

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:519.863

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-24-31>**Уборка зерновых культур при вероятностном характере внешних условий:
оптимизация технологического процесса****В.А. Смелик¹✉, А.М. Захаров², А.Н. Перекопский³**¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; г. Санкт-Петербург, Россия^{2,3} Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; г. Санкт-Петербург, Россия¹ smelik_va@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>² bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>³ aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>

Аннотация. Выбор эффективных технологий уборки и ресурсосберегающих способов подготовки фуражного зерна к скармливанию является важной задачей развития кормовой базы животноводства в регионах повышенного увлажнения. Технологическую и техническую политику уборки зерновых культур в условиях вероятностного характера прогноза изменяющихся погодных условий помогает построить математическое и компьютерное моделирование – в частности, Марковские цепи. Исследования проведены с целью разработки математической модели управления технологическим процессом уборки зерновых культур на основе использования Марковских цепей. В качестве резерва расширения уборочного периода фуражных посевов зерновых культур предложили применить технологии заготовки зерносенажа, уборки колосьев безобмолотным способом, плющения и консервирования зерна, осуществляемых в фазах молочной и восковой спелости. Разработаны оптимизационная математическая модель и программа определения рациональных площадей уборки зерновых культур, которые учитывают вероятность погодных условий и состояние спелости зерновых. Апробация модели и программы проведена для условий Северо-Западного региона Российской Федерации при заданной вероятности неблагоприятных погодных условий 0,6 и доле получаемого семенного зерна в объеме 10%. Частным решением модели предусмотрена заготовка зерносенажа на 56,8% площадей зерновых культур. Очесом колосьев безобмолотным способом планируется убрать 19,7%, на плющение и консервирование зерна придется 7,1%, на производство фуража сушкой остается 4,0% площадей. Разработанная модель показывает, сколько площадей зерновых культур можно довести до полной спелости с приемлемым риском потерь. Предлагаемая модель применима к группе полей, отдельным полям или их частям (с учетом микрорельефа), что актуально для точного земледелия. Предложенный подход оптимизации структуры урожая зерновых культур поможет осознанно управлять долей семенного и фуражного зерна с различными технологиями заготовки.

Ключевые слова: уборка зерновых культур; зерносенаж; очес; плющенное зерно; семена; фураж; Марковские цепи; математическая модель; оптимизация технологического процесса; состояние спелости зерновых

Для цитирования: Смелик В.А., Захаров А.М., Перекопский А.Н. Уборка зерновых культур при вероятностном характере внешних условий: оптимизация технологического процесса // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 24-31. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-24-31>

ORIGINAL ARTICLE

Grain crop harvesting under probabilistic external conditions: optimization of the technological process**V.A. Smelik¹✉, A.M. Zakharov², A.N. Perekopskiy³**¹ St. Petersburg State Agrarian University; St. Petersburg, Russia² Institute for Agroengineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; St. Petersburg, Russia¹ smelik_va@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>² bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>³ aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>

Abstract. The selection of effective harvesting technologies and resource-saving methods for preparing feed grain is a critical task for the development of the forage base in regions with high rainfall. Mathematical and computer modeling, particularly using Markov chains, can inform the technological and technical strategy for grain harvesting under probabilistically changing weather conditions. The study aimed to develop a mathematical model for managing the grain crop harvesting process based on Markov chain theory. To extend the harvesting window for forage grain crops, the following technologies were proposed: grain silage production, stripping of ears without threshing, and grain crimping with preservation, all of which are implemented during the milk and wax ripeness stages. An optimization mathematical model and a corresponding software package were developed to determine rational harvesting areas, accounting for the probability of weather conditions and the ripeness stage of the crops. The model and software were tested under the conditions of the Northwestern region of the Russian Federation, assuming a probability of unfavorable weather of 0.6 and a target seed grain share of 10%. A partial solution of the model allocated 56.8% of the grain crop area to grain silage production, 19.7% to ear stripping without threshing, 7.1% to grain crimping and preservation, and 4.0% to feed production by drying. The developed model estimates the area of grain crops that can attain full ripeness with an acceptable risk of losses. The model is applicable to groups of fields, individual fields, or their parts (accounting for their microrelief), making it relevant for precision agriculture. The proposed approach to optimizing the structure of grain crop harvest will enable informed management of the seed-to-feed grain ratio using various harvesting technologies.

