

УДК 631.15

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике (физико-математические науки, экономические науки)

### **ИНСТРУМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ УБОРКЕ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ**

Омельченко Ирина Николаевна  
доктор технических и доктор экономических наук,  
профессор, руководитель научно-учебного  
комплекса "Инженерный бизнес и менеджмент",  
декан факультета "Инженерный бизнес и  
менеджмент", заведующая кафедрой  
"Промышленная логистика" МГТУ им. Н.Э.  
Баумана.  
SPIN-код: 7548-0546  
<https://orcid.org/0000-0003-4707-1079>  
Scopus Author ID: 57191032378  
[logistic@bmstu.ru](mailto:logistic@bmstu.ru)

Миренков Андрей Сергеевич  
студент 4 курса бакалавриата  
<https://orcid.org/0009-0001-5451-5195>  
[andremirenkov@yandex.ru](mailto:andremirenkov@yandex.ru)  
*ФГБОУ ВО «Московский Государственный  
Технический Университет Имени Н.Э. Баумана  
(Национальный Исследовательский Университет),  
2-я Бауманская ул., 5, стр. 4, Москва, 105005,  
Россия*

В статье представлена разработка системы поддержки принятия решений в процессе организации уборки зерна озимой пшеницы. Цель статьи – разработка эффективной системы поддержки принятия решений, которая позволяет в оперативном режиме осуществлять привязку различных по своим возможностям уборочных комплексов и транспортных единиц к каждому полю, назначенному для уборки, с целью минимизации общих потерь от простоя техники при наличии ограничений по количеству доступных транспортных средств. Этот инструмент минимизирует общие потери, обусловленные простоем уборочной техники из-за несбалансированности возможностей комбайнов, транспортах единиц и пунктов разгрузки зерна. Данный механизм состоит из комбинации двух моделей: модели имитационного моделирования и модели оптимизации на основе линейного программирования. Имитационная модель была проверена на основе полевых испытаний. Имитационная модель генерирует ряд результатов, касающихся общего времени простоев уборочной техники и транспортных средств. Эта модель также прогнозирует комплексную величину потерь из-за простоев техники для различной конфигурации выделенных уборочных комплексов

UDC 631.15

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in economics (physical and mathematical sciences, economic sciences)

### **A TOOL FOR WINTER WHEAT HARVESTING LOGISTICS OPTIMIZATION**

Omelchenko Irina Nikolaevna  
Doctor of technical and Doctor of economic sciences,  
professor, Head of the Scientific and Educational  
Centre for Engineering Business and Management,  
Dean of the Faculty of Engineering Business and  
Management, Head of the Department of Industrial  
Logistics at Bauman Moscow State Technical  
University  
RSCI SPIN-code: 7548-0546  
<https://orcid.org/0000-0003-4707-1079>  
Scopus Author ID: 57191032378  
[logistic@bmstu.ru](mailto:logistic@bmstu.ru)

Mirenkov Andrey Sergeevich  
4th year undergraduate student  
<https://orcid.org/0009-0001-5451-5195>  
[andremirenkov@yandex.ru](mailto:andremirenkov@yandex.ru)  
*Bauman Moscow State Technical University, ul.2-ya  
Baumanskaya, 5, building 4, Moscow, 105005, Russian  
Federation*

The article discusses the decision support system development for the organization of winter wheat harvesting. The purpose of the article (research work) is to develop an effective decision support system that allows on-linking harvesting complexes and transport units of various capabilities to each field assigned for harvesting in order to minimize the overall losses from equipment downtime under constraints on the number of available vehicles. This tool minimizes the overall losses caused by downtime of harvesting equipment due to an imbalance in the capabilities of harvesters, transport units and grain unloading points. This mechanism consists of a combination of two models: a simulation model and an optimization model based on linear programming. The simulation model has been validated through field trials. The simulation model generates a set of results regarding the total downtime of harvesting equipment and vehicles. This model also predicts the complex value of losses due to equipment downtime for various configurations of dedicated harvesting complexes and transport units based on the characteristics of the equipment and field, which are used for creating the loss matrix. The research work demonstrates the capabilities of both a simulation model, as a separate tool, and a complete decision support tool. The tool provides practical time loss measures that take into account the interaction of

