Математическая модель многокритериальной оценки эффективности агропромышленного производства на основе цифрового двойника на примере Республики Беларусь

Мозоль Алеся Александровна,
кандидат экономических наук, доцент,
доцент кафедры математических методов в экономике УО «БГЭУ»
(г. Минск, Беларусь)

Ефремов Андрей Александрович,
кандидат экономических наук, доцент,
заведующий кафедрой экономической информатики УО «БГУИР»
(г. Минск, Беларусь)

В статье рассматривается применение модели многокритериальной оценки эффективности агропромышленного производства, основанной на архитектуре цифрового двойника и методах математического моделирования. Цель исследования заключается в апробации методики интегральной оценки эффективности аграрного сектора, учитывающей использование природных ресурсов, производственную результативность и уровень цифровизации управления. Для обеспечения сопоставимости показателей используются процедуры нормализации, стандартизации и агрегирования данных с применением весовых коэффициентов, что позволяет сформировать интегральный индекс эффективности агропромышленного производства. Апробация модели выполнена на основе данных агропромышленного комплекса Республики Беларусь. Полученные результаты позволяют оценить текущее состояние аграрного сектора и выявить направления повышения эффективности использования ресурсов и развития цифровых технологий в сельском хозяйстве.

The article examines the application of a multicriteria model for evaluating the efficiency of agroindustrial production based on the architecture of a digital twin and methods of mathematical modeling. The purpose of the study is to test an integral methodology for assessing the efficiency of the agricultural sector that considers the use of natural resources, production performance, and the level of digitalization of management. To ensure comparability of indicators, normalization, standardization, and aggregation procedures with weighting coefficients are applied, which makes it possible to construct an integral efficiency index of agroindustrial production. The model is tested using data from the agroindustrial sector of the Republic of Belarus. The obtained results make it possible to assess the current state of the agricultural sector and identify directions for improving resource efficiency and developing digital technologies in agriculture.

Развитие агропромышленного производства в современных условиях сопровождается усложнением системы факторов, определяющих эффективность функционирования отрасли. Помимо традиционных экономических показателей, существенное значение приобретают характеристики устойчивости природопользования, экологической результативности, эффективности использования производственных ресурсов и уровня цифровой зрелости системы управления. В условиях роста климатической вариативности, усиления ресурсных ограничений и повышения требований к экологической устойчивости агропроизводства возникает необходимость перехода от анализа отдельных показателей к комплекс-

ной системе оценки, способной интегрировать разнотипные характеристики деятельности агропромышленного комплекса.

Одним из перспективных направлений формирования таких систем оценки является применение концепции цифрового двойника и методов многокритериального анализа. Цифровой двойник позволяет объединить данные из различных источников наблюдений и учета, включая производственные, экологические и технологические параметры, в единую информационно-аналитическую среду. В рамках такой архитектуры становится возможным формирование воспроизводимых процедур оценки, позволяющих сопоставлять результаты функционирования агропроизводственных систем и обосновывать управленческие решения на основе формализованных критериев.

Настоящая статья представляет собой развитие ранее предложенной концепции и направлена на ее практическую апробацию на примере Республики Беларусь. В рамках исследования формируется система показателей, отражающих использование природных и производственных ресурсов, а также уровень цифровизации аграрного сектора. На основе этих показателей осуществляются нормализация и агрегирование данных с использованием методов многокритериального анализа, что позволяет рассчитать интегральный индекс эффективности агропромышленного производства. Полученные результаты дают возможность оценить текущее состояние аграрного сектора и выявить ключевые направления повышения его эффективности в условиях цифровой трансформации ключевых бизнес-процессов.

Целью исследования является расчет интегральной многокритериальной оценки агропромышленного производства на основе предложенной модели и ее применение для анализа состояния агросектора Республики Беларусь. В рамках исследования осуществляется формирование системы показателей, проведение процедур нормализации и агрегирования данных, а также расчет интегрального индекса, отражающего совокупную эффективность использования природных ресурсов, производственных факторов и цифровых технологий.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования разработанного подхода для мониторинга состояния агропромышленного производства, выявления резервов повышения эффективности и обоснования стратегических направлений развития отрасли в условиях цифровой трансформации экономики.

