
КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

В статье предложена концептуальная модель многокритериальной оценки агропромышленного производства, ориентированная на условия цифровизации и управления на основе данных. В отличие от существующих подходов модель интегрирует методы многокритериального анализа с архитектурой цифрового двойника и формализованным учетом качества данных; обеспечивается сопоставимость разноразмерных показателей, учет временной динамики и интеграция ограничений в процедуру оценки. Разработанный подход повышает обоснованность управленческих решений и может быть использован при создании цифровых систем управления и поддержки принятия решений.

Ключевые слова: агропромышленный комплекс; цифровой двойник; эффективность; многокритериальная оценка; интегральный индекс; нормирование показателей; качество данных; экологические ограничения.

УДК: 338.244.1

Агропромышленное производство характеризуется высокой степенью зависимости от природных факторов, ресурсных ограничений и технологических условий, что обуславливает необходимость использования методов многокритериальной оценки при принятии управленческих решений. Развитие цифровых технологий приводит к формированию новых возможностей управления на основе данных, включая применение цифровых платформ, систем мониторинга и аналитических инструментов.

В научной литературе сформированы различные подходы к многокритериальному анализу, обеспечивающие выбор решений в условиях нескольких критериев. В то же время современные исследования в области цифровизации агропромышленного производства акцентируют внимание на использовании данных и моделей для повышения эффективности управления. Однако данные направления развиваются преимущественно изолированно, что приводит к ограниченности существующих решений при их применении в условиях цифровой среды. Международные обзоры подчеркивают, что цифровизация агропродовольственных систем способна снижать информационные разрывы и транзакционные издержки, повышать точность планирования и мониторинга, однако практический эффект зависит от инфраструктуры, доступности данных, качества данных и доверия к цифровым решениям [1–3]. В прикладной плоскости это означает, что переход к управлению на основе данных требует не перечня разрозненных показателей, а концептуальной модели, в которой показатели формируют единое пространство измерений, связанное

Алеся Александровна МОЗОЛЬ (a.mozol@aol.com), кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры математических методов в экономике Белорусского государственного экономического университета (г. Минск, Беларусь).

с объектами управления и обеспеченное формальными процедурами обработки данных и моделирования.

В научной литературе вопросы многокритериальной оценки и принятия решений в условиях совокупности конфликтующих критериев рассматриваются в рамках теории многокритериального анализа, включающей методы свертки критериев, анализ иерархий, методы близости к идеальному решению, а также методы ELECTRE и PROMETHEE [4–7]. Данные подходы широко применяются для оценки эффективности экономических систем, ранжирования альтернатив и обоснования управленческих решений. Вместе с тем в современных исследованиях отмечается, что классические методы многокритериального анализа в большинстве случаев ориентированы на статические наборы показателей и не учитывают специфику формирования данных в цифровых системах, включая их неоднородность, различия в частоте наблюдений и проблемы качества информации [4; 5].

Развитие цифровых технологий в агропромышленном производстве привело к формированию направления, связанного с использованием данных, цифровых платформ и интеллектуальных систем управления. В аналитических и научных исследованиях подчеркивается, что цифровизация аграрного сектора позволяет повысить точность планирования, снизить транзакционные издержки и улучшить качество управленческих решений, однако ее эффективность зависит от доступности инфраструктуры, уровня цифровых компетенций и качества данных [1–3; 8]. При этом существенными ограничениями остаются фрагментированность информационных потоков, отсутствие унифицированных стандартов данных и недостаточная сопоставимость показателей.

Отдельное место в современных исследованиях занимает концепция цифровых двойников, рассматриваемая как интеграция физического объекта, потоков данных и математических моделей. В работах, посвященных цифровым двойникам в сельском хозяйстве, подчеркивается их роль в обеспечении непрерывного мониторинга, прогнозирования и поддержки принятия решений на основе сценарного моделирования [9–14]. Цифровой двойник позволяет объединить данные из различных источников, включая телеметрию техники, дистанционное зондирование, учетные системы и метеорологические наблюдения, и использовать их в рамках единого модельного контура.

Современные исследования показывают, что применение цифровых двойников способствует переходу от реактивного к проактивному управлению, позволяя оценивать последствия управленческих решений до их практической реализации. При этом ключевыми условиями эффективности выступают интероперабельность данных, регулярная калибровка моделей и формализация показателей, используемых в оценке [10; 11; 13].