и транспортных единиц на основе характеристик техники и поля, которые используются для построения матрицы потерь. В исследовательской работе демонстрируются возможности как имитационной модели, в качестве отдельного инструмента, так и полного инструмента поддержки принятия решений. Инструмент предоставляет практические меры оценки потерь времени, которые учитывают взаимодействие различных частей рабочей цепи, и его можно легко настроить для операций уборки других культур

different work chain parts, and could be easily customized for harvesting other crops

Ключевые слова: ЗАТРАТЫ, ЛИНЕЙНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ, ЛОГИСТИКА УБОРКИ УРОЖАЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ, СОКРАЩЕНИЕ ПРОСТОЕВ

Keywords: COSTS, HARVESTING LOGISTICS, LINEAR PROGRAMMING MODELING, OPTIMIZATION, REDUCTION OF DOWNTIME

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-188-019>

## **Введение.**

В процессе хозяйственной деятельности аграрные предприятия чаще всего ориентируются на собственный парк сельскохозяйственных машин. Это позволяет сохранять независимость от наличия или отсутствия предложения услуг по проведению работ от сторонних лиц, поскольку в биотехнологическом производстве нет возможности отложить или выполнить заранее ту, или иную технологическую операцию.

Неравномерность сельскохозяйственного цикла, когда большинство хозяйственных операций выполняется в теплое время года, влечет невозможность планировать парк техники исходя из пиковой потребности. В результате часть работ выполняется в условиях дефицита рабочих машин. Особенно нехватка проявляется во время уборочного процесса, когда из-за недостаточного парка грузовых автомобилей возникают простои комбайнов. Следствие - существенные потери зерна из-за его осыпания при выходе за оптимальные сроки уборки. При этом стоит отметить, что сельскохозяйственные организации только в крайнем случае прибегают к привлечению сторонних машин в момент уборки из-за того,

что в этот период они обходятся очень дорого, поройкратно дороже стоимости собственного транспорта и комбайнов.

Существует значительное число отечественных и иностранных работ, посвященных проблеме уборочной логистики. Изучены вопросы планирования маршрутов для транспортных единиц (Vochtis, D. и др.) [4], последовательного планирования операций по сбору урожая и погрузочно-разгрузочным работам (Orfanou, A. и др.) [3], использования промежуточных накопителей зерна (Лунякин В.Н.) [5], имитационные модели для прогнозирования затрат на сбор урожая (Amiata, C и др.) [1-2]. Вместе с тем предложенные исследователями подходы требуют адаптации к конкретным производственно-хозяйственным задачам, возникающим у сельскохозяйственных организаций.

В данной работе описано применения комбинации имитационной и оптимизационной моделей для решения задачи неравномерного распределения ограниченного парка транспортных машин между уборочными комплексами и полями.

Статья организована следующим образом: сначала представлена разработка инструмента. В разделе «Материалы и методы» описываются полевые испытания, проведенные для получения входных данных инструмента, а также проверки модели. В последней части этого раздела определяется серия сценариев, которые были запущены для демонстрации функциональности и производительности инструмента. В разделе результатов представлены все связанные результаты по количественному определению входных параметров, проверке имитационной модели и проанализированы демонстрационные сценарии. Наконец, в разделе «Выводы» обсуждаются основные выводы и новые идеи работы.

### **Разработка модели.**

**Обзор инструмента.** Рассматриваемая задача может быть описана в компактной форме следующим образом: задан ряд полей с

индивидуальными характеристиками (площадь, удаленность от складов, урожайность) и система машин (характеристики комбайнов, пунктов разгрузки, транспортных машин и максимальное количество доступных транспортных единиц). Цель – наиболее эффективно распределить имеющийся набор транспортных средств (ТС), чтобы минимизировать потери в цепочке уборка-транспортировка-приемка. Для объяснения влияния дополнительных транспортных единиц на снижение потерь в уборочной цепи, транспортные единицы считаются идентичными по своей грузоподъемности и скорости движения.