Научная новизна проведенного исследования заключается в развитии методологических подходов к комплексной оценке эффективности агропромышленного производства в условиях цифровизации экономики. Во-первых, предложена интегрированная модель оценки эффективности агропромышленного производства, объединяющая показатели использования природных ресурсов, производственной эффективности и цифровой зрелости системы управления в рамках единой многокритериальной структуры. В отличие от традиционных методов анализа эффективности аграрного сектора, основанных преимущественно на экономических показателях, предложенный подход позволяет учитывать взаимосвязь экономических, экологических и технологических факторов развития агропроизводства. Во-вторых, разработан алгоритм интегральной оценки эффективности агропромышленного производства, основанный на применении процедур нормализации, стандартизации и взвешенной агрегации показателей. Использование данного алгоритма обеспечивает сопоставимость разнотипных показателей и позволяет формировать интегральный индекс, характеризующий состояние агропромышленной системы. В-третьих, предложено использование архитектуры цифрового двойника в качестве информационной основы многокритериальной оценки агропромышленного производства. В рамках данной архитектуры осуществляется интеграция данных из различных источников, включая производственные показатели, экологические параметры и данные цифровой инфраструктуры аграрного сектора. В-четвертых, проведена апробация разработанной модели на основе данных агропромышленного комплекса Республики Беларусь, что позволило сформировать интегральную оценку эффективности аграрного сектора и выявить ключевые факторы, определяющие его развитие.

Современные исследования эффективности агропромышленного производства демонстрируют постепенный переход от анализа отдельных экономических показателей к комплексным моделям оценки, учитывающим экологические, ресурсные и технологические факторы функционирования аграрных систем. В работах J. Pretty подчеркивается, что устойчивость сельского хозяйства должна рассматри-

ваться не только через объем производимой продукции, но и через способность агросистем сохранять природный капитал и обеспечивать долгосрочную продуктивность. Аналогичные подходы представлены в исследованиях J. Foley и соавторов, где агропродовольственные системы рассматриваются как сложные социально-экологические комплексы, эффективность которых определяется взаимодействием производственных процессов и состояния природных ресурсов. Концепция планетарных границ, предложенная J. Rockström и соавторами, дополнительно акцентирует внимание на необходимости учета экологических ограничений при развитии сельского хозяйства.

Существенное развитие в последние годы получили исследования, посвященные цифровой трансформации аграрного сектора. В аналитических работах OECD и статьях F. Casalini и J. López González отмечается, что внедрение цифровых технологий способствует росту производительности сельского хозяйства за счет улучшения мониторинга производственных процессов, повышения эффективности использования ресурсов и снижения информационных асимметрий на аграрных рынках. Исследования M. Wolfert, L. Ge и C. Verdouw показывают, что интеграция больших данных, телеметрии сельскохозяйственной техники, дистанционного зондирования и метеорологических наблюдений формирует основу для создания цифровых платформ управления агропроизводственными системами.

Отдельное направление научных исследований связано с использованием цифровых двойников и методов многокритериального анализа для оценки эффективности сельскохозяйственных систем. В работах C. Pylianidis, S. Osinga и I. Athanasiadis цифровой двойник рассматривается как киберфизическая модель, объединяющая физические объекты сельскохозяйственного производства, данные мониторинга и аналитические модели. Аналогичные подходы представлены в исследованиях M. Escriba-Gelonch и соавторов, где цифровые двойники рассматриваются как инструмент интеграции данных и поддержки управленческих решений. Использование методов многокритериального анализа, основанных на работах T. Saaty, позволяет интегрировать разнотипные показатели эффективности и формировать комплексные индексы, отражающие состояние агропромышленных систем. В совокупности данные направления исследований формируют научную основу для разработки интегрированных моделей оценки эффективности агропромышленного производства в условиях цифровизации экономики.

