

Научная статья

Original article

УДК 631.1

DOI 10.55186/25880209_2024_8_6_12

**УБОРОЧНО-ТРАНСПОРТНЫЙ ПРОЦЕСС: ЦИФРОВИЗАЦИЯ И
ГЕНЕЗИС МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**
HARVESTING AND TRANSPORTATION PROCESSES:
THE ORIGIN OF MATHEMATICAL MODELING, DIGITALIZATION



Валентин Николаевич Курочкин, доктор технических наук, профессор кафедры организации и технологий сервисной деятельности, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (ЮФУ 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, (+7863 218-40-18). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4692-4375>, E-mail: vnkurochkin@sfedu.ru

Valentin N. Kurochkin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Organization and Technologies of Service Activities, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Southern Federal University” (SFedU 344006, Rostov-on-Don, Bolshaya Sadovaya St., 105/42, (+77863 218-40-18). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4692-4375>, E-mail: vnkurochkin@sfedu.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается структура организации технологического процесса уборки урожая зерновых культур, а также возможности его математического моделирования. Уборка урожая является

важным этапом в сельском хозяйстве, требующим правильной организации и оптимизации. Целью данного исследования является изучение особенностей технологической системы уборки урожая, учитываемых при разработке математических моделей, позволяющей оптимизировать и придать устойчивость этой системе. Рассмотрен генезис моделирования объекта исследования: уборочно-транспортного процесса. Обобщение опыта исследований и экспериментов помогло обосновать основные положения и предположить тренд развития моделирования данной технологической системы. Установлено, что математическое моделирование уборочно-транспортного процесса открывает возможности повышения его эффективности и цифровизации. Цифровизация исследуемого процесса позволит: оптимизировать использование ресурсов, сократить затраты и повысить эффективность работы в растениеводстве. Применение цифровых моделей позволяет принимать более обоснованные решения и улучшать качество производственного процесса.

Abstract. This article discusses the structure of the organization of the technological process of harvesting grain crops, as well as the possibilities of its mathematical modeling. Harvesting is an important stage in agriculture, requiring proper organization and optimization. The purpose of this study is to study the features of the technological system of harvesting, taken into account when developing mathematical models that allow optimizing and giving stability to this system. The genesis of modeling the object of study is considered: the harvesting and transport process. Generalization of the experience of research and experiments helped to substantiate the main provisions and suggest a trend in the development of modeling of this technological system. It was found that mathematical modeling of the harvesting and transport process opens up opportunities to increase its efficiency and digitalization. Digitalization of the process under study will allow: optimizing the use of resources, reducing costs and increasing the efficiency of work in crop production. The use of digital models allows making more informed decisions and improving the quality of the production process.

Ключевые слова: экономика, сельское хозяйство, организация, уборочно-транспортный процесс, структура, хлебный массив, скашивание, обмолот, математическое моделирование, оптимизация.

Keywords: economics, agriculture, organization, harvesting and transport process, structure, grain field, mowing, threshing, mathematical modeling, optimization.

Введение. Уборочно-транспортный и заготовительный процесс (УТЗП) является неотъемлемой частью системы производства в сельском хозяйстве. От качества и эффективности его выполнения зависит не только количество собранного урожая, но и конечное качество продукции, а также затраты на её получение. В условиях современного рынка, где конкуренция растёт, а требования к качеству увеличиваются, оптимизация УТЗП становится особенно актуальной. Применение современных технологий и механизации позволяет значительно ускорить этот процесс, однако без математического моделирования невозможно достичь максимального результата. Моделирование УТЗП позволяет учитывать различные аспекты работы, делать прогнозы и вносить необходимые коррективы ещё до начала уборочной кампании. Одним из главных преимуществ математического моделирования является возможность прогнозирования временных затрат и объёмов работ. Например, оценка урожайности и расчёт необходимого количества уборочных машин позволяет минимизировать время, потраченное на уборку. Определение оптимальной схемы транспортировки также способствует снижению затрат на топливо и уменьшению времени в пути. Это, в свою очередь, влияет на сохранность урожая, так как несвоевременная уборка и транспортирование зерна к местам хранения ведёт к потерям, как в результате механических повреждений, так и в результате снижения качества. Кроме того, математическое моделирование позволяет анализировать различные сценарии. Вопрос цифровизации и математического моделирования УТЗП к настоящему времени окончательно не решён.