Для моделирования упомянутой выше задачи в общем виде расстояние от поля до пункта разгрузки и урожайность рассматривались как дискретные величины. Обозначим как  $D = \{1, 2, 3, \dots\}$  множество различных значений расстояния от поля до пункта разгрузки и  $Y = \{1, 2, 3, \dots\}$  множество различных уровней урожайности. Набор  $A = \{A_{ij} / i \in D, j \in Y\}$  есть набор подлежащих уборке полей, характеризующихся показателями удаленности поля от пункта разгрузки и уровнем урожайности. Обозначим через  $U_{\max}$  максимальное количество доступных транспортных единиц, а через  $H_{\max}$  максимальное количество уборочных комплексов. Исходя из изложенного генерируются потенциально возможные уборочные цепочки, количество которых равно  $|D| \cdot |Y| \cdot H_{\max} \cdot U_{\max}$ . Каждая рабочая цепочка характеризуется четырьмя признаками, а именно расстоянием от поля до пункта разгрузки  $d_i$ , где  $i \in D$ , урожайностью  $y_j$  где  $j \in Y$ , характеристиками комплекса уборочных агрегатов  $h_k$ ,  $k \in \{1, \dots, H_{\max}\}$  и количеством выделенных транспортных единиц  $u_l$ ,  $l \in \{1, \dots, U_{\max}\}$ .

Для решения задачи был использован подход, включающий два основных процесса, а именно моделирование и оптимизация на основе линейного программирования. Имитационная модель на основании

входных данных выполняет моделирование для каждой рабочей цепи, генерируя матрицу затрат, связанных с простоем транспортных и уборочных единиц. Каждый элемент матрицы затрат  $c_{ijkl}$  представляет стоимость потерь, связанных с простоем техники в день для конкретной рабочей цепочки. Эта матрица обеспечивает ввод для последующего процесса линейного программирования.

Задачу линейного программирования можно сформулировать следующим образом: при заданном наборе убираемых площадей и стоимости потерь от простоев найти оптимальное распределение имеющихся комплексов уборочных агрегатов по полям и оптимальное количество транспортных единиц, которые должны быть закреплены за каждым комплексом для минимизации общих потерь от простоя техники.

**Имитационная модель.** Логистические операции уборки зерна включают три операции, выполняемые как параллельно, так и последовательно. Сбор зерна осуществляется зерноуборочным комбайном, который представляет собой первичную единицу для операции. Зерноуборочные комбайны оборудованы бункером, позволяющим комбайну продолжать работу в течение некоторого периода времени (около 15-30 минут) без присутствия транспортной единицы. После заполнения бункера комбайн должен произвести выгрузку в транспортное средство, либо будет вынужден простаивать в ожидании порожней транспортной единицы.

Прерывание работы комбайна влечет за собой высокие затраты, связанные в первую очередь с осыпанием зерна в случае выхода за пределы оптимальных сроков уборки. Потери могут составлять до 1,1% в день (около 1 ц зерна с га.) [7]. Потому определенное количество транспортных единиц должно быть доступно, в зависимости от расстояния от поля до пункта разгрузки, чтобы сократить время цикла работы

комбайна, не допуская перерывов в его работе. С другой стороны, излишний парк транспортных машин приводит к ненужному увеличению эксплуатационных расходов.

Зерно транспортируется транспортными машинами на место разгрузки для его доработки и хранения. Транспортная задача разделена на ряд временных элементов, в том числе: переезд пустым к полю, ожидание загрузки на краю поля, загрузка, движение с полной загрузкой к месту разгрузки, маневрирование на территории пункта разгрузки и разгрузка.

Рисунок 1 иллюстрирует процесс моделирования уборки зерна в IDEF – методологии [6].