Keywords: grain crop harvesting; grain silage; stripping; crimped grain; seeds; feed; Markov chains; mathematical model; technological process optimization; grain ripeness stage

For citation: Smelik V.A., Zakharov A.M., Perekopskiy A.N. Grain crop harvesting under probabilistic external conditions: optimization of the technological process. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):24-31. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-24-31>

Введение

Специфика зернового производства в сельскохозяйственных организациях Северо-Западного региона Российской Федерации, как в регионе повышенной увлажненности, заключается в его преимущественной ориентации на фураж (до 85...90%). Посевные площади зерновых культур заняты главным образом фуражными культурами – такими, как ячмень, тритикале и овес. В этой связи проблема выбора эффективных технологий уборки [1, 2] и ресурсосберегающих способов подготовки фуражного зерна к скармливанию является приоритетным направлением развития кормовой базы [3, 4].

Сроки уборки урожая зависят от биологической фазы созревания растений, динамики агроклиматических показателей, конструктивных особенностей и технологических настроек зерноуборочных комбайнов [5, 6]. Период массовой уборки (август-сентябрь)

сопряжен с действием лимитирующих факторов: высоким фоном увлажнения (сумма осадков – 150...170 мм), повышенной влажностью воздуха (70...85%) и пониженными температурами (+10 ... +15°C). На ранние сроки уборки зерновых культур приходится 15% уборочных сезонов, до 50% занимают сезоны со средними сроками уборки и до 30% – сезоны с поздними сроками уборки [7].

Для повышения эффективности использования технических средств и сохранения питательной ценности зерна уборку целесообразно начинать на ранних фазах развития, ориентируясь на фактическую степень созревания зерновых [8, 9]. Существенным резервом для пролонгации уборочного периода зерновых культур и максимизации объема урожая является внедрение технологий заготовки зерноуборочного материала, уборки колосьев безобмолотным способом, плющения и консервации зерна [10-12].

Для формирования технологической и технической стратегии в условиях вероятностного характера изменяющихся погодных условий целесообразно применять математическое и компьютерное моделирование. При разработке модели уборки необходимо принять во внимание три ключевых аспекта: биологический, связанный с фазами спелости зерна (молочная, восковая, полная); технологический, подразумевающий наличие четырех технологий заготовки (на зерносеяж, безобмолотная уборка колосьев очесом, на плющение зерна, на сушку фуража и семян); метеорологический, учитывающий осадки и температуру воздуха, которые определяют количество «рабочих (благоприятных) дней».

Для моделирования процесса созревания и принятия решений об уборке целесообразно применить Марковскую цепь [13, 14] поскольку переход зерновой культуры из одной стадии (фазы спелости) в другую носит вероятностный характер и зависит от случайных факторов (погода, температура, влажность). Это модель случайного явления, в которой вероятность перехода в следующее состояние зависит только от текущего состояния, а не от предыдущих. Моделирование с помощью Марковских цепей^{1,2} имеет следующие преимущества: простота реализации и расчетов благодаря аналитическим формулам для вероятностей и ожидаемых значений; возможность учитывать различные сценарии и параметры процессов; встроенная возможность использования методов решения задач теории вероятностей – таких, как расчет стационарных распределений и цепей с поглощающими состояниями. Применение Марковских цепей в инженерии сводится к моделированию, анализу и оптимизации систем, эволюционирующих во времени случайным образом, где «будущее зависит только от настоящего». Марковские цепи являются инструментом для инженеров-исследователей, работающих с ненадежными компонентами, случайным трафиком, сложными процессами или необходимостью принятия решений в условиях неопределенности [15].

Марковские цепи могут применяться при моделировании уборочных процессов урожая с учетом неоднородности созревания участков, при оценке вероятности успешной уборки за определенный период, разработке оптимальных стратегий последовательных действий для достижения заданного уровня чистоты бункерного вороха.

Цель исследований: разработать математическую модель управления технологическим процессом уборки зерновых культур на основе использования Марковских цепей.

Материалы и методы

При формализации модели основной задачей уборки зерновых культур становится формирование семенного фонда, то есть площади, которая должна быть обязательно убрана в фазе полной спелости. Целью проектируемой модели являлось определение оптимального распределения площадей и очередности уборки для максимальной сохранности урожая (валового сбора фуражного зерна) при условии, что количество «рабочих (благоприятных) дней» в каждом временном интервале является случайной величиной с известным распределением.

При моделировании уборки зерновых культур принимаются следующие приоритеты:

- уборка семенных участков в узкое «окно» полной спелости. Если время упущено по из-за дождей, происходит потеря семенного фонда (или резкое падение всхожести и классности);

- уборка фуражных культур в фазе восковой спелости – плющение и консервирование как менее затратная технология по сравнению с сушкой фуражного зерна;

- уборка на зерносеяж на самых ранних этапах как объемных кормов для молочного стада или, наоборот, если кормоуборочная техника простаивает.