Несмотря на значительный прогресс в развитии методов многокритериального анализа и цифровых технологий, их интеграция в агропромышленном производстве остается ограниченной [15; 16]. Существующие подходы многокритериальной оценки, как правило, не учитывают динамическую природу данных, их качество и особенности формирования в цифровых системах. В то же время исследования в области цифровых двойников преимущественно сосредоточены на моделировании отдельных процессов и недостаточно охватывают задачи комплексной оценки эффективности производства [12–14].

В научной литературе сформировался методологический разрыв между развитием аппарата многокритериальной оценки и практикой использования данных в цифровых аграрных системах. Это определяет необходимость разработки моделей, интегрирующих методы многокритериального анализа с архитектурой цифрового двойника, с учетом качества данных и временной динамики показателей.

Предлагаемая концепция формирования концептуальной модели многокритериальной оценки агропромышленного производства опирается на объектно-ориентированное представление системы и принцип замкнутого цикла управления на основе цифрового двойника. Объектность означает, что показатели не существуют автономно, каждый показатель однозначно привязан к объекту цифрового двойника и масштабу принятия решений. На уровне первичных объектов это поле и культура, почвенные зоны, техника и технологические операции, производственные мощности и операции переработки, партии продукции, элементы водосбора и дренажной инфраструктуры. Для каждого объекта задается паспорт показателей, включающий определение, размерность, направление оптимизации, тип шкалы, источник данных, периодичность обновления, процедуру расчета и требования к качеству исходных данных. Это обеспечивает воспроизводимость и сопоставимость оценок и позволяет перейти от описательной статистики к формализованному многокритериальному профилированию объектов.

Концепция включает три согласованные характеристики критериев, соответствующие логике управления ресурсной эффективностью и цифровой зрелостью. Характеристика природных ресурсов отражает результативность использования земельных, водных и энергоклиматических ресурсов через показатели продуктивности и устойчивости, а также через показатели нагрузки и деградации. Характеристика производственных ресурсов фиксирует эффективность труда, капитала и техники, материальных ресурсов и технологий через показатели производительности, фондоотдачи, загрузки мощностей, затрат на обслуживание, себестоимости операций и технологической дисциплины. Характеристика цифровых технологий задает измерение цифровой вовлеченности как управленческого ресурса через показатели покрытия связью, оснащенности телематикой, доли процессов с цифровым сбором данных, метрик качества данных, доли решений на основе аналитики, доли электронного документооборота, доли сценарного планирования и точности прогнозов. В результате модель формирует основу для сопоставимой оценки по разномерным показателям, при этом цифровая характеристика рассматривается не как вспомогательная, а как структурное условие надежности оценок и применимости сценарного управления, что согласуется с выводами ОЕСД о зависимости эффекта цифровизации от доверия к данным и институтам управления данными [15; 16].

Математическое моделирование в рамках концепции выполняет две взаимосвязанные функции. Первая функция оценочная, она реализует процедуры нормирования и агрегирования показателей в согласованные индексы и интегральную многокритериальную оценку объекта с учетом направлений оптимизации и типов шкал. Вторая функция управленческая, она реализует сценарное моделирование и сравнение альтернатив, например, технологий возделывания, режимов внесения и защиты растений, вариантов логистики и графиков обслуживания техники. Цифровой двойник обеспечивает вычислительную инфраструктуру и данные для этих функций и одновременно обеспечивает валидацию, поскольку расчетные значения и прогнозы сопоставляются с фактическими наблюдениями, а расхождения используются для калибровки моделей и контроля качества данных. Таким образом, концепция задает методологическую связку: формализованные критерии и паспорта показателей, объектная модель цифрового двойника, модельный слой расчетов и сценариев, контур валидации по факту [8].

Вклад автора заключается в разработке интеграционной модели, объединяющей методы многокритериальной оценки, цифровые двойники и формализованный учет качества данных в рамках единой вычислительной схемы.

Пусть объектом многокритериальной оценки выступает совокупность управляемых единиц, соответствующих объектам цифрового двойника агропромышленного производства, например, поля и культуры, технологические операции, единицы техники, производственные мощности, партии продукции и элементы водосбора. Для формализации введем множество объектов $O = \{1, \dots, N\}$ и множество критериев $K = \{1, \dots, M\}$, где каждому критерию k соответствует один из выбранных показателей, относящихся к доменам природных ресурсов, производственных ресурсов и вовлеченности цифровых технологий. Значения критериев фиксируются в момент времени или за период t и образуют матрицу наблюдений $X = [x_{ik}(t)]$, где $x_{ik}(t)$ — это значение критерия k для объекта i . В архитектуре цифрового двойника показатели рассматриваются как функции первичных данных, поступающих из разных контуров мониторинга и учета, т. е. $x_{ik}(t) = f_k(z_{i,t})$, где $z_{i,t}$ включает телеметрию техники, лабораторные измерения, учетные записи ERP и FMIS, методанные, сведения дистанционного зондирования и другие источники, а $f_k(\cdot)$ задает процедуру агрегации или расчетную модель. В модели используются методы многокритериального анализа, включая аддитивную свертку, энтропийное взвешивание и метод TOPSIS.