Цель настоящих исследований – исследование организации и

математического моделирования уборочно-транспортного процесса как продукта его генезиса.

Методы и материалы. Для достижения поставленной цели использованы методы анализа состояния вопроса, логики и обобщения, дедукции и индукции, математические методы. Методика предусматривала анализ материалов исследований, связанных с моделированием технологической системы уборки урожая зерновых культур, в которой изложены их результаты. Опыт исследований и экспериментов положен в основу изучения генезиса моделирования прогноза его тренда развития.

Результаты. Состав уборочно-транспортного комплекса (УТК), структуры и организации уборочно-транспортного и заготовительного процесса (УТЗП) был обоснован научными сотрудниками лабораторий ВНИПТИМЭСХ под руководством академиков РАН М.С. Рунчева и Э. И. Липковича, профессора А.И. Бурьянова, Н.И. Шабанова и др. Первоначально для расчётов были использованы алгебраические (детерминированные) методы и обоснованные на машинно-испытательных станциях данные о производительности задействованных на уборочно-транспортных работах машин и оборудования [17]. Выяснилось, что эффективность УТЗП определяется многими факторами, включая выбор методов уборки, использование соответствующей техники, организацию транспортировки и условий хранения. В результате исследования была выявлена структура организации технологического процесса уборки урожая зерновых культур (Рунчев М.С. и др., 1974; Липкович Э. И. и др., , 1975) уборочно-транспортными комплексами - УТК [9, 16].

Технология уборки включает скашивание хлебного массива, комбайнирование и перевозка зерна с поля на пункт хранения. Каждый из этих этапов имеет свои особенности и требует определенных знаний и навыков. С учётом этапов технологии во ВНИПТИМЭСХ в восьмидесятых годах XX века была разработана система УТЗП [9]. Теория и практика УТЗП обобществлена в Ипатовском методе, в котором УТЗП включал в свой состав не только УТК, но

и пункт первичной подработки зерна (ППНЗ), пункт накопления зерна (ПНЗ), стационарные ёмкости – вентилируемые бункеры – для хранения и подработки зерна [10]. Аспирантами НИИ (Штейн Р. Л., 1983) были созданы теоретические основы обоснования состава УТК, размещения ППНЗ, ПНЗ и стационарных бункеров [1, 3, 20]. Эксперименты научно-исследовательских институтов (НИИ) показали уязвимость детерминированных методов расчётов из-за присутствия случайных воздействий, для учёта которых необходимо моделирование и цифровизация: применение современных технологий и механизации позволяет значительно ускорить процесс, однако без математического моделирования невозможно достичь максимального результата [7, 12]. Моделирование УТЗП позволяет учитывать различные аспекты работы, делать прогнозы и вносить необходимые коррективы ещё до начала уборочной кампании.

Для планирования функционирования межхозяйственных УТК, оптимизации перевозок зерна и размещения ПППЗ и ПНЗ впервые были использованы (А.Ф. Жолобов, Р.Э Штейн, Н. И. Боровой) модели линейного программирования [5], за рубежом этот метод был использован в 1981 г. (рис. 1) [23].