Модель может многократно «прогоняться» (по методу Монте-Карло). Результатом моделирования является распределение вероятностей: процент фуражного зерна, убранного вовремя; вероятность или риск потери семенного фонда; эффективность использования каждой из технологий при различной вероятности благоприятных погодных условий; и т.д.

Для оптимизации уборки зерновых культур применили Марковские цепи. При формализации модели определили состояние (фазу спелости) зерновой культуры на конкретном поле или на группе полей [16, 17] по шкале от 0 до 5 (рис. 1):

0 – молочная спелость – состояние, когда культуру целесообразно убирать на зерносеяж;

1 – поздняя молочная спелость – состояние, когда культуру можно убирать на зерносеяж и очес колосьев;

2 – молочно-восковая спелость – состояние, когда можно убирать на зерносеяж, очес колосьев и плющенное фуражное зерно;

3 – восковая спелость – состояние, подходящее для уборки на очес колосьев, плющенное зерно и фуражное зерно для сушки;

¹ Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М., 2000. 294 с.

² Ногин В.Д., Протодяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации. М.: Высшая школа, 1986. 384 с.

4 – полная восковая спелость – состояние, когда возможна уборка на фуражное зерно для сушки;

5 – полная спелость – состояние, приемлемое для уборки на семена и продовольственное зерно (если таковые посевы имеют место).

Уборка урожая является поглощающим состоянием. После принятия решения об уборке культуры в определенной фазе (0...5) процесс для этого участка (периода) заканчивается. В схеме модели (рис. 1) присутствуют шесть поглощающих состояний: 6 – заготовка зерносеяжа; 7 – заготовка очесанных колосьев ранней спелости; 8 – уборка зерна на плющение и консервирование; 9 – уборка фуражного зерна с сушкой и дроблением; 10 – уборка и послеуборочная доработка семенного материала; 11 – потери неубранного урожая.

Вероятности перехода состояний: P1 – вероятность перехода посевов в следующую фазу; P2...P12 – вероятность уборки по определенной технологии в определенную фазу спелости. Например, вероятность убранной площади на зерносеяж составит: $P2 = 1 - P1$. Расчет других вероятностей перехода части урожая в следующее состояние представлен в таблице.

С вероятностью P1 общая площадь посева S0 перейдет в стадию S1, то есть

$$S1 = S0 \cdot P1. \quad (1)$$

С вероятностью P4 часть площади посева S1 будет убрана очесом колосьев, с вероятностью P3 часть площади посева S1 будет убрана на зерносеяж. Разница между общей площадью посева S0 и площадью S1, с вероятностью P1, перейдет в S2 – состояние

молочно-восковой спелости. В состоянии молочно-восковой спелости часть площади S2 с вероятностью P5 может быть убрана на зерносеяж, с вероятностью P6 – очесом колосьев, с вероятностью P7 – на плющенное консервированное зерно.

В полную восковую спелость перейдет площадь S3:

$$S3 = S1 - S2. \quad (2)$$

Площадь, которая не будет убрана по причине неблагоприятных погодных условий, будет равна S6.

В соответствии с данными рисунка 1 зерносеяж можно убирать в состоянии посева S0, S1 и S2. Наибольшее количество сеяжа $X_1^{\max}$ достигается из условия:

$$X_1^{\max} \leq S0 \cdot P0 + S1 \cdot P3 + S2 \cdot P4. \quad (3)$$

Таблица

Вероятность перехода части урожая в следующее состояние по погодным условиям

Table

Probability of partial crop transition to the next state due to weather conditions

Номер узла состояния урожая	Запись вероятности перехода
0	$P1 + P2 = 1$
1	$P1 + P3 + P5 = 1$
2	$P1 + P4 + P6 + P8 = 1$
3	$P1 + P7 + P9 + P10 = 1$
4	$P1 + P11 = 1$
5	$P1 + P12 = 1$