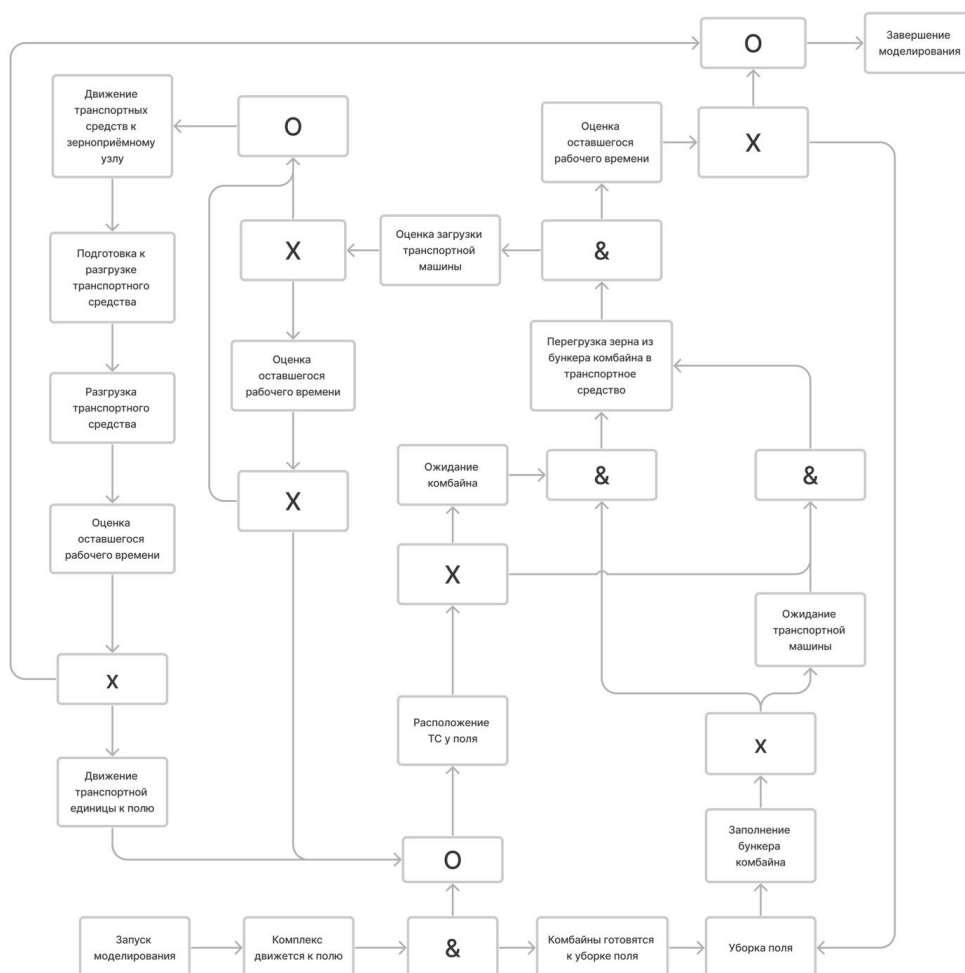


Рисунок 1 - Технологическая схема IDEF имитационной модели. Для соединений IDEF3 асинхронное И (&): все предшествующие (последующие) действия должны быть завершены (начать); асинхронное

ИЛИ (О): одно или несколько предшествующих (последующих) действий должны быть завершены (начать); исключающее ИЛИ (X): завершено (начато) ровно одно предшествующее (последующее) действие.

**Модель оптимизации.** Для моделирования задачи как задачи линейного программирования определяются переменные решения, а именно:

-  $a_{ijkl} \in \{0,1\}$ , которая определяет будет ли поле  $A_{ij}$ ,  $i \in D$ ,  $j \in Y$  убираться комплексом  $H_k$ ,  $k \in \{1, \dots, h_{max}\}$  при поддержке  $l \in \{1, \dots, u_{max}\}$  транспортных единиц.

Задачу можно сформулировать следующим образом:

Минимизировать:

$$C = \sum_{i=1}^{|D|} \sum_{j=1}^{|Y|} \sum_{k=1}^{h_{max}} \sum_{l=1}^{u_{max}} a_{ijkl} * c_{ijkl} \quad (1)$$

при условии:

$$\sum_{k=1}^{h_{max}} \sum_{l=1}^{u_{max}} a_{ijkl} = 1, \quad \forall i \in D, j \in Y \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{|D|} \sum_{j=1}^{|Y|} \sum_{l=1}^{l_{max}} a_{ijkl} = 1, \quad \forall k \in \{1, \dots, H_{max}\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{|D|} \sum_{j=1}^{|Y|} \sum_{k=1}^{h_{max}} \sum_{l=1}^{u_{max}} a_{ijkl} * l \leq U_{max} \quad (4)$$

Первое ограничение гарантирует, что каждое запланированное под уборку поле получит назначенный уборочный комплекс, второе ограничение гарантирует, что каждый уборочный комплекс получит назначенное поле, а третье ограничение обеспечивает, что число задействованных транспортных единиц не превысит их максимальное количество.

**Реализация системы.** Дискретная имитационная модель была разработана с помощью высокоуровневого языка программирования



Python. Для проведения оптимизации линейного программирования использовался пакет MS Excel «Поиск решений».

### **Материалы и методы.**

**Количественная оценка входных данных.** Для количественной оценки входных параметров моделирования была проведена серия полевых испытаний в ОАО «Дружба» (Краснодарский край) на четырех участках.