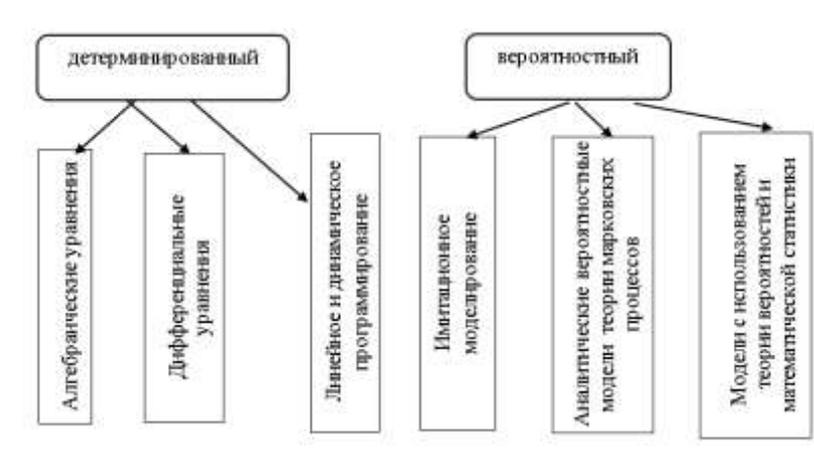


Рисунок 1 - Подходы к исследованию УТЗП

По мере исследования УТК и УТЗП и понимания значимости действия вероятностных факторов в его работе начинает применяться (А.И. Бурьянов, 1974, Ю.Я. Маренич, 1978) теория сложных систем и моделирование на ЭВМ с учётом действия вероятностных факторов [2, 12]. В терминах теории сложных

систем был формализован УТЗП как система, которая имеет три уровня иерархии: верхний, средний и нижний. Верхний уровень – это уровень агропромышленного объединения. В современном периоде времени он представлен агропромышленными объединениями: вертикально-интегрированными структурами холдингового типа. Средний уровень – это УТЗП сельскохозяйственного предприятия, нижний уровень представлен УТК. В свою очередь, УТК рассматривается тоже как система, состоящая из комбайновых звеньев, транспортных звеньев отрядов, звеньев культурно-бытового и технического обслуживания (сервисные звенья). Дальнейшие исследования УТК и УТЗП проводились уже на базе компьютерного моделирования на многопользовательских ЭВМ серии ЕС и персональных ЭВМ. Одним из главных преимуществ математического моделирования является возможность прогнозирования временных затрат и объёмов работ. Например, правильная оценка урожайности и расчёт состава УТК и УТЗП позволяет минимизировать время, потраченное на уборку. Определение оптимальной схемы транспортировки также способствует снижению затрат на топливо и уменьшению времени в пути. Это, в свою очередь, влияет на сохранность урожая, так как нервное перевозка часто ведет к потерям, как в результате механических повреждений, так и в результате снижения качества. Теоретическое обоснование УТЗП под руководством академиков М. С. Рунчева и Э.И. Липковича было выполнено с использованием теории систем и математических методов, которые были реализованы на ЭВМ серии ЕС и персональных ЭВМ отечественного производства. Исследованиями учёных ВНИПТИМЭСХ, СибиМЭ и др. научных учреждений в начале восьмидесятых годов 20 в. доказана эффективность оптимизации УТЗП и его инфраструктуры на основе компьютерного моделирования, а также принципиальная возможность использования ПЭВМ для оперативного управления и планирования УТЗП [7, 13]. Использование ПЭВМ и цифровизация позволяют оперативно анализировать различные сценарии. Например, в условиях неблагоприятной погоды или болезни растений, можно быстро адаптировать

планы, что способствует снижению рисков потерь [14, 15]. Подобные модели могут учитывать и экономические факторы, позволяя фермерам принимать более обоснованные решения относительно финансирования и инвестиций в технику.

На уровне элементов системы УТК задачу моделирования можно представить как модифицированную задачу о бассейне: зерно «втекает» в бункер комбайна и периодически «вытекает» из него. Поэтому, для расчётов по оптимизации работы УТК следует учитывать продолжительность: заполнения бункера и его разгрузки, ожидания (простоя) транспортного средства или комбайна в очереди за бункером или кузовом; время транспортного цикла (загрузка кузова, переезды по полю, к ПППЗ и обратно, разгрузка). Транспортные проблемы решали методом моделирования ряд исследователей (Коптева Н. А., 2001; Евтюшенков, Н. Е., 2002; Измайлов, А. Ю., 2007) [4, 6]. Указанные продолжительности носят вероятностный характер, поэтому требуют применения имитационного (статистического) моделирования (см. рис. 1), методы которого развивал доцент А.Г. Лишний [11]. Результат генезиса моделирования - подтверждение гипотезы о том, что значимой задачей для УТП является расчет оптимального количества уборочных машин и транспортных средств, так как нерациональный состав техники приводит к простоям и неэффективности, Недостаток машин вызовет задержки в уборке, а избыток может привести к избыточным затратам на обслуживание и содержание техники. Моделирование позволяет с учётом факторов урожайности, площади посевов и временных рамок определить наиболее эффективное количество единиц техники, что в свою очередь оптимизирует производственные процессы и увеличивает общую рентабельность.

