

УДК 631.171

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСКРЕТНЫХ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ СИСТЕМ МЕХАНИЗАЦИИ УБОРКИ И ПЕРЕВОЗКИ УРОЖАЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Постолова Дарья Сергеевна
Соискатель
SPIN-код: 6973-4503
ORCID: 0000-0003-3814-765X
Darina_ss@mail.ru

Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» в г. Зернограде (Ростовская область, Российская Федерация)

Курочкин Валентин Николаевич
Доктор технических наук, профессор
SPIN-код: 3356-9473
ORCID: 0000-0003-4692-4375
valentin952@mail.ru
Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

В статье рассмотрен механизированный процесс уборки и перевозки урожая зерновых культур как наиболее трудозатратный и материалоемкий в сельском хозяйстве. Этот сельскохозяйственный процесс имеет стохастический характер ввиду физики протекающих процессов и зависимости от погодных условий. На процесс воздействуют множество различных факторов, начиная с физико-химических свойств зерновых культур и особенностях работы механизмов и узлов оборудования, и заканчивая метеорологическими условиями. Также имеет значение функционирование процесса во времени, когда одни операции завершаются, а другие начинаются, создавая во времени цепь событий. Экспериментальные исследования показали, что в данной системе множества случайных событий материальных дискретных потоков систем механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур описываются: входящий поток - законами Пуассона и Вейбулла, механизм обслуживания - экспоненциальным. Доверительная вероятность описания исследуемых материальных дискретных потоков не менее $P\beta = 0,95$ при уровне значимости $\alpha=0,05$

Ключевые слова: СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО, СИСТЕМА, УБОРКА, ПЕРЕВОЗКА, УРОЖАЙ, ЗЕРНО, МАТЕРИАЛЬНЫЕ ПОТОКИ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ЗАКОНОМЕРНОСТИ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-202-023>

<http://ej.kubagro.ru/2024/08/pdf/23.pdf>

UDC 631.171

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

EXPERIMENTAL STUDIES OF DISCRETE MATERIAL FLOW OF MECHANIZATION SYSTEMS HARVEST AND TRANSPORTATION OF GRAIN CROPS

Postolova Darya Sergeevna
competitor for degree
RSCI SPIN-code:6973-4503
ORCID: 0000-0003-3814-765X
Darina_ss@mail.ru

Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of FSBEI HE «Don State Agrarian University» in Zernograd, Zernograd, Russian Federation

Kurochkin Valentin Nikolaevich
Doctor of Technical Sciences, Professor
RSCI SPIN-code:3356-9473
ORCID: 0000-0003-4692-4375
valentin952@mail.ru
Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

The article the mechanized process of harvesting and transportation of grain crops is considered because it is the most labor- and material-intensive. This agricultural process has a stochastic character due to the physics of the processes and dependence on weather conditions. The process is influenced by many different factors, ranging from the physical and chemical properties of crops and the peculiarities of the operation of machinery and equipment components, and ending with meteorological conditions. Also important is the functioning of the process in time, when some operations are completed and others begin, creating a chain of events in time. Experimental studies have shown that in this system of sets of random events of material discrete flows of the systems of mechanization of harvesting and transportation of grain crops are described: the incoming flow - Poisson's and Weibull's laws, the service mechanism - exponential. The confidence probability of describing the material discrete flows under study is not less than $P\beta = 0.95$ at the significance level $\alpha=0.05$

Keywords: AGRICULTURE, SYSTEM, HARVESTING, TRANSPORTATION, CROP, GRAIN, MATERIAL FLOWS, EXPERIMENT, REGULARITIES

Введение. Система механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур является одной из наиболее материалоемких и трудозатратных в сельском хозяйстве. Уборочный процесс обладает выраженным стохастическим характером, так как подвержен воздействию множества различных факторов, начиная от физико-химических и органолептических свойств зерна, заканчивая метеорологическими условиями. Современная агроиндустрия требует, с одной стороны, решения задач на уровне системного управления [2, 5, 6] в составе уборочно-транспортных систем [3], а, с другой, интенсификацию механизированных процессов за счёт крупногруппового использования техники [7], индустриальных методов [8], повышения энергонасыщенности, снижения трудоёмкости. Отметим, что исследование систем механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур не сводится всего лишь к расчёту экономических показателей прибыльности и статистических данных о валовом производстве зерна. Не менее значимы результаты исследований общесистемных закономерностей функционирования, которые влияют на конечные экономические результаты земледелия. Очевидно, что для оптимизации компонентов системы механизированной технологии уборки и перевозки урожая сельскохозяйственных культур эффект использования в этих целях стандартных методик расчета состава технических средств явно недостаточен. Задача может быть решена за счёт компьютерного моделирования указанных механизированных агросистем, их цифровизации. Известно, что для целей моделирования необходимы знания о системных закономерностях его функционирования, получение которых необходимо для модернизации уборочно-транспортных систем.