Для обеспечения сопоставимости разноразмерных показателей задается направление оптимизации критерия. Для каждого k вводится параметр $s_k \in \{+1, -1\}$, где $s_k = +1$ соответствует критериям, подлежащим максимизации, а $s_k = -1$ — критериям, подлежащим минимизации:

$$s_k = \begin{cases} +1, & \text{если критерий подлежит максимизации,} \\ -1, & \text{если критерий подлежит минимизации.} \end{cases} \quad (1)$$

Сопоставимость показателей достигается через нормирование, приводящее значения к безразмерной шкале, интерпретируемой как «больше означает лучше». Для задач мониторинга и ранжирования объектов цифрового двойника удобна min max нормировка на интервал $[0, 1]$. Для критериев максимизации нормированное значение задается как

$$r_{ik} = \frac{x_{ik} - x_k^{\min}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}. \quad (2)$$

Для критериев минимизации нормированное значение задается как

$$r_{ik} = \frac{x_k^{\max} - x_{ik}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}. \quad (3)$$

В случаях когда для показателей заданы нормативы или целевые значения, применяется нормирование относительно цели T_k . Для критериев максимизации используется выражение

$$r_{ik} = \min\left(1, \frac{x_{ik}}{T_k}\right). \quad (4)$$

Для критериев минимизации используется выражение

$$r_{ik} = \min\left(1, \frac{T_k}{x_{ik}}\right). \quad (5)$$

Для задач, ориентированных на статистическое моделирование и устойчивые сравнения во времени, применяется стандартизация, где μ_k и σ_k соответственно среднее и стандартное отклонение по критерию

$$z_{ik} = \frac{x_{ik} - \mu_k}{\sigma_k}. \quad (6)$$

Для приведения к шкале «больше означает лучше» при стандартизации используется учет направления оптимизации

$$z'_{ik} = s_k z_{ik}. \quad (7)$$

Агрегация нормированных критериев требует задания весов $w_k \geq 0$, нормированных условием $\sum_{k=1}^M w_k = 1$. При наличии достаточной выборки может применяться энтропийный подход. В этом случае сначала рассчитываются относительные доли

$$p_{ik} = \frac{r_{ik}}{\sum_{i=1}^N r_{ik}}. \quad (8)$$

Далее вычисляется энтропия критерия

$$e_k = -\frac{1}{\ln N} \sum_{i=1}^N p_{ik} \ln p_{ik}. \quad (9)$$

Затем вводится мера различимости

$$d_k = 1 - e_k, \quad (10)$$

после чего веса задаются как

$$w_k = \frac{d_k}{\sum_{k=1}^M d_k}. \quad (11)$$

В случае применения метода анализа иерархий веса формируются на основе матрицы попарных сравнений $A = [a_{kl}]$ и определяются как нормированный собственный вектор, удовлетворяющий условию

$$Aw = \lambda_{\max} w, \quad \sum_{k=1}^M w_k = 1. \quad (12)$$

После нормирования и задания весов формируется интегральная оценка объекта. В базовой форме используется аддитивная свертка

$$S_i = \sum_{k=1}^M w_k r_{ik}. \quad (13)$$

В рамках доменной структуры критериев рассчитываются доменные индексы. Для домена g с набором критериев K_g используется выражение

$$D_{i,g} = \sum_{k \in K_g} w_{k|g} r_{ik}, \quad \sum_{k \in K_g} w_{k|g} = 1. \quad (14)$$

Итоговая оценка по доменам задается как

$$S_i = \sum_{g \in \mathcal{G}} W_g D_{i,g}, \quad \sum_{g \in \mathcal{G}} W_g = 1. \quad (15)$$

В задачах, где требуется оценивать близость профиля к «идеальному» сочетанию критериев, применяется метод многокритериального принятия реше-