Обсуждение. Используя математическое моделирование, можно оптимизировать технологический процесс уборки урожая зерновых культур. Математическая модель позволяет учесть различные факторы, такие как погодные условия, состояние почвы, доступность техники и многие другие. Это позволяет более эффективно использовать ресурсы и повысить

производительность процесса. "Структурирование технологического процесса уборки урожая зерновых культур предполагает правильное планирование и организацию каждого этапа, что в конечном итоге ведёт к улучшению результатов и оптимизации процесса" – отмечал академик РАН Э.И. Липкович.

Альтернативная точки зрения: необходимо признавать ограничения и нюансы основного аргумента. Например, в различных регионах могут существовать разные условия, требующие изменения структуры и организации технологического процесса.

Оптимизационные методы являются краеугольным камнем математического моделирования. Они позволяют находить наилучшие варианты решений для упомянутых выше задач, таких как определение числа уборочных машин, выбор маршрутов транспортировки и планирование времени. Наиболее популярные методы включают: линейное и нелинейное программирования (поиск экстремума целевой функции при наличии ограничений на ресурсы). Системный анализ помогает создать целостное представление о процессе УТЗП, учитывая взаимодействие различных компонентов системы. Этот метод позволяет проанализировать, как различные входные параметры влияют на выходные результаты (урожай и затраты), а также изучать оптимизировать организацию уборки. Метод имитационного моделирования дискретных событий (компьютерная симуляция) позволяет анализировать процессы, состоящие из отдельных этапов. Этот метод широко используется для оценки временных затрат и загрузки техники, когда каждая операция по уборке или транспортировке представляет собой отдельное событие. Симуляции позволяют оценить, как УТЗП будет вести себя в условиях реального времени, учитывая различные сценарии, такие как изменение погодных условий или временные задержки (табл. 1).

Таблица 1 – Генезис методов моделирования уборочного процесса

Этап применения в с.х	Методы	Поколение ЭВМ
До применения	Детерминированные	первое, на эл. лампах (1948-1954)

		второе, на транзисторах (1955–1964)
Первичный	Регрессионный анализ, аппроксимация	Третье, (1965–1970), интегральные микросхемы
Освоения ЭВМ	Имитационное моделирование	четвёртое (1970–1982), на БИС и СБИС
Продвинутый	Сложные цифровые модели	Пятое, микропроцессоры (1982–1990)
Интенсивный	Сложные цифровые модели с визуализацией и GPS, нейроны	Пентиум, многоядерные процессоры, интерфейс, дивайсы (1990- н/в)

До начала 70-тых годов для инженерных расчётов в НИИ аграрного профиля применялись ЭВМ: Проминь, Наир, Искра. Наир в то время была лучшей ЭВМ своего класса. В 70-тых им на смену пришли ЭВМ 2 поколения «Минск», а через несколько лет – и ЕС ЭВМ следующего поколения, на которых решали сложные задачи моделирования, например [2, 12].

В конце 80-тых годов стали активно применяться ПЭВМ на микропроцессорах типа 8088 серии, программируемые микрокалькуляторы Электроника. Затем русская электроника канула в лето: теперь повсеместно применяются ПК, дивайсы, гаджеты и софт проекта США. Для цифровизации УТЗП применяют статистические методы (для анализа данных и обучения нейронных сетей). Статистические методы помогают выявлять закономерности и зависимости, что позволяет строить более точные модели. Регрессионный анализ используется для изучения зависимости между целевой функцией и ресурсам УТЗП. Модели машинного обучения помогают адаптироваться к изменениям в данных и выявлять сложные зависимости, что особенно полезно в условиях недостаточной информации о системе.

Заключение. Результаты математического моделирования уборочно-транспортного процесса показывают его неоспоримую ценность для повышения эффективности и устойчивости в сельском хозяйстве. Оптимизация затрат, повышение производительности, улучшение качества продукции, устойчивость к рискам и точное прогнозирование — все эти аспекты

подчеркивают важность научного подхода к разработке и управлению аграрными процессами. Генезис: от простых детерминированных методов расчёта состава количества комбайнов и машин до имитационных моделей и цифровизации в условиях глобальных инновационных изменений в аграрном секторе.