Параметры, которые были измерены в полевых испытаниях, включали: рабочую скорость комбайна, время выгрузки бункера, скорость движения транспортной единицы с полной загрузкой, скорость движения порожней транспортной единицы, время выгрузки транспортной единицы на пункте разгрузки.

Кроме того, при проверке инструмента также были измерены размеры каждого поля, расстояние от поля до места разгрузки и урожайность каждого поля.

**Проверка имитационной модели.** Три из четырех областей, где проводились полевые испытания (участки №1, №2 и №3), использовались для количественной оценки входных данных. Эти входные данные использовались на следующем этапе для моделирования операции на четвертом участке (участок №4). Фактические выходные параметры, отслеживаемые во время полевых испытаний, сравнивались с выходными параметрами моделирования.

**Сценарии смоделированных экспериментов.** Для демонстрации и анализа функциональных возможностей модуля моделирования была проведена серия моделируемых экспериментов. Смоделированные эксперименты касаются операций на площади 1375 га, состоящих из 10 полей (табл.1), расположенных на различном удалении от пункта разгрузки. В контролируемых операциях использовались характеристики



существующих в ОАО «Дружба» машин, например, ширина захвата жатки, объем бункера комбайна, грузоподъемность транспортных средств и т.д. При моделировании были сделаны расчёты для 3-х уборочных комплексов, каждый из которых состоял из похожих по основным характеристикам (рабочая скорость, ширина жатки, объем бункера) машин (табл. 2).

Таблица 1- Перечень полей, для которых делалось имитационное моделирование

№ поля	Площадь поля, га	Расстояние до поля, км	Урожайность зерна, ц/га
4/01	163	14.8	69
4/05	178	3.4	85
4/06	217	7.3	74
4/08	168	9.2	72
4/20	85	9.8	56
4/22	85	10.3	74
4/25	138	12.0	69
4/28	85	10.8	77
4/29	145	11.3	58
4/32	111	10.5	66

Таблица 2 - Уборочные комплексы

№ комплекса	Число машин, шт.	Ширина захвата жатки, м	Объем бункера, кг	Рабочая скорость, км\ч
1	6	9	6500	5,4
2	7	9	6500	5,4
3	5	7	5000	5,4

Смоделированные эксперименты состоят из серии сценариев, созданных комбинацией масштабированных значений следующих операционных входных параметров (в качестве зависимых значений):

- Расстояние от поля до пункта разгрузки варьировалось от 1 км до 20 км;
- Урожайность озимой пшеницы от 60 до 80 ц/га с шагом 5 ц/га;
- Количество доступных для каждого комплекса транспортных единиц варьировалось от 2 до 7 с шагом приращения 1;

- Расчёт делался для каждого уборочного комплекса исходя из количества входящих в него комбайнов и их характеристик.

Комбинации этих факторов дают 1800 смоделированных экспериментов.

Для каждого сценария результаты были предоставлены следующими показателями эффективности (за 10-часовую рабочую смену):

- Время простоя комбайнов комплекса из-за ожидания транспортных средств;
- Время простоя транспортных средств из-за ожидания комбайнов;
- Суммарные затраты, связанные с потерей рабочего времени.

Для демонстрации инструмента были рассмотрены три различных сценария распределения уборочных комплексов и машин по полям представляющими собой типичную ситуацию планирования уборочных работ на день. Три сценария включают в себя:

- Сценарий А: под уборку назначаются поля 4/01, 4/05 и 4/06;
- Сценарий Б: под уборку назначаются поля 4/01, 4/25 и 4/29;
- Сценарий В: под уборку назначаются поля 4/05, 4/25 и 4/28.

Максимальное количество доступных транспортных средств для всех комплексов было равно 12 единицам.

Результатом смоделированных экспериментов для приведенных выше сценариев является оптимальное распределение уборочных комплексов и транспортных машин для каждого поля.

Оценка затрат на простой комбайна была основана на величине потерь от осыпания зерна на участке, который мог бы быть убран комбайном за указанное время (2500 рублей за 1 час) и стоимости рабочей силы (700 руб./час). Оценка затрат на простой транспортного средства была основана на стоимости рабочей силы (600 руб./час).