К общесистемным закономерностям относятся такие показатели, как показатели надёжности технологической системы, её устойчивость и эффективность, коэффициент технического использования задействованных технических средств и др. Интересно отметить, что общесистемные зако-

номерности определяются материальными дискретными потоками, проходящими через систему механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур.

Исследование закономерностей материальных дискретных потоков систем механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур (далее – система МУиПУ) является актуальной задачей научной специальности 4.3.1. «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса».

Материалы и методы исследования. Методология исследований основана на результатах исследований, выполненных отечественными и зарубежными учёными, изложенных в достаточно представительном объёме научных статей, количество которых со временем увеличивается.

Методология системной организации и моделирования уборочных процессов была разработана научными сотрудниками ВНИПТИМЭСХ под руководством академиков Э.И. Липковича и М.С. Рунчева [4, 7]. Среди современных работ выделяются труды проф. А.И. Бурьянова о математическом моделировании уборочно-транспортного процесса (далее – уборочно-транспортный комплекс - УТК) [1].

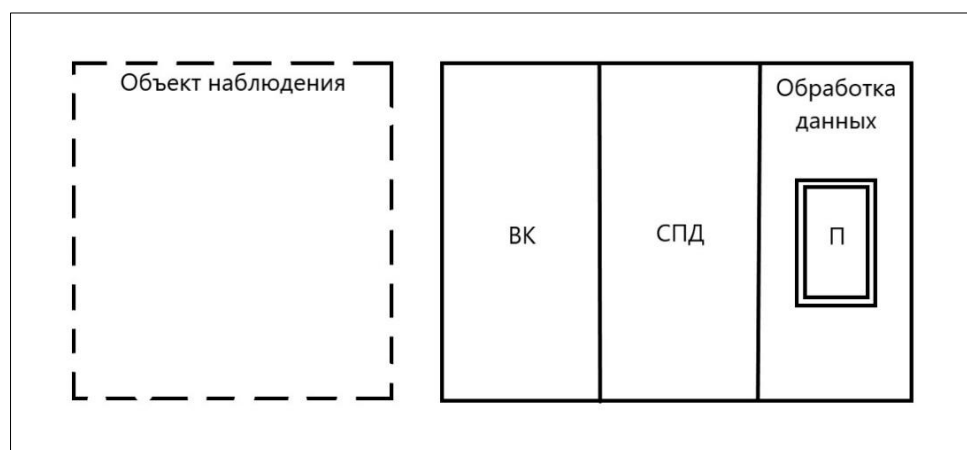
В контексте решаемой задачи интерес представляет зарубежная методология проекта «GLOBAL GRAIN HANDLING SOLUTIONS PTY. LTD.» основана на дискретной математической модели, которая основана на существующих моделях затрат и выгод данной системы. Методология поддержки принятия решений по логистике сбора, хранения и распределения зерна была разработана и проверена с помощью тестового моделирования с использованием данных, которые отражают типичные сценарии ведения сельского хозяйства в Западной Австралии (Mardaneh E. et al., 2021) [9]. Также руководствовались методологией снижения послеуборочных потерь зерна «supply chain» и определения оптимальной логистики для его транспортировки и направлений инвестиций в инфраструктуру,

методикой обоснования мест для новых объектов предварительной обработки зерна по математической модели. Цель «supply chain» состоит в том, чтобы минимизировать общую стоимость системы, включая как инвестиции в инфраструктуру, так и экономические издержки от PHL. Численный анализ на реальной сети в штате Иллинойс и серия анализов её чувствительности дают предоставление об оптимальной конструкции системы при различных сценариях (Nourbakhsh S. M. et al., 2016) [10]. В практическом аспекте были полезны концептуальные принципы создания технологии проектирования транспортно-логистических схем уборки, перегрузки и транспортировки зерновых культур с их гибкой адаптацией к конкретным агротехническим, техническим, природно-производственным, экономическим и многочисленным условиям в период их уборки разработанные Rogovskii I. L. et al. (2021). Как результат, сформирован практический консультационный документ, позволяющий фермеру в конкретных условиях определять выбор оптимальных транспортно-логистических схем уборки и транспортировки урожая в зернохранилища [11].