Ведущее место в цифровизации и математическом моделировании УТЗП занимают такие российские учёные, как академики РАН М. С. Рунчев и Э. И. Липкович, доктора наук Н. И. Шабанов, А. И. Бурьянов, Ю. Н. Блынский, Н. Е. Евтюшенков, А.Ю. Измайлов, А.М. Криков, Н. А. Коптева, Е.В. Пухов и др., а также кандидаты наук В.С. Барнагян, Н. И. Боровой, В.В. Войцеховский, А.Ф. Жолобов, В. Я. Жуков, Г. А. Лишний, Ю. Я. Маренич, Н. Н. Николаев, Л.Д. Пасечная, В. Ф. Самойлов, Л. М. Сергеева, А. С. Чулков, Р. Э. Штейн, В. Л. Штейн и др. Наибольший вклад в моделирование уборочно-транспортных систем у Зеленоградских учёных.

Математическое моделирование уборочно-транспортного процесса (УТП) является активной областью исследования, поэтому зарубежные ученые тоже внесли вклад в эту область. Вот несколько известных ученых и их работы, связанных с математическим моделированием в сельском хозяйстве: В. Fokkens, M. A. Puylaert (1981), K.N. Chen (2012) и др. - применяли линейное программирование для оптимизации транспортных процессов в сельском хозяйстве, включая УТЗП [22, 23]. Харри С. Туин (Harry S. Tew) - специализировался на системах управления в сельском хозяйстве, разработав модели, учитывающие условия транспортировки и уборки, позволяя оптимизировать этот процесс. Имитационные модели разработали Hansen A. С., Barnes A. J., Lyne P. W. L., (2002), Arjona E., Bueno G., Salazar L. (2001) и др. [21, 24]

Моделирование и развитие ЭВМ шли «рука об руку», но в 90-е годы русская электроника «канула в лету». Используются зарубежные ЭВМ и софт, подверженные санкциям. Как итог генезиса, математическое моделирование и цифровизация стало инструментом достижения конкурентных преимуществ,

залогом устойчивого развития растениеводства, открывает новые горизонты для фермеров в части применения нейронных сетей и GPS, способствует обеспечению продовольственной безопасности на всех уровнях.

Литература

1. Барнагян В. С., Сергеева Л. М. Применение метода имитационного моделирования для оптимизации структуры уборочно-транспортных комплексов // Повышение эффективности уборочных работ. – 1983. – С. 68-74.

2. Бурьянов А. И. Методика статистического моделирования различных технологических схем работы УТК // Вопросы механизации и электрификации сельскохозяйственного производства. – 1974. – С. 128-135.

3. Войцеховский, В. В. Оптимизация параметров и режимов работы технического оснащения УТЗП: автореф. дис. ... к. т. н. – зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1989. – 17 с.

4. Евтюшенков, Н. Е. Научно-технические решения проблемы повышения эффективности системы транспортного обслуживания сельскохозяйственного производства: автореф. дис. ... д. т. н. – Москва: ВИМ, 2002. – 47 с.

5. Жолобов, А. Ф. Организация уборочных работ в рамках административного района с использованием межхозяйственных и районных механизированных формирований по уборке зерновых колосовых культур: дис. ... к.э.н. – Ростов-на-Дону: РИНХ, 1986. – 154 с.

6. Измайлов, А. Ю. Техническое обеспечение транспортной логистики в технологиях производства сельскохозяйственной продукции: автореф. дис. ... д.т.н. – Москва: ВИМ, 2007. – 31 с.

7. Криков, А. М. Проектирование транспортно-технологических систем для механизированных процессов в растениеводстве с использованием имитационного моделирования: автореф. дис. ... д.т.н. – Новосибирск: СибНИИМЭСХ, 1989. – 36 с.

8. Липкович Э.И. и др. Уборочно-транспортный и заготовительный процесс в районном агропромышленном объединении: основы организации и

математическое моделирование // Липкович Э.И., Курочкин В.Н., Сергеева Л.М., Штейн В.Л., Тимофеев Ю.А. – Москва: ВАСХНИЛ. – 1986. – 180 с.