Информационная архитектура цифрового двойника строится на интеграции разнородных источников данных, различающихся как по типу наблюдений, так и по частоте обновления. К первичным данным относятся результаты лабораторных анализов почв и воды, учет урожая и выпуска, сведения о технологических операциях, включая внесение удобрений и средств защиты растений, данные телематики и навигации техники, показатели энергоучета и расхода топлива, кадровые данные по трудовым ресурсам и компетенциям, а также данные цифрового контура, характеризующие охват связью, долю активов с телематикой, долю операций с цифровым сбором данных, распространенность электронного документооборота и использование аналитики. Существенную роль играют метеорологические и дистанционные данные, поскольку они необходимы для нормировки и интерпретации сезонных показателей, а также для моделирования рисков. В рамках концепции предполагается, что данные поступают в единый контур управления данными, где обеспечиваются унификация идентификаторов объектов, согласование временных шкал и контроль качества данных. Данный контур рассматривается как обязательное условие применимости модели, поскольку многокритериальная оценка без измеримой достоверности исходных данных не обеспечивает воспроизводимости и может приводить к искажению выводов.

Содержательная структура критериев задается тремя взаимосвязанными группами, которые отражают ключевые направления управленческой оценки в АПК. Первая группа характеристик фиксирует показатели, которые характеризуют результативность использования природных ресурсов и экологическую результативность. Для земельных ресурсов используется набор показателей, включающий урожайность на единицу площади как базовую характеристику продуктивности, коэффициент использования пашни как индикатор полноты вовлечения земельного фонда и соблюдения принципов севооборота, индекс плодородия почв как интегральную характеристику качества почвенного ресурса, потери почвы от эрозии как показатель деградацион-

ных процессов, а также интенсивность химической нагрузки как измерение давления технологических решений на экосистему. Для водных ресурсов в качестве ключевого показателя используется качество стока, выражаемое через концентрации азота и фосфора и нагрузку на водные объекты, что позволяет учитывать внешние эффекты агропроизводства. Для энергоклиматического блока включаются энергоемкость производства с учетом природных факторов, выбросы парниковых газов на единицу продукции и устойчивость к климатическим рискам, определяемая через вариацию урожайности и частоту потерь от экстремальных событий. Указанные показатели отражают не только собственно результативность производства, но и устойчивость природопользования, что соответствует логике современного управления ресурсной эффективностью в агросекторе.

Вторая группа характеристик описывает эффективность использования производственных ресурсов, включая труд, капитал и технику, а также материальные ресурсы и технологии. Для трудовых ресурсов используются производительность труда в натуральном и стоимостном выражении и квалификационная структура персонала, отражающая способность аграрного предприятия поддерживать технологическую дисциплину и внедрять цифровые практики. Также можно включать характеристики для основного капитала, в первую очередь сельскохозяйственной техники. Например, фондоотдачу, коэффициент загрузки мощностей, затраты на содержание и ремонт и себестоимость операций, что позволит связать результаты производства с интенсивностью использования активов и с затратами жизненного цикла. Такие наборы показателей обеспечивают выявление точек роста и резервов повышения эффективности как по финансово-экономическому контуру, так и по контуру технологического исполнения, где отклонения от норм часто определяют уровень затрат и потерь.

Третья группа характеристик фиксирует вовлеченность цифровых технологий как фактора управляемости и воспроизводимости оценок. В инфраструктурном блоке используются такие параметры, как: доля покрытых связью производственных площадок, доля активов с телематикой, доля процессов с цифровым сбором данных и качество данных, определяемое через полноту, точность и своевременность. В блоке цифровизации процессов и аналитики применяются доля управленческих решений, принятых на основе аналитики, доля электронного документооборота, доля сценарного планирования и точность прогнозов. Включение этих показателей в общую систему критериев обеспечивает двойной эффект. Во-первых, цифровизация отражает зрелость организационно-технологической среды, в которой имеют место модельные расчеты и управление на основе данных. Во-вторых, цифровизация выступает фактором надежности оценок, поскольку низкое качество данных и слабый охват цифровых процессов снижают достоверность итоговых индексов и ограничивают применимость сценарных расчетов.

Для обеспечения воспроизводимости расчетов и сопоставимости результатов методика вводит паспорт показателя как обязательный элемент модели. Паспорт фиксирует определение критерия и его экономический смысл, единицы измерения и тип шкалы, направление оптимизации, источники данных и правила их интеграции, периодичность обновления и правила временной агрегации, а также метод расчета, включая необходимость моделирования для расчетных индикаторов. В рамках концепции показатели разделяются на непосредственно наблюдаемые и расчетные. Наблюдаемые формируются через учет и мониторинг, например урожайность, доля активов с телематикой, доля операций с цифровым сбором данных и доля электронного документооборота. Расчетные показатели требуют применения доменных моделей и коэффициентов, например, оценка потерь почвы от эрозии, расчет выбросов парниковых газов на единицу продукции и оценка нагрузки азота и фосфора в стоке. Такое разделение позволяет корректно выстроить контур валидации. Наблюдаемые показатели контролируются через учетные сверки и требования к качеству данных, а расчетные дополнительно требуют калибровки моделей по наблюдаемым показателям и проверок на согласованность.