Экспериментальные исследования были направлены на формирование базы данных о материальных дискретных потоках системы МУиПУ. Основная методическая посылка эксперимента - обеспечение достоверности исследований - была построена на теории вероятностей. Для обработки опытных данных была использована стандартная методика статистической обработки экспериментальных данных. Для идентификации закономерностей дискретных материальных потоков системы МУиПУ применили облачный сервис MATLAB Online [12]. Требуемая доверительная вероятность – 0.95...0.90 при погрешности не более 10%, что является общепризнанной нормой для исследований сложных систем.

Эксперимент проводился на полях со средней для Юга России урожайностью зерновых колосовых культур, средними размерами и конфигурацией убираемых площадей. Для определения размеров поля и плеча пе-

ревозок в сельхозпредприятиях использовали геопозиционирование, онлайн карты со спутника в реальном времени [13], карты Google Earth [14]. Схема наблюдений была следующей. Непосредственно в поле были выполнены: фиксация геопозиционирования, участвующих в уборке и перевозке урожая, машин, фото и видео материальных дискретных потоков этой системы, хронометраж процесса перемещения объектов дискретных потоков (бункеров зерна) с фиксацией моментов времени начала и конца обслуживания заявок, моментов их возникновения, дистанционная фиксация значимых для моделирования моментов транспортного процесса (рис. 1).



СПД – система передачи данных, П – планшет, ВК – видеокамера

Рисунок 1 - Дистанционная фиксация дискретных материальных потоков

Материальные дискретные потоки системы механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур – это зерно, начиная от хлебного массива на поле, и заканчивая зерном на пункте его первичной подработки (ПППЗ).

Результаты и их обсуждения. Методом наблюдений было уточнено определение материальных дискретных потоков - это материальная единица, перемещаемая от поля до ПППЗ через систему механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур. В терминах Мичиганского универси-

тета подобную единицу дискретного называют транзактом (transaction). Транзакт назвали «виртуальным бункером зерна» (ВБЗ). Зерно на поле находится в хлебном массиве. Хлебный массив убирается методом прямого комбайнирования или посредством скашивания в валки. Первоначально ВБЗ находится в хлебном массиве, затем, с некоторой вероятностью – в валках. ВБЗ реализуется при комбайнировании в бункере зерноуборочного комбайна. Загруженный бункер – это возникновение заявки на обслуживание комбайна. После загрузки бункера зерном, порция зерна под условным названием: «бункер», - разгружается в кузов транспортного средства, прицепа или бункера-перегрузателя. В кузов может вмещаться от одного до нескольких «бункеров». Итак, подтверждён дискретный характер проходящих через систему МУиПУ потоков ВБЗ – «бункеров». Обобщая данные эксперимента, пришли к следующим умозаключениям: продолжительность наполнения бункера комбайна зерном есть величина непостоянная, так как она зависит от реакции механизатора-комбайнёра, особенностей работы механизмов комбайна, неравномерности поступающего в молотильный барабан валка скошенного хлебостоя, биологических свойств зерна как живого организма, хлебного массива, метеоусловий, геометрии убираемого поля и т.д. Следовательно, возникновение заявки на обслуживание комбайна есть момент случайный. Продолжительность выгрузки бункера, включая маневрирование, тоже величина вероятностная. Продолжительность переездов транспортных средств также величина стохастическая в силу варьирования скорости движения (зависит от разнообразных дорожных условий на поле, полевой дороге и дороге с улучшенным покрытием или с твёрдым покрытием) и плеча перевозок из поля до ПППЗ.

Время оборота транспортного средства от поля до поля тоже носит стохастический характер, так как складывается из продолжительностей движения, ожидания заполнения бункера, времени его выгрузки, маневрирования, перевозки, разгрузки на ПППЗ и др. В общем случае рассматри-

ваемые объекты (движение ВБР и физических бункеров через систему МУиПУ) имеет вероятностный характер и описываются законами распределения с точечными характеристиками: математическое ожидание $M[t]$, вариация $V(t)$, оценка математического ожидания (среднее время обслуживания $\bar{t}_{обс}$), среднеквадратическое отклонение и др.