9. Липкович, Э. И. и др. К обоснованию уборочных комплексов для поточной уборки зерновых колосовых культур / Липкович Э.И., Жуков В. Я., Корнилов Т. А., Прончев Д. Д., Самойлов В. Ф. // В сб.: Механизация и электрификация с.-х производства. – зерноград: ВНИПТИМЭСХ. 1975. – С. 3-16.

10. Липкович, Э. И. и др. Рунчев М. С., Липкович Э. И., Жуков В. Я. Организация уборочных работ специализированными комплексами. – зерноград: ВНИПТИМЭСХ, – 1980.

11. Лишний, Г. А. Разработка системы агрегативного имитационного моделирования для управления сельскохозяйственными техническими системами: автореферат дис. ... к.т.н. – Таганрог: ТРТИ, 1990. – 15 с.

12. Маренич, Ю. Я. Исследование уборочно-транспортного процесса на уборке силосных культур: автореф. дис. ... к.т.н. – Ленинград – Пушкин: СЗНИПТИМЭСХ, 1978. – 19 с.

13. Николаев Н. Н. Статистический эксперимент на имитационной модели уборочно-транспортного комплекса и его результаты // Вестник аграрной науки Дона. – 2012. – №. 1 (17). – С. 26.

14. Пухов Е. В. и др. Моделирование процессов функционирования транспортных и технологических машин на примере уборки зерновых культур/ ЕВ Пухов, ВК Астанин, ВА Следченко // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12. – №. 3. – С. 19-25.

15. Расулов Р. К., Ламм А. К. Модели повышения урожайности на основе комплексного применения цифровых двойников сельскохозяйственного профиля // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2024. – №. 4. – С. 96-107.

16. Рунчев, М.С., и др. О разработке индустриальной технологии уборки и переработки продуктов полеводства / Рунчев М.С., Сисюкин Ю.М., Липкович Э.И. // В сб. Вопросы механизации и электрификации сельскохозяйственного

производства. – зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1974. С. 3-11.

17. Уборочным работам - планирование и управление в масштабах района / Рунчев М., Липкович Э., Жуков В., Шабанов Н. / Сельское хозяйство России. – 1979. – № 6. – С. 17-19.

18. Чулков, А. С. Повышение эффективности уборочно-транспортного комплекса на основе мобильных средств со сменными кузовами при уборке зерновых культур: автореф. дис. ... к.т.н. – Москва ВИМ, 2013. – 23 с.

19. Шабанов, Н. И. Оптимизация процессов и разработка технических средств комбайновой технологии уборки и обработки всего биологического урожая зерновых колосовых культур: автореф. дис. ... д.т.н. – зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 1998. – 39 с.

20. Штейн, Р. Э.. Исследование и обоснование системы послеуборочной обработки зерна применительно к условиям зоны Северного Кавказа: дис. ... к.т.н. – зерноград: ВНИПТИМЖЭСХ, 1983. – 173 с.

21. Arjona E., Bueno G., Salazar L. An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation //Computers and electronics in agriculture. – 2001. – Т. 32. – №. 3. – С. 247-264.

22. Chen X., Önal H. Modeling agricultural supply response using mathematical programming and crop mixes //American journal of agricultural economics. – 2012. – Т. 94. – №. 3. – С. 674-686.

23. Fokkens B., Puylaert M. A linear programming model for daily harvesting operations at the large-scale grain farm of the IJsselmeerpolders Development Authority //Journal of the Operational Research Society. – 1981. – Т. 32. – №. 7. – С. 535-547.

24. Hansen A. C., Barnes A. J., Lyne P. W. L. Simulation modeling of sugarcane harvest-to-mill delivery systems //Transactions of the ASAE. – 2002. – Т. 45. – №. 3. – С. 531.

References

1. Barnagyan V. S., Sergeeva L. M. (1983) Primenenie metoda imitatsionnogo modelirovaniya dlya optimizatsii struktury uborochno-transportnykh kompleksov

[Development of a simulation modeling method for optimizing the structure of agricultural and transport complexes] Povyshenie ehffektivnosti uborochnykh rabot. P. 68-74.