ний TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Сначала формируется взвешенная нормированная матрица

$$v_{ik} = \omega_k r_{ik}. \quad (16)$$

Далее задаются идеальная и антиидеальная точки

$$v_k^+ = \max_i v_{ik}, v_k^- = \min_i v_{ik}. \quad (17)$$

После этого вычисляются расстояния до идеала и антиидеала

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{k=1}^M (v_{ik} - v_k^+)^2}, d_i^- = \sqrt{\sum_{k=1}^M (v_{ik} - v_k^-)^2}. \quad (18)$$

Завершающим шагом рассчитывается коэффициент близости к идеалу

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}. \quad (19)$$

Поскольку качество данных является элементом цифрового домена и влияет на надежность модельных расчетов, вводится корректировка нормированных значений на основе интегральной оценки качества данных $q_{ik} \in [0, 1]$. Скорректированное значение определяется как

$$\tilde{r}_{ik} = q_{ik} r_{ik}. \quad (20)$$

Итоговая оценка с учетом качества данных задается как

$$\tilde{S}_i = \sum_{k=1}^M \omega_k \tilde{r}_{ik}. \quad (21)$$

В терминах цифрового двойника приведенные выражения реализуют вычислительный цикл, в котором первичные данные $z_{i,t}$ преобразуются в показатели $x_{ik}(t)$ через функции $f_k(\cdot)$, далее выполняются нормирование и учет направлений оптимизации, после чего осуществляется агрегирование в доменные индексы и итоговую многокритериальную оценку. Сценарное моделирование задается как изменение управленческих воздействий u , влияющих на входные данные и параметры моделей, вследствие чего формируются альтернативные траектории $x_{ik}(t; u)$, которые затем проходят тот же контур нормирования и агрегации, обеспечивая сопоставимое сравнение сценариев на единой шкале.

В дальнейшем формализация требует явного учета времени, поскольку значительная часть показателей в АПК имеет сезонную природу и различную частоту наблюдений. Пусть период наблюдения разбит на дискретные интервалы $t \in T$, где шаг выбирается исходя из доступности данных, например, день для телематики, неделя для оперативного учета, сезон для урожайности. Тогда исходные значения критериев записываются как $x_{ik}(t)$, а базовая матрица X становится трехмерной выборкой $\{x_{ik}(t)\}$. Для перехода к оценке за агрегированный период T вводится оператор временной агрегации $Agg_k(\cdot)$, специфичный для критерия k

$$\bar{x}_{ik}(T) = Agg_k(\{x_{ik}(t)\}_{t \in T}). \quad (22)$$

Выбор Agg_k определяется экономическим смыслом показателя. Для потоковых затрат и потребления ресурсов типовой является сумма, для интенсивностей и удельных показателей — среднее, для рисков и нарушений — максимум или квантиль. В качестве минимально достаточного набора для методики можно зафиксировать три формы агрегации: среднее, сумма и квантиль

$$\bar{x}_{ik}(T) = \frac{1}{|T|} \sum_{t \in T} x_{ik}(t), \bar{x}_{ik}(T) = \sum_{t \in T} x_{ik}(t), \bar{x}_{ik}(T) = Q_{\alpha}(\{x_{ik}(t)\}_{t \in T}). \quad (23)$$

Для обеспечения сопоставимости объектов разного масштаба вводится нормирование по экспозиции, когда показатель переводится в удельный вид относительно площади, выпуска, времени работы или поголовья. Пусть e_i — это мера экспозиции объекта i , тогда удельная форма записывается как $x_{ik}^* = x_{ik} / e_i$, после чего применяется выбранная процедура нормирования

$$x_{ik}^*(t) = \frac{x_{ik}(t)}{e_i(t)}, \bar{x}_{ik}^*(T) = \frac{\bar{x}_{ik}(T)}{\bar{e}_i(T)}. \quad (24)$$

В цифровом двойнике существенной проблемой является неполнота данных и неоднородность частоты наблюдений. Для формальной корректности методики вводится индикатор наблюдаемости $m_{ik}(t) \in \{0, 1\}$, равный единице при наличии наблюдения и нулю при пропуске. Тогда агрегирование по времени выполняется по наблюдаемым значениям, а степень полноты фиксируется отдельно как компонент качества данных

$$\bar{x}_{ik}(T) = \frac{\sum_{t \in T} m_{ik}(t) x_{ik}(t)}{\sum_{t \in T} m_{ik}(t)}. \quad (25)$$