Опытные данные подтвердили эти логические выводы: материальные дискретные потоки системы МУиПУ имеют стохастический характер. В случайные моменты времени бункер оказывается заполненным, это момент появления заявки на его обслуживание, то есть выгрузку и перевозку на ПППЗ. При заполнении кузова зерном транспортное средство перевозит «бункер» на ПППЗ. Обслуживание заявки – это перевозка «бункера» с поля на ПППЗ. «Бункер» выгружается в завальную яму оборудования ПППЗ, транспортное средство возвращается на поле, при этом заявка считается обслуженной, и система – замкнутой, так как транспортные средства движутся по замкнутому циклу перевозок. Так как транспортных средств несколько, процесс идет следующим образом: зерноуборочный комбайн обмолачивает хлебный массив или валки, в отдельные моменты времени ВБЗ требуют обслуживания, и если есть свободная автомашина, то физический бункер разгружается. Если все транспортные средства в рейсе, комбайн простаивает в ожидании обслуживания. Подобные системы именуются «системами массового обслуживания», и дискретные материальные потоки – входящим потоком заявок на обслуживание и обслуживание заявок. Обслуживание также называют «механизмом обслуживания». Первый характеризуется оценкой математического ожидания числа заявок в единицу времени - λ , а второй оценкой математического ожидания количества обслуженных за единицу времени заявок - μ . Для адекватного математического описания систем массового обслуживания требуется условие стационарности входящего потока, его ординарность и отсутствие последей-

ствия. Эти условия выполняются в случае, когда входящий поток заявок является пуассоновским.

Вначале проверили стационарность потока заявок, для чего построили график изменения их количества в единицу времени по дням уборочно-го периода

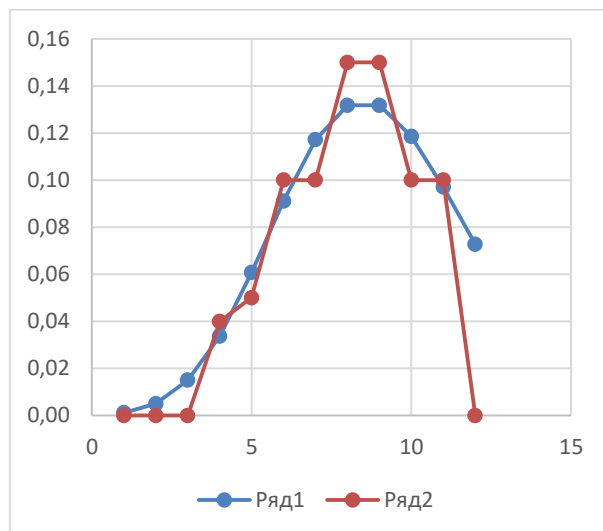
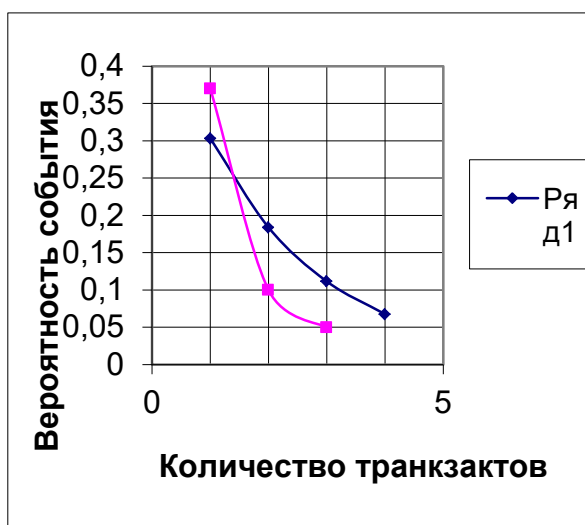
$$\omega(t) = \frac{\sum_{j=1}^N mj(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}$$

где $\omega(t)$ – среднее количество заявок за Δt ;

$\sum_{j=1}^N mj(\Delta t)$ – всего заявок от всех комбайнов N за Δt ;

Δt – единица времени.