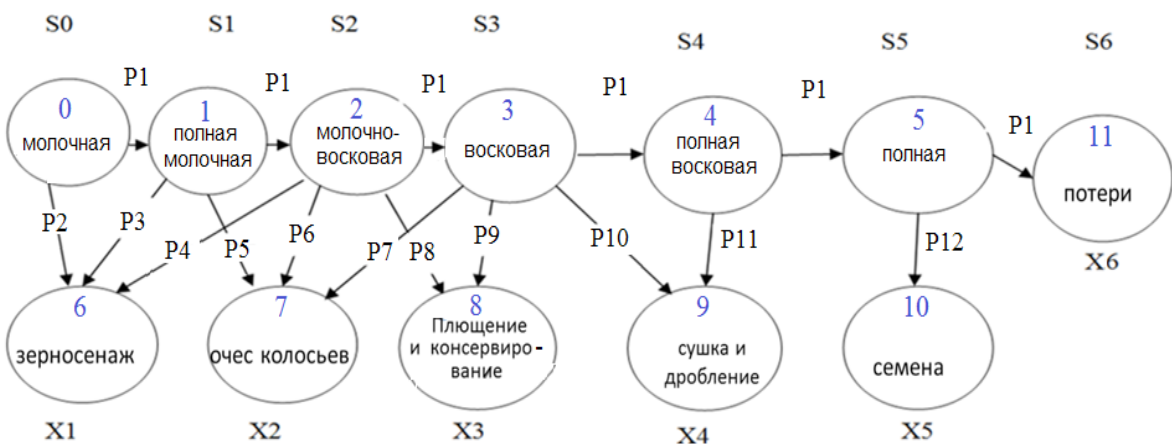


Рис. 1. Схема вероятностной модели уборки зерновых культур:

0...5 – состояние спелости зерновых; 6...10 – технология уборки зерновых; 11 – потери; P1 – вероятность благоприятных погодных условий; P2...P12 – вероятность уборки зерновых по определенной технологии в определенную фазу спелости; S0...S6 – общая площадь уборки и площади, переходящие в соответствующие фазы спелости; X1...X6 – площади уборки зерновых по определенной технологии

Fig. 1. Schematic diagram of the probabilistic model of grain crop harvesting:

0 to 5 – grain ripeness stages; 6 to 10 – grain harvesting technologies; 11 – losses; P1 – probability of favorable weather conditions; P2 to P12 – probability of harvesting grain crops using a specific technology at a specific ripeness stage; S0 to S6 – total harvesting area and areas transitioning to the corresponding ripeness stages; X1 to X6 – grain harvesting areas under specific technologies

Зерно, убранное очесом колосьев, получают на стадиях S1, S2 и S3.

Наибольшее количество зерна очесом можно получить, если

$$X_2^{\max} \leq S1 \cdot P5 + S2 \cdot P6 + S3 \cdot P7. \quad (4)$$

Зерно, подвергнутое плющению, получают на стадиях S2 и S3. Наибольшее количество такого зерна можно достичь при условии:

$$X_3^{\max} \leq S2 \cdot P8 + S3 \cdot P9. \quad (5)$$

Для фуража сушкой на стадиях S3 и S4 получаем:

$$X_4^{\max} \leq S3 \cdot P10 + S4 \cdot P11. \quad (6)$$

Максимум семенного зерна на стадии S5 получим при условии:

$$X_5^{\max} \leq S5 \cdot P12. \quad (7)$$

Наибольшее количество потерь составит:

$$X_6^{\max} \leq S5 \cdot P1. \quad (8)$$

Общая площадь, занятая посевами для заготовки кормов и семян, должна совпадать с общей площадью посева зерновых культур:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = S_0 \quad (9)$$

Чтобы создать поисковую область для каждой переменной, необходимо определить минимальные значения. Это может быть обосновано различными факторами, но в общем случае приемлемо установить:

$$X_i^{\min} = \frac{X_i^{\max}}{2}. \quad (10)$$

Оптимальное распределение площадей под уборку различных видов кормов следует корректировать в зависимости от прогноза погодных условий, чтобы максимально эффективно использовать ресурсы и получить максимальное количество питательных веществ в кормах. Целевая функция для достижения этой цели может быть сформулирована следующим образом:

$$C_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot X_2 + C_3 \cdot X_3 + C_4 \cdot X_4 = \max, \quad (11)$$

где $C_1 \dots C_4$ – содержание к.ед/га для видов кормов: зерносеяж, очес колосьев безобмолотным способом, плющенное зерно, высушенное фуражное зерно.

Объем семян должен быть не менее требуемого, а потери зерна – минимальными в любых условиях.

Результаты и их обсуждение

Для анализа Марковских цепей применим метод декомпозиции, который позволяет представить решение в виде набора матриц^{3,4}: матрицы вероятностей Q, матрицы переходов R, нулевой матрицы 0, единичной матрицы E [7]. Такая запись преобразует ис-

ходную матрицу в уравнение Колмогорова-Чепмена. Решение этого уравнения предоставляет различные характеристики стационарного состояния Марковской цепи. Для вычислений удобно использовать систему MathCAD2000, где все формулы записываются в матричной форме⁵.