Для интегрального показателя качества данных q_{ik} целесообразно использовать мультипликативную форму, поскольку она жестко снижает итоговую оценку при провале хотя бы одной компоненты качества. Пусть c_{ik} — это полнота, a_{ik} — это точность, u_{ik} — это своевременность, каждая метрика лежит в $[0, 1]$. Тогда

$$q_{ik} = c_{ik}^{\alpha} a_{ik}^{\beta} u_{ik}^{\gamma}, \alpha, \beta, \gamma \geq 0. \quad (26)$$

Полнота может быть определена как доля ожидаемых наблюдений, точность — как доля записей, прошедших правила валидации, своевременность — как доля наблюдений, поступивших в допустимый временной лаг:

$$\begin{aligned} c_{ik} &= \frac{\sum_{t \in T} m_{ik}(t)}{|T|}, \\ a_{ik} &= 1 - \frac{\# \text{ ошибок валидации}}{\# \text{ проверенных записей}}, \\ u_{ik} &= 1 - \frac{\# \text{ просроченных наблюдений}}{\# \text{ ожидаемых наблюдений}}. \end{aligned} \quad (27)$$

Следующий элемент методики связан с тем, что часть критериев имеет характер ограничений, а не предпочтений. Это особенно характерно для экологических показателей, например, химическая нагрузка и качество стока. Для таких критериев вводится функция штрафа, которая обнуляет или резко снижает оценку при нарушении порога. Пусть L_k — это допустимый предел для критерия минимизации, тогда штрафная функция может быть задана в гладкой форме

$$\pi_{ik} = \begin{cases} 1, & x_{ik} \leq L_k, \\ \exp(-\eta_k(x_{ik} - L_k)), & x_{ik} > L_k, \end{cases} \eta_k > 0. \quad (28)$$

В этом случае корректировка нормированного значения может учитывать как качество данных, так и соблюдение ограничений

$$\hat{r}_{ik} = q_{ik} \pi_{ik} r_{ik}. \quad (29)$$

Иерархическая структура цифрового двойника приводит к необходимости агрегации оценок с уровня объектов нижнего порядка на уровень хозяйства или территории. Пусть j индексирует агрегированный объект, например хозяйство, а O_j — это множество входящих в него объектов, например поля. Тогда доменные или интегральные оценки агрегируются через веса экспозиции, например, площади или выпуска

$$S_j = \sum_{i \in O_j} \omega_{ij} S_i, \omega_{ij} = \frac{e_i}{\sum_{i \in O_j} e_i}. \quad (30)$$

Для сценарного анализа вводится управленческий вектор решений $u \in U$, включающий технологические режимы, нормы внесения, состав операций, графики ремонтов, параметры логистики и цифровизации. Тогда показатели зависят от сценария u и записываются как $x_{ik}(t; u)$, а итоговая оценка — как $S_i(u)$. Задача выбора сценария приобретает вид многокритериальной оптимизации. В рамках статьи корректно представить ее как оптимизацию интегральной функции при наличии жестких ограничений по части критериев

$$\max_{u \in U} S_i(u) \text{ при условиях } x_{ik}(u) \leq L_k \text{ для } k \in \mathcal{K}_{\text{огр}}. \quad (31)$$

Если требуется подчеркнуть многокритериальность без сведения к одному индексу, можно использовать постановку через Парето-оптимальность. Пусть $\mathbf{r}_i(u) = (r_{i1}(u), \dots, r_{iM}(u))$. Тогда сценарий u^* является Парето-оптимальным, если не существует u , улучшающего хотя бы один критерий без ухудшения другого

$$\nexists u \in U : r_{ik}(u) \geq r_{ik}(u^*) \forall k, \text{ и } r_{ik}(u) > r_{ik}(u^*) \text{ для некоторого } k. \quad (32)$$

В прикладной реализации цифрового двойника указанные формулы образуют единый расчетный конвейер: расчет показателей из первичных данных, приведение к удельным величинам, временная агрегация, нормирование, учет качества данных и ограничений, расчет доменных и интегральных оценок, агрегация по иерархии объектов, далее сценарные расчеты и сравнение альтернатив в индексной или Парето-форме. Это обеспечивает воспроизводимость, возможность регулярного пересчета при поступлении новых данных и возможность обоснования управленческих решений с учетом компромиссов между продуктивностью, ресурсной эффективностью, экологическими ограничениями и цифровой зрелостью.