Процедура многокритериальной оценки в рамках предлагаемой концепции реализуется как последовательный вычислительный конвейер внутри цифрового двойника. На первом этапе осуществляется сбор и гармонизация первичных данных по объектам, что включает унификацию идентификаторов, привязку к пространственным объектам и синхронизацию временных рядов. На втором этапе рассчитываются значения критери-

ев по функциям показателей, часть из которых представляет собой агрегирование первичных данных, а часть — расчетные модели. На третьем этапе выполняется приведение показателей к сопоставимому виду посредством нормирования и учета направления оптимизации, что устраняет несопоставимость размерностей и обеспечивает возможность агрегирования. На четвертом этапе формируются индексы, отражающие состояние природных ресурсов, производственных ресурсов и цифровой зрелости, после чего рассчитывается итоговая оценка объекта, а также оценки на верхних уровнях иерархии посредством агрегирования по экспозиции, например, площади, объему выпуска или времени работы активов. При этом методика предусматривает трактовку отдельных критериев как ограничений, прежде всего в экологическом контуре, когда превышение допустимых уровней должно приводить к штрафованию итоговой оценки независимо от высоких значений по другим показателям. Эта логика принципиальна для исключения компенсации экологических нарушений экономическими результатами и обеспечивает корректность интерпретации итоговых индексов в контексте устойчивости.

Сценарный модуль цифрового двойника интерпретируется как механизм связи оценки с управленческими воздействиями. Управленческие решения в АПК выражаются через изменения технологических режимов, норм внесения, состава операций, графиков ремонтов и обновления техники, параметров хранения и логистики, а также через решения в цифровом контуре, включая расширение телематики, внедрение электронных журналов и повышение качества данных. В рамках концепции такие воздействия рассматриваются как изменения входных параметров и условий в функциях расчета критериев, что приводит к альтернативным значениям показателей и, следовательно, к альтернативным многокритериальным профилям. Это обеспечивает формализацию выбора между альтернативами как задачи поиска компромисса, где сравнение сценариев выполняется на единой методологической основе. Практическая значимость указанного подхода заключается в возможности обоснованного ранжирования технологий и проектов, включая проекты цифровизации, поскольку последние оцениваются не только по затратам, но и по влиянию на охват данных, качество данных и точность прогнозов, то есть на способность системы поддерживать управляемость и снижать неопределенность.

Верификация и устойчивость методики обеспечиваются включением контура качества данных и контура обратной связи. Качество данных рассматривается как измеряемая характеристика цифрового контура и одновременно как параметр надежности расчетов, поскольку низкая полнота или несвоевременность данных по отдельным объектам снижает достоверность нормирования и итоговых индексов. Контур обратной связи реализуется через сопоставление прогнозных и расчетных значений с фактическими наблюдениями, выявление систематических отклонений, уточнение параметров моделей и методик расчета. Это позволяет поддерживать актуальность цифрового двойника при изменении технологий, структуры посевов, погодных условий и внешних ограничений. В результате предлагаемая концептуальная архитектура формирует воспроизводимую основу для многокритериальной оценки агропромышленного производства, объединяя критерии природной результативности, производственной эффективности и цифровой зрелости в едином объектно ориентированном контуре, пригодном как для мониторинга, так и для сценарного обоснования решений.

Для выполнения многокритериальной оценки агропромышленного производства в Республике Беларусь использовались несколько ключевых критериев, характеризующих использование природных и производственных ресурсов, а также вовлеченность цифровых технологий. В процессе расчетов были применены методы нормализации, стандартизации и агрегации, что позволяет обеспечить сопоставимость показателей и учет их влияния на общую оценку.