Зерно, убранное по разным технологиям, имеет различную питательную ценность, поэтому необходимо выбрать оптимальный объем уборки в разных погодных условиях, чтобы получить максимальное количество питательных веществ. Для этого были созданы математическая модель и программа, которые рассчитывают рациональные площади уборки с учетом вероятности различных погодных сценариев. Математическая модель разработана в виде задачи математического программирования и реализована в системе Excel (рис. 2).

Для анализа воздействия вероятности благоприятных погодных условий на результаты уборки зерновых культур произвели расчеты для различных значений вероятностей в диапазоне от 0 до 1 с шагом 0,1 (рис. 3). Ввиду высокой вероятности неблагоприятных погодных условий в Северо-Западном регионе РФ увеличивается риск уборки и последующей обработки зерна полной спелости с повышенной влажностью.

Неблагоприятные погодные условия оказывают влияние на вероятности применения различных технологий уборки при целевой функции максимального сбора урожая (ц к.ед.) и «жестко» заданного объема семян 10%. Так, при заданных значениях вероятности неблагоприятных погодных условий $P = 0,6$ (рис. 3) и объеме семян 10,0% на зерносеяж планируется убрать 56,8% площадей зерновых культур, очесом будет убрано 19,7%, на плющенное зерно придется 7,1%, на фураж сушкой останется 4,0% площадей; потери зерна составят 2,4%. При $P > 0,6$ значительно возрастают потери. Модель показывает количество площадей, которое можно «довести» до полной спелости (S5) с приемлемым риском потерь.

При планировании логистики и ресурсов на уборку урожая представляется возможным принятие управленческих решений по прогнозированию распределения площадей по фазам спелости на несколько дней/недель вперед: оптимально распределить комбайны, транспорт, сушильные мощности

⁴Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. 2. Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. 2021. Ч. II. 320 с.

⁵Керимов М.А., Валге А.М. Оптимизация и принятие решений в агроинженерии. М.: КолосС, 2021. 502 с. EDN: GOIVYS.