### **Полученные результаты.**

**Количественная оценка входных данных полевыми испытаниями.** Собранные данные о работе техники во время полевых испытаний на трех участках были использованы для определения следующих входных параметров:

- Рабочая скорость комбайна (км/ч) –  $\mu=5.4$ ,  $\sigma=1.3$ ;
- Время выгрузки бункера (мин) -  $\mu= 1.5$ ,  $\sigma = 0.3$ ;
- Время разгрузки транспортной единицы (мин) –  $\mu=10.1$ ,  $\sigma= 2.7$ ;
- Скорость движения загруженного ТС (км/ч):  $v = \min(15.42+1.26d;42)$ ;
- Скорость движения пустого ТС (км/ч):  $v = \min(17.04+1.39d;47)$ .

Где  $v$  обозначает скорость движения, а  $d$  обозначает расстояние от поля до пункта разгрузки (км).

**Проверка имитационной модели.** Проверка модуля моделирования была основана на сравнении измеренных и смоделированных выходных параметров на пяти полях (расположенных на участке №4). Параметры, влияющие на время простоя, включая характеристики уборочного комплекса и количество транспортных единиц в моделирование были приняты такими же, как и было в реальности. Величина ошибки симулирования оказалась в пределах  $\pm 20\%$ . При этом следует отметить, что максимальное отклонение в одном из случаев было обусловлено нетипичным прохождением уборочного процесса (под выгрузку был выделен отдельный склад, что сократило потери времени на разгрузку).

**Смоделированные эксперименты.** Как упоминалось выше в разделе «Материалы и методы», анализируемыми показателями эффективности являлись время простоя комбайнов (мин), время простоя

автомобилей (мин) и суммарные потери вызванные простоем техники (руб). Последний показатель был выбран в качестве основного показателя, характеризующего эффективность принятого решения

На рис. 2 показаны суммарные затраты, связанные с потерей рабочего времени на простои в зависимости от расстояния между полем и хранилищем для различного количества доступных транспортных средств для комплекса №1 при урожайности 70 ц/га. Как видно из графика в данном случае на расстояниях до 2-х км наиболее эффективным будет использование 3-х транспортных единиц, на расстоянии 3-4 км – 4-х транспортных единиц, на расстоянии 6-10 км – 5 транспортных единиц. На расстоянии 11-13 целесообразно использовать 6 или 7 транспортных единиц и только при увеличении расстояния до поля свыше 14 км появляется целесообразность использования 7 транспортных единиц.

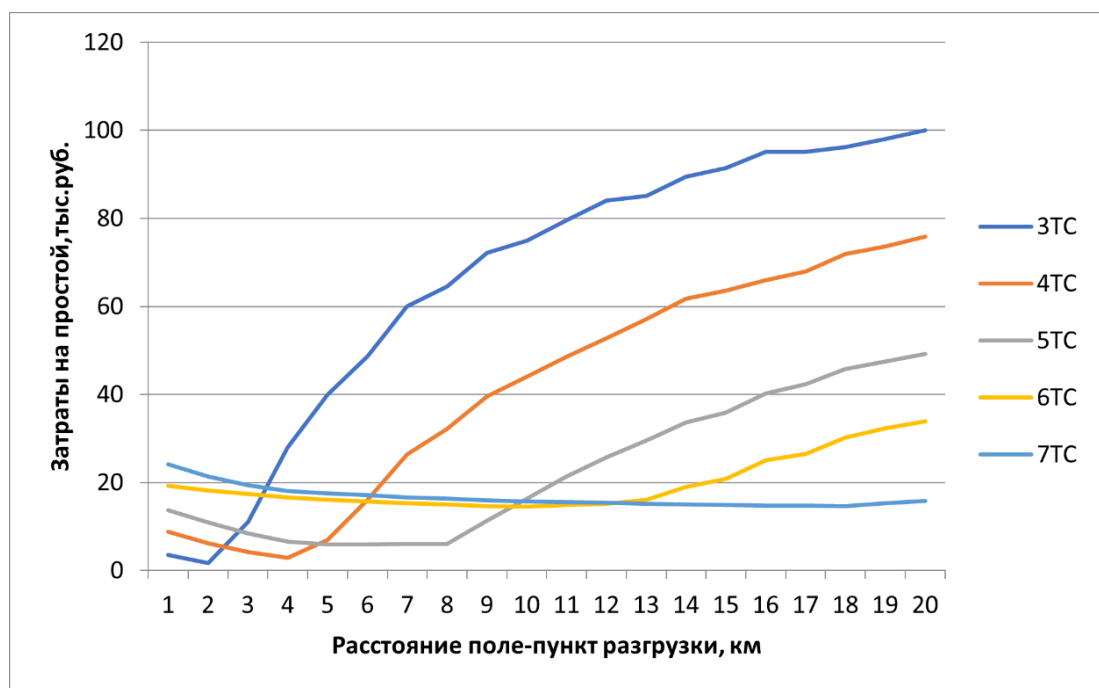


Рисунок 2 - Затраты связанные с простоем техники

**Результаты оптимизации модели.** Три сценария, описанные в разделе «Материалы и методы», были оптимизированы с применением симплекс-метода решения задач линейного программирования. Результаты представлены в таблице 3. Выходные данные модели оптимизации