Для каждого из выбранных критериев применялась min-max нормализация, которая привела значения к шкале от 0 до 1. Это позволило сопоставить показатели с разными единицами измерения, обеспечив их совместимость. Для нормализации критериев максимизации использовалась следующая формула:

$$r_{ik} = \frac{x_{ik} - x_k^{min}}{x_k^{max} - x_k^{min}}. \qquad (1)$$

Для критериев минимизации формула нормализации была следующей:

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

При этом для показателей с целевыми значениями (например, урожайность или выбросы CO_2) применялись формулы нормализации относительно целевых значений T_k.

Для максимизируемых критериев:

$$r_{ik} = \min\left(1, \frac{x_{ik}}{T_k}\right) \quad (3)$$

Для минимизируемых критериев:

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

Для некоторых критериев, таких как интенсивность химической нагрузки или выбросы CO_2, была использована стандартизация на основе среднего значения и стандартного отклонения:

$$z_{ik} = \frac{x_{ik} - \mu_k}{\sigma_k}, \quad (5)$$

где μ_k — среднее значение критерия,

σ_k — стандартное отклонение.

После этого учтено направление оптимизации (максимизация или минимизация) с помощью коэффициента S_k:

$$z_k' = S_k . z_{ik} \quad (6)$$

После нормализации и стандартизации данных, для получения итоговой оценки, была проведена агрегация показателей. Для этого использовалась взвешенная сумма нормализованных значений по каждому критерию:

$$S_i = \sum_{k=1}^{M} w_k r_{ik}, \quad (7)$$

где w_k — вес каждого критерия,

r_{ik} — нормализованное значение для объекта i.

Для проведения расчетов использовались предопределенные данные по целевым значениям, нормативам и весам для каждого критерия, которые были получены на основе экспертных оценок и существующих нормативов в агропромышленном производстве.

В соответствии с важностью каждого критерия для оценки агропромышленного производства в Беларуси экспертным путем были определены следующие веса:

- земельные ресурсы (30 %),
- водные ресурсы (20 %),
- энергетические и климатические показатели (25 %),
- производственные ресурсы (15 %),
- цифровизация и технологии (10 %).

Используя эти веса, мы рассчитали итоговую многокритериальную оценку для агропромышленного производства, применяя формулу (7).

По результатам выполнения расчетов имеем:

$$S = 0{,}509 \quad (8)$$

Итоговый индекс многокритериальной оценки агропромышленного производства в Беларуси составляет 0,509. Это значение отражает текущий уровень устойчивости и цифровой зрелости сельскохозяйственного сектора с учетом всех рассмотренных показателей.

На основе полученной многокритериальной оценки можно сделать выводы о текущем состоянии агропромышленного производства в Беларуси в контексте использования природных ресурсов, производственных мощностей и цифровизации. Итоговый индекс 0,509 показывает, что в настоящее время в агросекторе страны сохраняются значительные возможности для улучшения, особенно в области цифровизации и устойчивости к климатическим рискам.

Полученный интегральный индекс многокритериальной оценки агропромышленного производства входит в интервал от 0,5 до 0,7, что можно охарактеризовать как средний уровень эффективности и устойчивости аграрного сектора в рамках выбранной системы критериев. Значение индекса, находящееся вблизи середины шкалы, свидетельствует о том, что агропромышленный сектор Республики Беларусь обладает определенным потенциалом развития, однако сохраняются структурные ограничения, связанные с использованием природных ресурсов, технологической эффективностью и уровнем цифровизации производственных процессов.

Анализ структуры индекса показывает, что наибольшее влияние на итоговую оценку оказывают показатели использования земельных ресурсов и экологические характеристики

Таблица 1. Система критериев и показателей эффективности агропромышленного производства в модели цифрового двойника