Методика и концептуальная архитектура предлагаемой модели исходят из предпосылки, что агропромышленное производство следует рассматривать как сложную систему, в которой результативность определяется не одной целевой функцией, а совокупностью взаимосвязанных критериев, относящихся к природной среде, производственным ресурсам и цифровому контуру управления. В практических условиях АПК разрозненные показатели формируются в различных учетно-информационных контурах и часто обладают несопоставимой размерностью, неоднородной периодичностью наблюдений и различной степенью достоверности. Это приводит к методологическому разрыву между наличием данных и возможностью их корректного использования для поддержки управленческих решений, особенно в задачах сравнения альтернатив, мониторинга эффективности и оценки устойчивости. Предлагаемая концептуальная модель устраняет указанный разрыв за счет объектно ориентированной структуры цифрового двойника и формализованной про-

цедуры многокритериальной оценки, в которой каждый критерий привязан к конкретному объекту управления и описан единым паспортом показателя.

Научная новизна предлагаемой модели заключается в разработке интегративного подхода к многокритериальной оценке агропромышленного производства, основанного на сочетании методов многокритериального анализа, архитектуры цифрового двойника и формализованного учета характеристик данных. В отличие от существующих решений модель ориентирована на обеспечение сопоставимости, воспроизводимости и интерпретируемости результатов оценки в условиях цифровизации производственных систем.

К числу ключевых отличительных характеристик модели относится реализация объектно-ориентированного принципа формирования критериев, в соответствии с которым каждый показатель однозначно соотносится с конкретным объектом цифрового двойника и уровнем управления. Это позволяет обеспечить согласование системы показателей с реальной структурой производственных процессов и повысить корректность интерпретации результатов оценки.

Существенным элементом модели является формализация процедуры формирования показателей как функций первичных данных и алгоритмов их обработки. В отличие от традиционных подходов многокритериальной оценки, предполагающих использование заранее заданных показателей, в предлагаемой модели критерии рассматриваются как результат трансформации данных, поступающих из различных информационных контуров, что обеспечивает прозрачность расчетов и воспроизводимость результатов.

Отдельное внимание в модели уделено учету качества данных, которое рассматривается как неотъемлемый элемент процедуры оценки. Введен интегральный показатель качества данных, включающий характеристики полноты, точности и своевременности, который непосредственно влияет на итоговую оценку. Это позволяет учитывать надежность информационной базы при формировании управленческих выводов и снижает риск искажения результатов вследствие некорректных или неполных данных.

Важной особенностью модели является ее динамический характер, обеспечивающий учет временной структуры данных и позволяющий проводить оценку в условиях сезонности и изменчивости агропромышленного производства. Это расширяет аналитические возможности модели за счет перехода от статических оценок к анализу динамики показателей и их изменений во времени.

Дополнительно в модели реализован механизм учета ограничений, включая экологические и технологические параметры, посредством введения штрафных функций. Это обеспечивает интеграцию нормативных требований в процедуру многокритериальной оценки и позволяет учитывать допустимые пределы значений показателей на этапе расчета, а не в рамках последующей интерпретации.

Предлагаемая модель допускает использование различных форм представления многокритериальной задачи, включая как агрегирование критериев в интегральный показатель, так и анализ в терминах Парето-оптимальности. Это обеспечивает гибкость применения модели и возможность учета компромиссного характера управленческих решений.

Научная новизна заключается в формировании целостной методологической конструкции, объединяющей методы многокритериальной оценки, инструменты цифровых двойников и формализованные механизмы учета качества данных и временной динамики, что обеспечивает повышение обоснованности и надежности управленческих решений в агропромышленном производстве.

Представленная система критериев отражает предложенную структуру многокритериальной оценки и служит основой для практической реализации модели. Для Республики Беларусь были определены следующие характеристики (см. таблицу).

**Система критериев и показателей эффективности агропромышленного производства
в модели цифрового двойника**

Блок	Подблок	Критерий	Метрика (пример)	Направление оптимизации	Тип шкалы	
Природные ресурсы	1	3	4	5	6	
		Урожайность на единицу площади	т на гектар, ц на гектар	Максимизация	Натуральная количественная (отношений)	
	Земельные	Коэффициент использования пашни	Доля используемой площади, коэффициент севооборота	Максимизация	Относительная (доли, проценты)	
		Индекс плодородия почв	Интегральный балл на основе гумуса, рН, NPK	Максимизация	Индексная (балльная, интегральная)	
		Потери почвы от эрозии	т на гектар в год, доля эродированных земель	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)	
		Интенсивность химической нагрузки	кг д.в. СЗР на гектар с риск поправкой	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)	
		Водные	Качество стока	концентрации N и P, нагрузка на водные объекты	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)
			Энергоемкость с учетом природных факторов	кВт ч на т продукции, нормировка по зоне	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)
		Энергоклиматические	Выбросы парниковых газов на единицу продукции	кг CO ₂ экв на кг или т продукции	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)
			Устойчивость к климатическим рискам	вариация урожайности, частота потерь	Минимизация	Смешанная: относительная (частоты) плюс статистическая (вариация)