предоставляют конфигурацию с оптимальным распределением уборочных комплексов и транспортных средств с целью обеспечения минимально возможных потерь из-за простоя техники.

Как видно из таблицы, сценарий А имеет самые низкие потери от простоя техники – 36,6 тыс. руб. в день. Для сценария В минимально возможные потери составили уже 56 тыс. руб. в день. Это оказалось обусловлено более высокой урожайностью убираемых полей, что из-за нехватки транспортных средств привело к увеличению простоев комбайнов. Наконец, для сценария Б, по которому убираются самые дальние поля (удаление от пункта разгрузки от 11 до 15 км) имеет место практически 3-х кратный рост величины потерь из-за значительного простоя зерноуборочных комбайнов, вызванного недостатком транспортных средств.

Таблица 3 - Выход линейного программирования: выбранные рабочие цепи для каждого комплекса и величина потерь от простоя техники

Уборочный комплекс	Сценарий А			Сценарий Б			Сценарий В		
	Закрепленное поле	Выделение транспортных единиц, шт.	Потери, т. руб.	Закрепленное поле	Выделение транспортных единиц, шт.	Потери, т. руб.	Закрепленное поле	Выделение транспортных единиц, шт.	Потери, т. руб.
Комплекс 1	4/01	5	28,7	4/29	4	33,3	4/28	5	28,7
Комплекс 2	4/05	4	3,8	4/25	5	18,7	4/05	4	3,8
Комплекс 3	4/06	3	4	4/01	3	46,0	4/25	3	23,5
Общие потери от простоя в день (тыс. руб.)			36,6			98,0			56,0

На рис. 3 представлен анализ чувствительности решения, предоставляемого инструментом оптимизации. Сценарий Б (поля, удаленные на расстоянии более 10 км от фермы) был оптимизирован при постепенном увеличении количества доступных транспортных средств чтобы выяснить, когда обеспечиваются минимальные потери от простоев.



Рисунок 3 - Величина потерь от простоя техники при различном количестве максимально доступных транспортных средств для сценария Б (поля, рассредоточенные на расстоянии более 10 км от пункта разгрузки)

Как видно из рис. 3, при росте количества доступных транспортных средств величина потерь быстро снижается в диапазоне от 10 до 15 доступных транспортных средств, после чего становится практически неизменной. Более того при наличии 16 и более транспортных средств оптимальная модель задействует только 16 из них. Таким образом, явно прослеживается необходимость увеличения парка транспортных средств в ОАО «Дружба» для обеспечения эффективной загрузки имеющихся уборочных агрегатов. Альтернативным решением может стать комбинирование полей с различной удаленностью от пунктов разгрузки.

### **Выводы.**

Был представлен инструмент поддержки принятия решений для логистики уборки пшеницы. Инструмент состоит из комбинации двух моделей: имитационной модели и модели оптимизации. Имитационная модель генерирует ряд результатов, касающихся времени простоев

комбайнов и транспортных средств, а также комплексной оценки потерь, связанных с простоем для различных конфигураций уборочной цепочки. Эти результаты используются для построения матрицы потерь модели оптимизации.

Имитационная модель была проверена на основе полевых испытаний. Выходные данные модели оптимизации предоставляют конфигурацию с оптимальным размещением уборочных комплексов и транспортных единиц на назначенных к уборке полях, чтобы минимизировать общие эксплуатационные расходы.

Были продемонстрированы возможности как имитационной модели, как отдельного инструмента, так и полного инструмента поддержки принятия решений. Инструмент обеспечивает оценку сбалансированности взаимодействия различных частей цепочки, а именно уборки зерна, перегрузки его в транспортное средство, транспортировки и разгрузки.