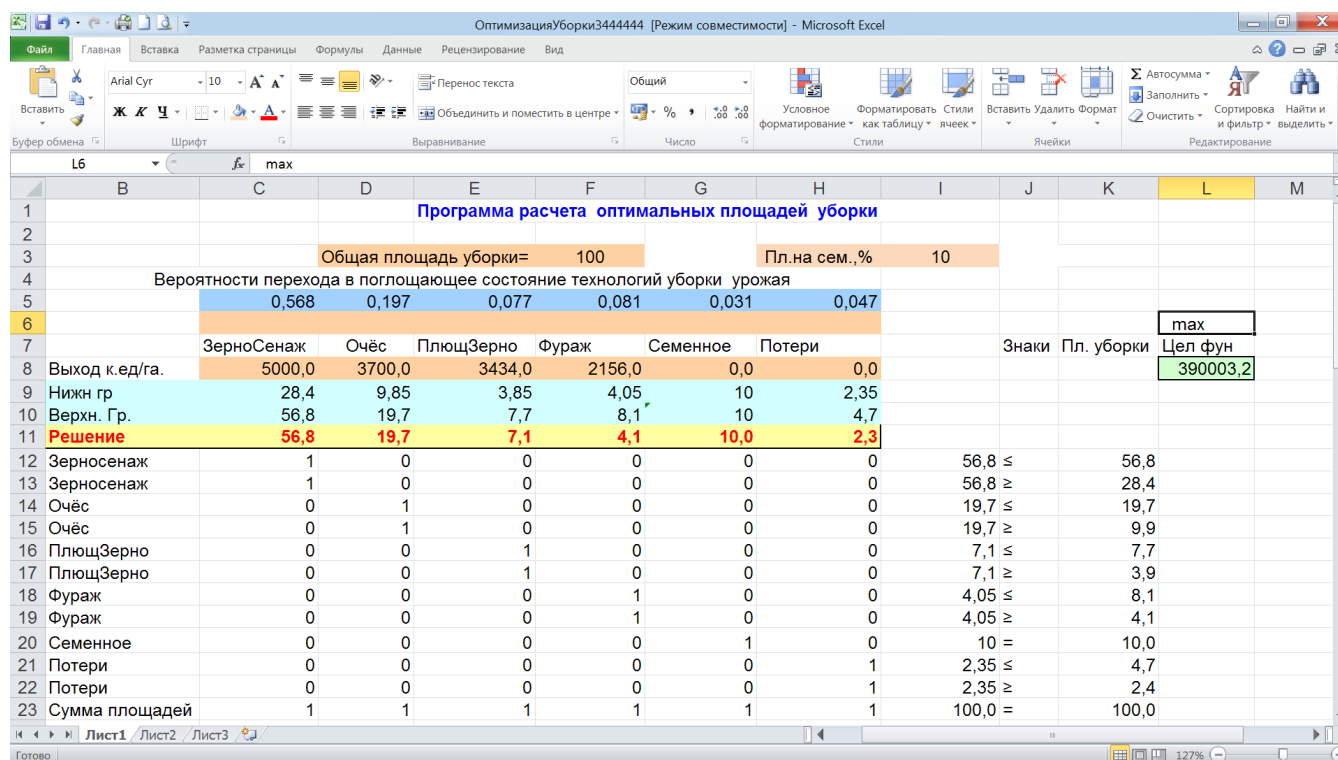


Рис. 2. Фрагмент программы определения рациональных площадей уборки зерновых культур

Fig. 2. Fragment of the software package for determining optimal grain harvesting areas

и рабочую силу. Решение «убирать» или «подождать» перестает быть интуитивным и получает математическое обоснование, основанное на ретроспективных данных и текущих погодных прогнозах (которые можно вносить в изменяющуюся матрицу).

Предлагаемую модель можно применять к группам полей, отдельным полям или даже к частям

полей (с учетом микрорельефа), что актуально для точного земледелия.

Таким образом, Марковская цепь превращает сложный биологический, климатический и технологический процесс в формальную стохастическую модель, которая служит основой для эффективного и прибыльного управления уборкой урожая зерновых культур.

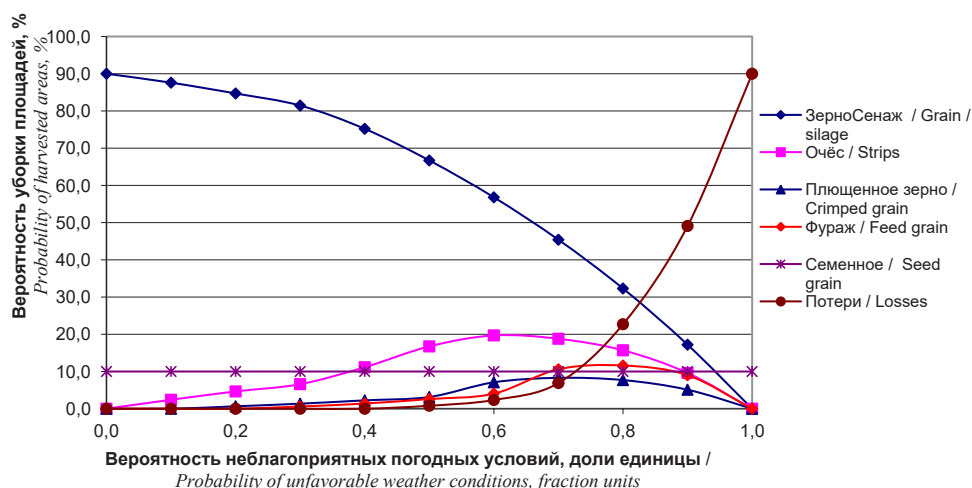


Рис. 3. Вероятность уборки зерновых культур в зависимости от погодных условий

Fig. 3. Probability of harvesting grain crops under adverse weather conditions

Выводы

1. Разработанная математическая модель управления технологическим процессом на основе использования Марковских цепей позволяет «про-

игрывать сценарии» определения рациональных площадей уборки зерновых культур на семена и фураж в зависимости от вероятностей погодных условий.

2. Апробация математической модели управления процессом уборки при заданной вероятности неблагоприятных погодных условий в Северо-Западном регионе Российской Федерации, равной 0,6, и долей семенного зерна в объеме 10% показала, что на заготовку зерносенажа предусмотрено 56,8% площадей зерновых культур, очесом колосьев безобмолотным

способом можно убрать 19,7%, на площение и консервирование зерна придется 7,1%, на производство фуража сушкой останется 4,0%.

3. Предложенный подход оптимизации структуры урожая зерновых культур помогает осознанно управлять долей семенного и фуражного зерна с различными технологиями заготовки.