Категория	Критерий	Формула для расчета	Значение	Пояснение
Земельные ресурсы	Урожайность на единицу площади (максимизация)	$Y_i = \frac{\text{Общий урожай культуры в т}}{\text{Площадь, занятая культурой, в га}}$	$Y_{\text{зерновые}} = 33{,}8$ ц/га	Определяет эффективность использования земель с учетом урожайности по различным культурам
	Коэффициент использования пашни (максимизация)	$K_p = \frac{\text{Используемая площадь}}{\text{Общая площадь пашни}}$	$K_p = 0{,}696$	Показывает долю используемой площади от общей площади сельскохозяйственных земель
	Индекс плодородия почв (максимизация)	$F = w_1 . \text{Гумус} + w_2 . \text{pH} + w_3 . \text{NPK}$	$F = 0{,}46$	Интегральная оценка состояния почвы на основе нескольких агрохимических показателей (гумус, pH, NPK)
	Потери почвы от эрозии (минимизация)	$E = \frac{\text{Потери почвы в т}}{\text{Площадь земель в га}}$	$E_{\text{эрозия}} = 10$ млнт/га	Оценка потерь почвы в результате эрозионных процессов в год
	Интенсивность химической нагрузки (минимизация)	$C = \frac{\text{Использование СЗР в кг}}{\text{Площадь в га}}$	$C = 205$ кг/га	Оценка химической нагрузки на почву и экологическую ситуацию
Водные ресурсы	Качество стока (минимизация)	$Q = \frac{\text{Концентрация N и P в стоке}}{\text{Площадь водосбора}}$	$Q = 0{,}70$	Нагрузка на водные объекты, исходя из концентрации загрязняющих веществ в стоке
Энергетические и климатические показатели	Энергоемкость с учетом природных факторов (минимизация)	$E_{\text{energy}} = \frac{\text{Энергия в кВт·ч}}{\text{Производство в т}}$	$E_{\text{energy}} = 0{,}196$ кВт·ч/т	Оценка энергоемкости производства сельхозпродукции с учетом климатической зоны

Продолжение таблицы 1

Категория	Критерий	Формула для расчета	Значение	Пояснение
Энергетические и климатические показатели	Выбросы парниковых газов (минимизация)	$G = \frac{\text{Выбросы } CO_2 \text{ экв.}}{\text{Производство в т}}$	$G_{агро}$ = 0,71 т CO_2 экв./т	Оценка выбросов парниковых газов на единицу продукции
	Устойчивость к климатическим рискам (минимизация)	$R = \frac{\text{Вариация урожайности}}{\text{Среднее значение урожайности}}$	R = 0,20	Оценка устойчивости сельского хозяйства к климатическим рискам, таким как засухи и наводнения
Производственные ресурсы	Производительность труда (максимизация)	$P_{труд} = \frac{\text{Объем продукции в т}}{\text{Количество рабочих}}$	$P_{труд}$ = 134,784 руб./чел	Оценка эффективности труда в сельскохозяйственном производстве
Цифровизация и технологии	Доля телематической техники (максимизация)	$T_{телематика} = \frac{\text{Количество техники с телематикой}}{\text{Общее количество техники}} \times 100$	20 %	Оценка доли техники с телематическими системами в сельском хозяйстве
	Доля цифровых процессов (максимизация)	$D_{цифровые\ процессы} = \frac{\text{Количество процессов с цифровым сбором данных}}{\text{Общее количество процессов}} \times 100$	25 %	Оценка доли операций, использующих цифровой сбор данных
	Доля ЭДО (максимизация)	$D_{ЭДО} = \frac{\text{Количество процессов с ЭДО}}{\text{Общее количество процессов}} \times 100$	30 %	Оценка доли процессов с использованием электронного документооборота (ЭДО)
	Доля решений на основе аналитики (максимизация)	$D_{аналитика} = \frac{\text{Количество решений с аналитикой}}{\text{Общее количество решений}} \times 100$	15 %	Оценка доли управленческих решений, основанных на аналитике

Источник: авторская разработка на основе данных Национального статистического комитета Республики Беларусь; Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь; Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды; международной программы Copernicus; Продовольственной и сельскохозяйственной Организации Объединенных Наций; Министерства экономики Республики Беларусь

производства, которые имеют наибольшие весовые коэффициенты в структуре агрегирования. Вместе с тем относительно низкие значения показателей цифровизации, включая долю техники с телематическими системами и уровень цифрового сбора данных, снижают интегральную оценку и указывают на необходимость ускоренного развития цифровой инфраструктуры аграрного сектора.

Таким образом, рассчитанный индекс может рассматриваться как интегральная характеристика текущего состояния агропромышленного производства, позволяющая сопоставлять различные аспекты эффективности и выявлять направления для дальнейшего развития отрасли.

Проведенное исследование позволило апробировать модель многокритериальной оценки агропромышленного производства, основанную на архитектуре цифрового двойника и методах математического моделирования. В рамках исследования была сформирована система критериев, отражающих использование природных ресурсов, эффективность производственных процессов и уровень цифровизации агропромышленного сектора.