1	2	3	4	5	6	
Производственные ресурсы	Трудовые	Производительность труда	EUR на человека, EUR на человека час, т на человеко час	Максимизация	Натуральная количественная (отношений)	
		Квалификационная структура	доля работников с компетенциями, индекс обучения	Максимизация	Смешанная: относительная (доля) плюс индексная (балльная)	
	Капитал и техника	Фондоотдача	EUR выпуска на EUR основных средств	EUR выпуска на EUR основных средств	Максимизация	Натуральная количественная (отношений)
		Коэффициент загрузки мощностей	фактическая к номинальной	фактическая к номинальной	Максимизация	Относительная (доли, проценты)
		Затраты на содержание и ремонт	EUR на машино час, EUR на гектар	EUR на машино час, EUR на гектар	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)
		Себестоимость операций	EUR на гектар, EUR на т	EUR на гектар, EUR на т	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)
	Материальные и технологические	Материалоемкость	EUR материалов на EUR выпуска	EUR материалов на EUR выпуска	Минимизация	Натуральная количественная (отношений)
		Нормативные отклонения по ресурсам	перерасход относительно норм	перерасход относительно норм	Минимизация	Относительная (отклонение, проценты)
		Выход товарной продукции	доля стандарта качества, потери	доля стандарта качества, потери	Максимизация	Относительная (доли, проценты)
		Коэффициент использования удобрений	прибавка урожая на единицу вещества	прибавка урожая на единицу вещества	Максимизация	Натуральная количественная (отношений)

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	
Цифровые технологии	Инфраструктура и данные	Доля покрытых связью площадей	процент территории с устойчивым интернетом	Максимизация	Относительная (доли, проценты)	
		Доля активов с телематикой	процент техники с передачей данных	Максимизация	Относительная (доли, проценты)	
		Доля процессов с цифровым сбором данных	процент операций с электронными журналами	Максимизация	Относительная (доли, проценты)	
		Качество данных	полнота, точность, своевременность, пропуски	Максимизация	Смешанная: относительная (проценты) плюс индексная (агрегация метрик DQ)	
	Цифровизация и аналитика	Доля управленческих решений на основе аналитики	Доля электронных документов в ЭДО	процент решений через КРІ и модели	Максимизация	Относительная (доли, проценты)
		Доля электронного документооборота	Доля сценарного планирования	доля процессов, где применяются модели	Максимизация	Относительная (доли, проценты)
		Точность прогнозов		ошибка прогноза, процент	Максимизация	Относительная, инвертированная через ошибку (по факту измеряется как ошибка)

Примечание: наша разработка на основе данных Национального статистического комитета Республики Беларусь; Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь; Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды; Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединенных Наций; Министерства экономики Республики Беларусь.

Объектная декомпозиция цифрового двойника формируется исходя из реальной структуры процессов и контуров ответственности в агропромышленном производстве. Базовыми объектами выступают поле и культура как первичные единицы управления в растениеводстве, а также зона внутри поля как уровень, необходимый для учета внутривидовой неоднородности и применения дифференцированных технологических решений. На операционном уровне выделяются технологические операции и их параметры, поскольку именно операции связывают использование ресурсов с результатом и обеспечивают фиксируемость управленческих воздействий. На ресурсном уровне описываются единицы техники и производственные мощности, так как они определяют производительность, надежность и структуру затрат. На уровне выпуска и качества выделяются партии продукции и узлы хранения и транспортировки, поскольку потери и качество товарной продукции формируются не только в поле, но и в логистике и хранении. Для задач экологической результативности и управления водными воздействиями выделяется водосбор и элементы дренажной инфраструктуры, обеспечивающие связь агротехнологий с качеством стока. Такая структура позволяет согласованно описывать как природные, так и экономические, и экологические показатели в рамках единой объектной модели и задает основу для последующей агрегированной оценки на уровне хозяйства или территории.

Таким образом, дальнейшие исследования направлены на переход от концептуального уровня модели к ее практической реализации и валидации, что обеспечит повышение обоснованности управленческих решений и расширение возможностей применения цифровых технологий в агропромышленном производстве.