Список источников

1. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измаилов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства // Российская сельскохозяйственная наука. 2025. № 3. С. 45-53. EDN: FEDQXJ
2. Малков Н.Г., Чухина О.В., Демидова А.И. и др. Анализ технико-технологических решений производства фуражного ячменя в Северо-Западном регионе // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 3 (104). С. 24-32. EDN: YXCETO
3. Асманкин Е.М., Кукаев Х.С., Ушаков Ю.А. и др. Форсированная технология переработки как реализация метода энергонасыщенного воздействия на зерновую массу // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 6 (104). С. 154-161. <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-104-6-154-161>
4. Дианов Л.В., Смелик В.А., Ширяев А.С. Механизация сушки урожая зерновых и кормовых культур: Монография. Ярославль: Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, 2005. 150 с. EDN: QKXMSZ
5. Хуссейн И., Левшин А.Г., Гаспарян И.Н. Повышение эффективности механизированной уборки пшеницы в условиях Ирака с применением полиэтиленовых рукавов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 6. С. 27-34. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-27-34>
6. Chen X., Wu S., Li C., Liu F., Yuan L., Wang W. Design and experiment of feed rate monitoring system based on the action force of grain combine harvester reel. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;230:109837. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109837>
7. Перекопский А.Н., Валге А.М., Сухопаров А.И. Моделирование уборки зерновых культур в зависимости от погодных условий // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. 2011. С. 211-216. EDN: YRJDNH
8. Pakhomov V., Rudoy D., Kambulov S. et al. Research on energy intensity of wheat harvesting at different ripeness phases with a new stripping-threshing unit. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3159-3173. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030180>
9. Перекопский А.Н., Чугунов С.В. Базовые технологии использования зерновых культур в качестве кормов и производства семян для хозяйств молочного направления Северо-Западного региона // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 15-22. EDN: SYDQJJ
10. Смелик В.А., Фомин С.Д., Захаров А.М., Перекопский А.Н. Оценки технологической надежности машин для площения и консервирования органического фуражного зерна // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2025. № 4 (82). С. 482-492. EDN: MIFHOV
11. Пахомов В.И., Брагинетц С.В., Бахчевников О.Н., Рудой Д.В. Особенности технологии производства корма из зернового вороха при ранней и сверхранней уборке // Техника и оборудование для села. 2021. № 1 (283). С. 16-19. EDN: AWTTCZ

References

1. Lobachevsky Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmailov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agro-engineering science in the conditions of digitalization of agriculture. *Rossiiskaia Selskokhoziaistvennaia Nauka*. 2025;3:45-53. (In Russ.)
2. Malkov N.G., Chukhina O.V., Demidova A.I., et al. Analysis of technical and technological solutions of fodder barley production in the North-West Region. *Agroekoinzheneriya*. 2020;3:24-32. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2020-10250>
3. Asmankin E.M., Kukaev Kh.S., Ushakov Yu.A. et al. Forced processing technology as an implementation of the method of energy-saturated impact on grain mass. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;6:154-161. (In Russ.) <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-104-6-154-161>
4. Dianov L.V., Smelik V.A., Shiryayev A.S. Mechanization of drying grain and fodder crops. Yaroslavl: Yaroslavl State Agricultural Academy. 2005:150. (In Russ.)
5. Hussein I., Levshin A.G., Gasparyan I.N. Improving the efficiency of mechanized wheat harvesting in Iraq using polyethylene hoses. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(6):27-34. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-6-27-34>
6. Chen X., Wu S., Li C., Liu F., Yuan L., Wang W. Design and experiment of feed rate monitoring system based on the action force of grain combine harvester reel. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2025;230:109837. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109837>
7. Perekopskiy A.N., Valge A.M., Suhoparov A.I. Model-based analysis of grain harvesting under various weather conditions. *Nauchno-tekhnicheskii progress v selskokhozyaystvennom proizvodstve*. Minsk: Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Agricultural Mechanization. 2011:211-216. (In Russ.)
8. Pakhomov V., Rudoy D., Kambulov S., et al. Research on energy intensity of wheat harvesting at different ripeness phases with a new stripping-threshing unit. *AgriEngineering*. 2024;6(3):3159-3173. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030180>
9. Perekopskiy A.N., Chugunov S.V. Basic technologies of grain crops use for feeding and seed production on dairy farms in the NorthWest region. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2014;85:15-22. (In Russ.)
10. Smelik V.A., Fomin S.D., Zakharov A.M., Perekopskiy A.N. The assessment of the technological reliability of the machines for flattening and preservation of the organic fodder grain. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex: Science and Higher Education*. 2025;4:482-492 (In Russ.)
11. Pakhomov V.I., Braginets S.V., Bakhchevnikov O.N., Rudoy D.V. Features of the process for fodder production of grain heap at early and very early harvesting. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;1:16-19. (In Russ.)
12. Rudoy D.V., Pakhomov V.I., Braginets S.V., Maltseva T.A., Sarkisian D.S. Study of the content of vitamins and minerals in wheat grain at different stages of ripeness. *Bulletin of the Ryazan*