Рассчитали верхние и нижние доверительные границы (среднего числа заявок на перевозку по десяти дням уборки и выяснили, что гипотеза о стационарности подтверждается, так как $\omega(t) = 90$ находится в пределах между верхней и нижней доверительными границами $0,85 \leq (\omega(t)) \leq 97$. Ординарность (низкая вероятность одновременно возникновения заявок) и отсутствие последствий также подтверждается выполненными экспериментами. Методом наблюдения выяснили: входящий поток обладает свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последействия (продолжительности набивания бункеров комбайнов независимы). Экспериментальные исследования выявили экспоненциальный механизм обслуживания: внутри системы поток транзактов перемещается по экспоненциальному закону. Установлен факт: множества случайных событий материальных дискретных входящих потоков данной системы (множество зафиксированных случайных событий возникновения заявок) адекватно идентифицируются законом Пуассона. Промежуток времени между возникновением заявок распределяется по экспоненциальному закону (рис. 2).



Синий цвет – теоретические значения, красный – опытные данные

Рисунок 2 – Закономерности материальных дискретных потоков систем механизации уборки и перевозки урожая зерновых культур

Воспользовавшись данными экспериментальных исследований, рассчитали вероятностные характеристики материальных дискретных потоков систем механизации уборки и перевозки урожая (табл.).

Таблица 1 – Опытные вероятностные характеристики материальных дискретных потоков систем механизации уборки и перевозки урожая

Показатель	Значение
Средняя продолжительность заполнением бункера комбайна RSM, час	0,33
Средняя продолжительность цикла: «заполнение бункера – маневрирование – ожидание – разгрузка бункера в кузов транспорта»	0,40
Средняя продолжительность оборота транспортного средства, час	0,25
Число транспортных средств, обслуживающих комбайны	3
Численность звена комбайнов RSM - источников заявок	3
Среднее число бункеров-заявок на обслуживание от звена за час	9,0
Среднее число бункеров-заявок на обслуживание от звена за смену λ	90
Среднее число обслуженных заявок одним транспортом за час	4
Среднее число обслуженных заявок транспортным звеном за час	12
Потенциальное число обслуженных заявок транспортным звеном за смену (параметр механизма обслуживания μ)	120

Наблюдали за звеном из трёх комбайнов RSM и транспортным звеном из такого же количества КАМА345143- -776012-50 (сельхозник). Для зерноуборочного комбайна RSM с паспортным намолотом 36 т/час и бункером вместимостью 11 м³ средняя продолжительность заполнением бункера комбайна на практике составила 0,33 часа, а средняя продолжительность всего цикла: «заполнение бункера – маневрирование – ожидание – разгрузка бункера в кузов транспорта» - 0,40 часа. От комбайнового звена за час поступало в среднем 9 бункеров – транзактов, потенциал транспортного звена – перевозка 12 бункеров в час. Комбайны не простаивали, а автомашины. Чаще транзакты - ожидали заявки на перевозку.

Методами математической статистики по критерию χ^2 с помощью сервиса *MATLAB Online* [12] установили, что доверительная вероятность описания исследуемых материальных дискретных потоков составляет не менее $P_\beta = 0,95$ при уровне значимости $\alpha=0,05$. Значения λ и μ соответственно равны 9 и 12.

Экспериментальные исследования показали, что в данной системе множества случайных событий материальных дискретных потоков системы механизации уборки и перевозки урожая (МУиПУ) зерновых культур описываются: входящий поток - законами Пуассона и Вейбулла, механизм обслуживания - экспоненциальным. Доверительная вероятность описания исследуемых материальных дискретных потоков не менее $P_\beta = 0,95$ при уровне значимости $\alpha=0,05$.

Литература

1. Бурьянов А. И. и др. Разработка экономико-математической модели функционирования уборочно-транспортного комплекса при высокопроизводительной уборке зерновых колосовых культур комбайновым очесом и методики ее технико-экономической оценки. – Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства РАСХН, 2014.
2. Дидманидзе Р. Н., Маслов Г. Г. Программирование производственных процессов в АПК. – 2017.
3. Липкович Э. И. и др. Рекомендации по организации высокопроизводительного использования техники на уборке хлебов. – 1982.
4. Липкович Э. И. и др. Уборочно-транспортный и заготовительный процесс в РА-ПО: основы организации и математическое моделирование. – 1986.