2. Bur'yanov A. I. (1974) Metodika statisticheskogo modelirovaniya razlichnykh tekhnologicheskikh skhem raboty ut k [Methods of statistical modeling of various technological aspects of agricultural and transport complex operation] Voprosy mekhanizatsii i ehlektrifikatsii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva. Pp. 128-135.

3. Voitsekhovskii, V. V. (1989) Optimizatsiya parametrov i rezhimov raboty tekhnicheskogo osnashcheniya uborochno-transportnogo i zagotovitel'nogo protsessa [Optimization of parameters and operating modes of the technical equipment of the harvesting, transport and procurement process] avtoref. dis. ... k. t. n. – Zernograd: VNIPTIMEHSKH. 17 p.

4. Evtushenkov, N. E. (2002) Nauchno-tekhnicheskie resheniya problemy povysheniya ehffektivnosti sistemy transportnogo obsluzhivaniya sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva [Scientific and technical solutions to the problem of improving the efficiency of the transport service system of rural production] avtoref. dis. ... d. t. n. Moskva: VIM, 2002. 47 p.

5. Zholobov, A. F. (1986) Organizatsiya uborochnykh rabot v ramkakh administrativnogo raiona s ispol'zovaniem mezhkhozyaistvennykh i raionnykh mekhanizirovannykh formirovaniy po uborke zernovykh kolosovykh kul'tur [Organization of harvesting operations within the framework of an administrative region using inter-regional and regional mechanical methods for harvesting grain crops] dis. ... k.eh.n. Rostov-na-Donu: RINKH, 154 p.

6. Izmailov, A. YU. (2007) Tekhnicheskoe obespechenie transportnoi logistiki v tekhnologiyakh proizvodstva sel'skokhozyaistvennoi produktsii [Technical support of transport logistics in the technologies of agricultural production] avtoref. dis. ... d. t. n. Moskva: VIM. –31 p.

7. Krikov, A. M. (1989) Proektirovanie transportno-tekhnologicheskikh sistem dlya mekhanizirovannykh protsessov v rastenievodstve s ispol'zovaniem imitatsionnogo modelirovaniya [Design of transport-technological systems for

mechanized processes in plant development using simulation modeling] avtoref. dis. ... d.t.n. Novosibirsk: SiBNIIMEHSKH. 36 p.

8. Lipkovich E.H.I. i dr. (1986) Uborochno-transportnyi i zagotovitel'nyi protsess v raionnom agropromyshlennom ob"edinenii: osnovy organizatsii i matematicheskoe modelirovanie [I. and dr. Harvesting, transport and procurement processes in a regional agro-industrial complex: basic organizational and mathematical modeling] Lipkovich E.H.I., Kurochkin V.N., Sergeeva L.M., Shtein V.L., Timofeev YU.A. Moskva: VASKHNIL. 180 p.

9. Lipkovich, E.H. I. i dr. (1975) K obosnovaniyu uborochnykh kompleksov dlya potochnoi uborki zernovykh kolosovykh kul'tur [On the basis of harvesting complexes for pot harvesting of grain crops] Lipkovich E.H.I., Zhukov V. YA., Kornilov T. A., Pronchev D. D., Samoilov V. F. // V sb.: Mekhanizatsiya i ehlektrifikatsiya sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva. Zernograd: VNIPTIMEHSKH. Pp. 3-16.

10. Lipkovich, E.H. I. i dr. Runchev M. S., Lipkovich E.H. I., Zhukov V. YA. (1980) Organizatsiya uborochnykh robot spetsializirovannymi kompleksami [Organization of utility work by specialized complexes.]. – Zernograd: VNIPTIMEHSKH.

11. Lishnii, G. A. (1990) Razrabotka sistemy agregativnogo imitatsionnogo modelirovaniya dlya upravleniya sel'skokhozyaistvennymi tekhnicheskimi sistemami [Development of an aggregate simulation modeling system for managing agricultural technical systems] avtoreferat dis. ... k. t. n. Taganrog, 15 p. 1.

12. Marenich, YU. YA. (1978) Issledovanie uborochno-transportnogo protsessa na uborke silosnykh kul'tur [Study of the harvesting and transport process during harvesting of silage crops] avtoref. dis. k.t.n. Leningrad-Pushkin. 19 p.