12. Рудой Д.В., Пахомов В.И., Брагинец С.В. и др. Исследование содержания витаминов и минеральных веществ в зерне пшеницы на разных стадиях спелости // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2023. Т. 15, № 3. С. 38-44. EDN: XDHALC

13. Ганичева А.В., Ганичев А.В. Математические методы и модели в агропромышленном комплексе: Монография. Тверь: Тверской государственный технический университет. 2019. 188 с. EDN: GZRZAD

14. Денисенко Т.И. Использование Марковских цепей при решении различных прикладных задач // Фундаментальные исследования. 2009. № 1. С. 27-28. EDN: KVFGBL

15. Назаревич С.А., Меркулова А.Ю. Марковские цепи для решения проблем управления технологическим процессом в производственной системе // Системный анализ и логистика. 2023. № 1 (35). С. 67-73. EDN: LNBUPF

16. Попов В.Д., Валге А.М., Сухопаров А.И. Оптимизация структуры кормов при заданной продуктивности коров // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2 (99). С. 229-236. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10167>

17. Валге А.М., Перекопский А.Н. Вероятностная модель уборки зерновых культур в Северо-Западном регионе // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. № 4. С. 5-6. EDN: PDFSJT

Информация об авторах

¹ **Смелик Виктор Александрович**, д-р техн. наук, профессор кафедры технических систем в агробизнесе; smelik_va@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>; SPIN-код: 2462-1130

² **Захаров Антон Михайлович**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела «Агротехнологии в растениеводстве»; bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>; SPIN-код: 1089-6040

³ **Перекопский Александр Николаевич**, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела «Агротехнологии в растениеводстве»; aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>; SPIN-код: 5656-1108

¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет; 196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2А

^{2,3} Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ; 196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Филитровское шоссе, 3

Вклад авторов

Смелик В.А. – методология, концептуализация, руководство исследованиями;
Захаров А.М. – администрирование проекта, создание черновика рукописи, визуализация, проведение исследований;
Перекопский А.Н. – создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 14.03.2026; после рецензирования и доработки 26.06.2026; принята к публикации 03.07.2026

State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2023;15(3):38-44. (In Russ.)

13. Ganicheva A.V., Ganichev A.V. Mathematical methods and models in the agro-industrial complex: Monograph. Tver: Tver State Technical University. 2019, 188 p. (In Russ.)

14. Denisenko T.I. Using Markov chains to solve various applied problems. *Fundamentalnye issledovaniya.* 2009;1:27-28. (In Russ.)

15. Nazarevich S.A., Merkulova A.Yu. Markov chains for solving problems of art-technological process control in a production system. *System Analysis and Logistics.* 2023;1:67-73. (In Russ.)

16. Popov V.D., Valge A.M., Sukhoparov A.I. Optimizing the feed composition for specified cow productivity. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva.* 2019;2:229-236. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10167>

17. Valge A.M., Perekopskiy A.N. Probabilistic model of harvesting grain crops in the North-Western region. *Vestnik Rossiyskoy akademii selskokhozyaystvennykh nauk.* 2012;4:5-6. (In Russ.)

Author Information

Viktor A. Smelik¹, DSc (Eng), Professor, the Department of Technical Systems in Agribusiness; smelik_va@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5004-9457>

Anton M. Zakharov², CSc (Eng), Lead Research Engineer, the Department of Agrotechnologies in Crop Production; bauermw@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3501-0543>; Scopus Author ID: 57222190573

Aleksandr N. Perekopskiy³, CSc (Eng), Lead Research Engineer, the Department of Agrotechnologies in Crop Production; aperekopskii@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0998-2306>; Scopus Author ID: 57221327928

¹ Saint Petersburg State Agrarian University; 2A Peterburgskoe Ave., Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation

^{2,3} Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3 Filitrovskoe Ave., Tyarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russian Federation

Author Contribution

Smelik V.A. – methodology; conceptualization; research supervision; Zakharov A.M. – project administration; writing – original draft; visualization; investigation;
Perekopskiy A.N. – writing – review and editing of the manuscript

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 14.03.2026; Revised 26.06.2026; Accepted 03.07.2026