздухе 2. Простое протравливание семян	Семена должны быть 99% чистыми; примеси других растений не более 10 штук, в том числе сорняков не более 5 штук на 1 кг семян; всхожесть 95%; содержание влаги не более 15,5%.	перед посевом	Традиционный Оборудование для инкрустирования и протравливания
Посев	1. Посев 2. Загрузка семян 3. Транспортные средства	Обычный посев, рядовой (с междурядьями 15 см). Глубина посева семян (в зависимости от влажности почвы и механического состава): на влажной суглинистой 3–4 см, на сухой песчаной 5–6 см. Норма высева 4-5 млн всх. зерен на 1 га (нормасева изменяется от способа посева, плодородия почвы)	В оптимальные сроки	
			25.05–30.05;	Погрузчики, автомобили, загрузчики сеялок Сеялка и ручная браудкастинг
Борьба с сорняками	Опрыскивание сельскохозяйственных культур: доставка химикатов к месту подготовки, приготовление рабочего раствора или баковых смесей и их внесение	кущение.		Оборудование для приготовления рабочих растворов: заправщики, распылители.
Защита от болезней	На загрязненных территориях			Оборудование для приготовления рабочих растворов, автоцистерны-наполнители, опрыскиватели.

Защита от вредителей	Инсектициды		В течение вегетационного периода при превышении порога вредоносности	Оборудование для приготовления рабочих растворов, цистерны-дозаторы, распылители
Сбор урожая	Скашивание посевов	За несколько дней до начала сбора урожая		
	Накопление и транспортировка зерна	Разгрузка непосредственно в транспортные средства	Во время сбора урожая	Автомобили
	Уборка соломы	Уборка целой или измельченной соломы (в зависимости от конфигурации комбайна со стогометателями, измельчителями или валкообразователями)	После сбора урожая зерновых	Машины для уборки незерновой части урожая
Послеуборочная обработка зерна	1. Взвешивание 2. Первичная очистка 3. Сушка зерна	Очистка от первичных примесей. Сушка зерна активным вентилированием или для длительного хранения (соблюдение специальных режимов при сушке семян).		Автомобильные весы. Машины первичной очистки, установки активного вентилирования и бункеры, стационарные и мобильные сушилки. Машины для вторичной очистки зерна.
	4. Вторичная очистка зерна	Приведение зерна к стандартным параметрам по содержанию посторонних включений.		Машины для вторичной очистки зерна.
	5. Подготовка семенного зерна	Доведение семян до стандартных параметров.		Насадки для очистки семян.
	6. Проверка качества зерна	По специальной методике с проверкой влажности, засоренности, качества (содержание клейковины и т.д.).		Набор инструментов.
	7. Погрузка и транспортировка зерна на хранение или на элеватор			Зернопогрузчики, автомобили, тракторы, тележки.
Хранение зерна	Размещение зерна на хранение		После очистки	
Подготовка зерна к продаже	Упаковка в контейнеры, погрузка и транспортировка		В соответствии с запросом клиента	

Приложение 2

Таблица 3.6. Краткие технические характеристики орудий и тракторов

Осуществлять	Модель	Ширина орудия, м	Глубина обработки, см	Диаметр диска, мм	Количество	Макс. потребляемая мощность, кВт	Вес, кг	Соответствующий трактор	Мощность тягового крюка, кВт	средняя рабочая скорость км/ч	производительность поля га/ч
Дисковый плуг	PD70F	1,3	25	65	5	94,33	825	Новая голландия Т7060	97,48	9	0,4875
Дисковый плуг	TD70E	0,8	25	66	3	60,03	535	Новая голландия Т6090	97,48	12	0,585
Дисковый плуг	Китай LYQ (Т) 325	0,75	25	66	3	55,74	420	Новая голландия Т6050	90,51	7	0,3
Дисковый плуг	Китай Q (Т) 320	0,8	25	65	3	47,17	465	Новая голландия Т6050	90,51	7	0,28125
Дисковая борона	20FVPT-61	2,3	20	610	20	68,60	1070	Форгусон 465 (4wd)	55,71	5	0,3
Дисковая борона	24FVPT-61	2,75	20	610	24	94,33	1232	Новая голландия Т6050	90,51	7	1,7
Дисковая борона	28НОРЕ	3,2	20	610	28	94,33	1345	Новая голландия Т7060	97,48	9	1,309
Дисковая борона	44FC1230 GP	5	30	660	24	235,83	4030	Новая голландия Т7060	97,48	9	1,5232
Дисковая борона	Т 430	3	16	560	26	111,48	1250	Новая голландия Т6090	102,71	12	2,2
Сеялка	DORA 600	6			40	94,33	1178	Новая голландия Т6090	102,71	12	5,4

Приложение 3

Таблица 4.8. Группировка распределения использования времени МТА

Даты проведения (2023-07)	T ₁				T ₂					T ₃					T ₄	
	Время завтрака оператора	Персональное время остановки оператора	Перерыв оператора (обед)	Время в пути от гаража до поля и обратно	Время, затраченное техническим специалистом на проверку всех трубок и принадлежностей	Проверка и прогрев двигателя	Время ожидания в очереди на заправку	Время заправки топливом	Время простоя между окончанием заправки топливом и выездом на поле	Время поворота T _{H2i}	*Время обслуживания T _{H23i}	Время ремонта (мелкий ремонт, который может быть	Время повторного заполнения бункера	**Холостой ход в пределах поля T _{H2i}	Основное время выполнения T _{H1i}	время окончания полосы поворота
03	0,00	0,58	0,26	0,50	1,35	0,74	0,00	0,08	0,09	1,48	1,95	0,00	0,76	0,27	2,34	0,13
04	0,00	0,00	0,00	0,54	0,27	0,23	0,00	0,08	0,11	0,94	1,95	3,44	0,33	0,88	1,32	0,10
05	0,09	0,17	1,02	0,77	0,60	0,20	0,18	0,06	0,45	1,12	1,05	3,54	0,71	0,26	1,79	0,00
06	0,53	0,00	0,00	0,60	1,00	0,17	0,00	0,11	0,06	0,85	0,68	3,71	0,68	0,36	1,52	0,08
07	0,00	0,13	0,00	0,26	1,50	0,29	0,30	0,08	0,67	1,49	0,82	1,98	1,15	0,30	2,15	0,12
08	0,00	1,63	0,94	0,37	1,82	0,05	0,02	0,05	0,40	1,25	0,55	0,03	0,55	0,31	2,39	0,09
09	0,00	0,00	0,00	0,55	0,75	0,07	0,11	0,10	0,12	1,15	0,69	1,71	0,99	0,45	2,75	0,02
10	0,00	0,00	0,15	0,64	0,27	0,09	0,17	0,08	0,19	1,28	1,30	1,05	0,62	1,09	2,74	0,03
Итг,	0,62	2,51	2,36	4,23	7,56	1,84	0,77	0,63	2,09	9,56	8,98	15,47	5,79	3,92	16,99	0,58

*проверка на наличие незначительных неисправностей, таких как засорение системы подачи семян и/или демонтаж трубки и их устранение, проверка уровня семян ... и т.д. **внутри участка + между участками + для заправки бункера