В рамках процесса планирования уборки пшеницы разработанный инструмент обеспечивает задачу управления распределением ресурсов. Однако на операционном уровне проблема назначения ресурсов должна взаимодействовать с управленческими задачами планирования и маршрутизации уборочных и транспортных машин в процессе движения как между полем и пунктом разгрузки зерна, так и внутри поля. Кроме того, исследовательская работа не рассматривает случаи наличия различных по характеристикам машин. Вышеизложенное показывает области дальнейшего исследования и расширения представленной работы.



### Список литературы

1. Amiama, C., Cascudo, N., Carpenete, L., & Cerdeira-Pena, A. (2015a). A decision tool for maize silage harvest operations. *Biosystems Engineering*, 134, p.94-104. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511015000677>
2. Amiama, C., Pereira, J. M., Castro, A., & Bueno, J. (2015b). Modelling corn silage harvest logistics for a cost optimization approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, p. 56-65. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169915002501>
3. Orfanou A. et al (2013). Scheduling for machinery fleets in biomass multiple-field operations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 94, p.12-19 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169913000525>
4. Sorensen, C. G., Bochtis, D. D. (2010). Conceptual model of fleet management in agriculture. *Biosystems Engineering*, 105(1), p. 41-50. [https://www.academia.edu/59253842/Conceptual\\_model\\_of\\_fleet\\_management\\_in\\_agriculture](https://www.academia.edu/59253842/Conceptual_model_of_fleet_management_in_agriculture)
5. Лунякин В. Н. Оптимизация уборочно-транспортного процесса уборки зерновых культур с использованием передвижного перегрузчика: Дис. канд. техн. наук: 05.20.01 : Москва, 2004 190 с. РГБ ОД, 61:04-5/4042
6. Моделирование и анализ систем. IDEF-технологии: практикум / С.В.Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. - М.: Финансы и статистика, 2006. - 192 с
7. Пьянов В.С., Малиев В.Х., Высочкина Л.И., Данилов М.В. Методика расчёта суточного сбора зерна в зависимости от темпов уборки // Вестник АПК Ставрополья.- 2018.- №2(30).-с.38-43
8. Степанов В.В., Лаптев В.Н., Лаптев С.В., Степанова М.В., Нефедовский В.А. К вопросу использования метода симплекс - планирования в определенной предметной области // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2021. – № 172(08). – С. 66-81 – DOI: 10.21515/1990-4665-172-008.

### REFERENCES

1. Amiama, C., Cascudo, N., Carpenete, L., & Cerdeira-Pena, A. (2015a). A decision tool for maize silage harvest operations. *Biosystems Engineering*, 134, p.94-104. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511015000677>
2. Amiama, C., Pereira, J. M., Castro, A., & Bueno, J. (2015b). Modelling corn silage harvest logistics for a cost optimization approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118, p. 56-65. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169915002501>
3. Orfanou A. et al (2013). Scheduling for machinery fleets in biomass multiple-field operations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 94, p.12-19 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169913000525>
4. Sorensen, C. G., Bochtis, D. D. (2010). Conceptual model of fleet management in agriculture. *Biosystems Engineering*, 105(1), p. 41-50. [https://www.academia.edu/59253842/Conceptual\\_model\\_of\\_fleet\\_management\\_in\\_agriculture](https://www.academia.edu/59253842/Conceptual_model_of_fleet_management_in_agriculture)

5. Lunjakin V. N. Optimizacija uborochno-transportnogo processa uborki zernovyh kul'tur s ispol'zovaniem peredvizhnogo peregruzchika: Dis. kand. tehn. nauk: 05.20.01 : Moskva, 2004 190 c. RGB OD, 61:04-5/4042

6. Modelirovanie i analiz sistem. IDEF-tehnologii: praktikum / S.V.Cheremnyh, I.O. Semenov, B.C. Ruchkin. - M.: Finansy i statistika, 2006. - 192 c

7. P'janov V.S., Maliev V.H., Vysochkina L.I., Danilov M.V. Metodika raschjota sutochnogo sbara zerna v zavisimosti ot tempov uborki // Vestnik APK Stavropol'ja.- 2018.- №2(30).-s.38-43

8. Stepanov V.V., Laptev V.N., Laptev S.V., Stepanova M.V., Nefedovskij V.A. K voprosu ispol'zovanija metoda simpleks - planirovanija v opredelennoj predmetnoj oblasti // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – № 172(08). – S. 66-81 – DOI: 10.21515/1990-4665-172-008.