Литература и электронные публикации

1. The digital transformation of the agriculture and food system. – Paris : OECD Publishing, 2019. – DOI: 10.1787/7a94280c-en. – URL: https://www.oecd.org/en/publications/the-digital-transformation-of-the-agriculture-and-food-system_7a94280c-en.html (date of access: 05.01.2026).
2. Innovation, Productivity and Sustainability in Food and Agriculture: Main Findings from Country Reviews and Policy Lessons. – Paris : OECD Publishing, 2019. – 186 p. – DOI: 10.1787/c9c4ec1d-en.
3. *Jouanjean M.* Digital Opportunities for Trade in the Agriculture and Food Sectors. – Paris : OECD Publishing, 2019. – 58 p. – DOI: 10.1787/91c40e07-en.
4. *Saaty, T. L.* The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation / T. L. Saaty. – New York : McGraw-Hill, 1980. – 287 p.
5. *Saaty, T. L.* Decision Making with the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty // International Journal of Services Sciences. – 2008. – Vol. 1, N 1. – P. 83–98.
6. *Hwang, C. L.* Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications / C. L. Hwang, K. Yoon. – Berlin : Springer-Verlag, 1981. – 259 p.
7. *Roy, B.* Multicriteria Methodology for Decision Aiding / B. Roy. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996 – 293 p.
8. The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. – Rome : FAO, 2022. – URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb9479en> (date of access: 05.01.2026).
9. *Pylianidis, C.* Introducing digital twins to agriculture / C. Pylianidis, S. Osinga, I. N. Athanasiadis // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – Vol. 184. – Article 105942. – DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.
10. Orchestration and Applications / M. Escriba-Gelonch [et al] // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2024. – Vol. 72, N 19. – P. 10737–10752. – DOI: 10.1021/acs.jafc.4c01934.

-
11. Comprehensive Review of Digital Twins Technology in Agriculture / R. Zhang [et al], // Agriculture. – 2025. – Vol. 15, N 9 – Article 903. – DOI: 10.3390/agriculture15090903.
 12. Big Data in Smart Farming – A review / S. Wolfer [et al] // Agricultural Systems – 2017 – Vol. 153. – P. 69–80 – DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.
 13. *Klerkx, L.* A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0 / L. Klerkx, E. Jakku, P. Labarthe // NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences. – 2019. – Vol. 90–91. – Article 100315. – DOI: 10.1016/j.njas.2019.100315.
 14. *Jiang, Y.* Digital twin-driven smart agriculture: Concepts, applications and challenges / Y. Jiang, C. Wang, Y. Wang // Information Processing in Agriculture. – 2023. – Vol. 10. – P. 1–15. – DOI: 10.1016/j.inpa.2022.10.002.
 15. Digital Opportunities for Better Agricultural Policies. – Paris : OECD Publishing, 2019. – URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/09/digital-opportunities-for-better-agricultural-policies_2f2824f9/571a0812-en.pdf (date of access: 05.01.2026).
 16. *McFadden, J.* Policies to bolster trust in agricultural digitalisation: Issues note / J. McFadden, F. Casalini, J. Antyn – Paris : OECD Publishing, 2022. – 36 p. – URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/04/policies-to-bolster-trust-in-agricultural-digitalisation_dccbe003/5a89a749-en.pdf (date of access: 05.01.2026).
-

ALESIA MAZOL

CONCEPTUAL MODEL FOR MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF AGRICULTURAL PRODUCTION BASED ON MATHEMATICAL MODELING AND DIGITAL TWINS

Author affiliation. *Alesia MAZOL* (a.mozol@aol.com), Associate professor, Candidate of Economic Sciences, Department of Mathematical Methods in Economics, Belarus State Economic University (Minsk, Belarus).

Abstract. This paper proposes a conceptual model for multi-criteria evaluation of agro-industrial systems in the context of digital transformation and data-driven management. Unlike existing approaches, the model integrates multi-criteria decision-making methods with digital twin architecture and formalized data quality assessment. It ensures comparability of heterogeneous indicators, incorporates temporal dynamics, and embeds constraints into the evaluation process. The proposed approach enhances the robustness of decision-making and can be applied in the development of digital management and decision support systems.

Keywords: agro industrial complex; digital twin; efficiency; multi criteria assessment; composite index; indicator normalization; data quality; environmental constraints.

UDC: 338.244.1

*Статья поступила
в редакцию 06.03.2026 г.*