5. Николаев Н. Н., Бельц А. Ф., Зацаринный В. А. Оптимизация структуры и режима работы существующего уборочно-транспортного комплекса в ОАО " Учхоз Зерновое" //Совершенствование конструкций и повышение эффективности эксплуатации колесных и гусеничных машин в АПК.: – 2010. – С. 116-121.
6. Пухов Е. В. и др. Моделирование процессов функционирования транспортных и технологических машин на примере уборки зерновых культур //Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2019. – Т. 12. – №. 3. – С. 19-25.
7. Рунчев М. С., Липкович Э. И., Жуков В. Я. Организация уборочных работ специализированными комплексами. – 1980.
8. Шабанов Н. И., Лаврухин А. А., Пасечная Л. Д. Сочетание комбайновых и поточно-индустриальных технологий уборки зерновых культур //Механизация уборочно-транспортных процессов в полеводстве. – 1987. – С. 42-49.
9. Mardaneh E. et al. A decision support system for grain harvesting, storage, and distribution logistics //Knowledge-Based Systems. – 2021. – Т. 223. – С. 107037.
10. Nourbakhsh S. M. et al. Grain supply chain network design and logistics planning for reducing post-harvest loss //Biosystems Engineering. – 2016. – Т. 151. – С. 105-115.
11. Rogovskii I. L. et al. Conceptual bases of system technology of designing of logistic schemes of harvesting and transportation of grain crops //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 723. – №. 3. – С. 032032.
12. <https://exponenta.ru/matlab-online>
13. <https://ynavigator.ru/karta-so-sputnika.html>.
14. <https://google-earth-pro.softonic.ru>

References

1. Bur'yanov A. I. i dr. Razrabotka e`konomiko-matematicheskoy modeli funkcionirovaniya uborochno-transportnogo kompleksa pri vy`sokoproizvoditel`noy uborke zernovy`x kolosovy`x kul`tur kombajnovy`m ochesom i metodiki ee tekhniko-e`konomicheskoy ocenki. – Severo-Kavkazskij nauchno-issledovatel`skij institut mexanizacii i e`lektrifikacii sel`skogo xozyajstva RASXN, 2014.
2. Didmanidze R. N., Maslov G. G. Programmirovaniye proizvodstvenny`x processov v APK. – 2017.
3. Lipkovich E`. I. i dr. Rekomendacii po organizacii vy`sokoproizvoditel`nogo ispol`zovaniya tekhniki na uborke xlebov. – 1982.
4. Lipkovich E`. I. i dr. Uborochno-transportny`j i zagotovitel`ny`j process v RAPO: osnovny` organizacii i matematicheskoe modelirovaniye. – 1986.
5. Nikolaev N. N., Bel`cz A. F., Zaczarinny`j V. A. Optimizaciya struktury` i rezhima raboty` sushhestvuyushhego uborochno-transportnogo kompleksa v ОАО" Uchhoz Zerno-voe" //Sovershenstvovanie konstrukcij i povy`she-nie e`ffektivnosti e`kspluatacii ko-lesny`x i gusenichny`x mashin v APK.: – 2010. – S. 116-121.
6. Puxov E. V. i dr. Modelirovaniye processov funkcionirovaniya transportny`x i tekhnologicheskix mashin na primere uborki zernovy`x kul`tur //Vestnik Voronezh-skogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2019. – Т. 12. – №. 3. – S. 19-25.
7. Runchev M. S., Lipkovich E`. I., Zhukov V. Ya. Organizaciya uborochny`x rabot specializirovanny`mi kompleksami. – 1980.
8. Shabanov N. I., Lavruxin A. A., Pasechnaya L. D. Sochetaniye kombajnovy`x i potочно-industrial`ny`x tekhnologij uborki zernovy`x kul`tur //Mexanizaciya uborochno-transportny`x processov v polevodstve. – 1987. – S. 42-49.
9. Mardaneh E. et al. A decision support system for grain harvesting, storage, and distribution logistics //Knowledge-Based Systems. – 2021. – Т. 223. – S. 107037.
10. Nourbakhsh S. M. et al. Grain supply chain network design and logistics planning for reducing post-harvest loss //Biosystems Engineering. – 2016. – Т. 151. – S. 105-115.

11. Rogovskii I. L. et al. Conceptual bases of system technology of designing of logistic schemes of harvesting and transportation of grain crops //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2021. – Т. 723. – №. 3. – S. 032032.
12. <https://exponenta.ru/matlab-online>
13. <https://ynavigator.ru/karta-so-sputnika.html>.
14. <https://google-earth-pro.softonic.ru>