13. Nikolaev N. N. (2012) Statisticheskii ehksperiment na imitatsionnoi modeli uborochno-transportnogo kompleksa i ego rezul'taty Statistical experiment on a simulation model of a harvesting and transport complex and its results Vestnik agrarnoi nauki Dona. # 1 (17). P. 26.

14. Pukhov E. V. i dr. (2019) Modelirovanie protsessov funktsionirovaniya

transportnykh i tekhnologicheskikh mashin na primere uborki zernovykh kul'tur/ EV Pukhov, VK Astanin, VA Sledchenko [Modeling of the functioning processes of transport and technological machines on the example of harvesting grain crops] Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Vol. 12. # 3. Pp. 19-25.

15. Rasulov R. K., Lamm A. K. (2024) Modeli povysheniya urozhainosti na osnove kompleksnogo primeneniya tsifrovyykh dvoynikov sel'skokhozyaistvennogo profilya [Models for increasing crop yields based on the integrated use of digital twins of the agricultural profile] Vestnik NGAU (Novosibirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet). # 4. Pp. 96-107.

16. Runchev, M.S., i dr. (1974) O razrabotke industrial'noi tekhnologii uborki i pererabotki produktov polevodstva / Runchev M.S., Sisyukin YU.M., Lipkovich EH.I. [On the development of industrial technology for harvesting and processing field products] V sb.: Voprosy mekhanizatsii i ehlektrifikatsii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva. Sbornik nauchnykh trudov VNIPTIMEHSKH. Zernograd. P. 3-11.

17. Uborochnym rabotam - planirovanie i upravlenie v masshtabakh raiona (1979) Runchev M., Lipkovich EH., Zhukov V., Shabanov N. [Harvesting operations - planning and management on a district scale] Sel'skoe khozyaistvo Rossii. # 6. P. 17-19.

18. Chulkov, A. S. (2013) Povyshenie ehffektivnosti uborochno-transportnogo kompleksa na osnove mobil'nykh sredstv so smennymi kuzovami pri uborke zernovykh kul'tur [Improving the efficiency of the harvesting and transport complex based on mobile vehicles with swappable bodies when harvesting grain crops] avtoref. dis. ... k.t.n. Moskva: VIM. 23 P.

19. Shabanov, N. I. (1998) Optimizatsiya protsessov i razrabotka tekhnicheskikh sredstv kombainovoi tekhnologii uborki i obrabotki vsego biologicheskogo urozhaya zernovykh kolosovykh kul'tur [Optimization of processes and development of technical means of combine technology for harvesting and processing the entire biological yield of cereal crops] avtoreferat dis. ... d. t. n. Zernograd:

VNIPTIMEHSKH. 39 p.

20. Shtein, R. EH.. Issledovanie i obosnovanie sistemy posleuborochnoi obrabotki zerna : primenitel'no k usloviyam zony Severnogo Kavkaza [Research and substantiation of the system of post-harvest processing of grain in relation to the conditions of the North Caucasus zone] dis. ... k. t. n. . Zernograd: VNIPTIMEHSKH. 173 p.

21. Arjona E., Bueno G., Salazar L. An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation //Computers and electronics in agriculture. – 2001. – Т. 32. – №. 3. – С. 247-264.

22. Chen X., Önal H. Modeling agricultural supply response using mathematical programming and crop mixes //American journal of agricultural economics. – 2012. – Т. 94. – №. 3. – С. 674-686.

23. Fokkens B., Puylaert M. A linear programming model for daily harvesting operations at the large-scale grain farm of the IJsselmeerpolders Development Authority //Journal of the Operational Research Society. – 1981. – Т. 32. – №. 7. – С. 535-547.

24. Hansen A. C., Barnes A. J., Lyne P. W. L. Simulation modeling of sugarcane harvest-to-mill delivery systems //Transactions of the ASAE. – 2002. – Т. 45. – №. 3. – С. 531.

© Курочкин В.Н., 2024, *International agricultural journal* №6, 1769-1785

Для цитирования: Курочкин В.Н. Уборочно-транспортный процесс: цифровизация и генезис математического моделирования // *International agricultural journal*. 2024. №6, 1769-1785