Применение процедур нормализации и агрегирования показателей позволило сформировать интегральный индекс эффективности агропромышленного производства. Полученное значение индекса свидетельствует о среднем уровне устойчивости и эффективности функционирования аграрного сектора Республики Беларусь и указывает на наличие значительных резервов повышения результативности производства.

Исследование подтверждает, что использование многокритериальных моделей оценки позволяет учитывать комплекс взаимосвязанных факторов развития агропромышленного комплекса и формировать более объективную основу для анализа состояния отрасли. Включение показателей цифровизации в структуру оценки обеспечивает учет технологических факторов управления и повышает воспроизводимость расчетов за счет интеграции данных из различных источников.

Таким образом, многокритериальная оценка позволяет не только количественно оценить текущее состояние агропромышленного производства, но и выработать стратегические рекомендации для устойчивого и эффективного развития отрасли в Беларуси, учитывая все ключевые факторы и ограничения.

Результаты проведенного исследования позволяют сформулировать ряд направлений повышения эффективности агропромышленного производства Республики Беларусь.

Первым направлением является развитие цифровой инфраструктуры аграрного сектора. Расширение использования телематических систем на сельскохозяйственной технике, внедрение цифровых систем мониторинга технологических операций и развитие платформ управления агропроизводственными данными способны существенно повысить точность планирования и контроля производственных процессов.

Вторым направлением является повышение эффективности использования природных ресурсов. Это предполагает внедрение технологий точного земледелия, оптимизацию применения удобрений и средств защиты растений, а также развитие систем мониторинга состояния почв и водных ресурсов.

Третьим направлением является совершенствование системы управления производственными ресурсами. Повышение производительности труда, оптимизация загрузки сельскохозяйственной техники и снижение материалоемкости производственных процессов способны обеспечить повышение экономической эффективности аграрного производства.

Четвертым направлением является развитие аналитических инструментов поддержки управленческих решений. Использование методов математического моделирования и цифровых двойников позволяет формировать сценарные оценки развития агропроизводственных систем и обосновывать выбор наиболее эффективных технологических решений.

Таким образом, применение разработанной модели многокритериальной оценки позволяет сформировать научно обоснованную основу для мониторинга эффективности агропромышленного производства и разработки стратегических направлений развития аграрного сектора в условиях цифровой трансформации экономики.

Литература

1. Pretty, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence // Philosophical Transactions of the Royal Society B. — 2008. — Vol. 363. — № 1491. — P. 447–465. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163. — Mode of access: https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/363/1491/447. — Дата доступа: 10.03.2026.

2. Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., Johnston M. et al. Solutions for a cultivated planet // Nature. — 2011. — Vol. 478. — P. 337–342. — DOI: https://doi.org/10.1038/nature10452.

3. Rockstrцm, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, E., Chapin, F., Lambin, E. et al. A safe operating space for humanity // Nature. — 2009. — Vol. 461. — P. 472–475. — DOI: https://doi.org/10.1038/461472a.

4. Coelli, T., Rao, D., O'Donnell, C., Battese, G. An introduction to efficiency and productivity analysis. New York: Springer, 2005. — Mode of access: https://link.springer.com/book/10.1007/b136381.

5. Casalini, F., López González, J. Trade and agriculture in the digital economy // OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers. — № 139. — Paris: OECD Publishing, 2019. — DOI: https://doi.org/10.1787/91c40e07-en.

6. OECD. The digital transformation of the agriculture and food system. Paris: OECD Publishing, 2019. — DOI: https://doi.org/10.1787/7a94280c-en. — Mode of access: https://www.oecd.org/en/publications/the-digital-transformation-of-the-agriculture-and-food-system_7a94280c-en.html.

7. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M. Big data in smart farming — a review // Agricultural Systems. — 2017. — Vol. 153. — P. 69–80. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023.

8. Pylianidis, C., Osinga, S., Athanasiadis, I. Introducing digital twins to agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. — 2021. — Vol. 184. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942.

9. Escriba-Gelonch, M., Liang, S., van Schalkwyk, P., Fisk, I., Nguyen Van Duc Long, Hessel, V. Digital twins in agriculture: orchestration and applications // Journal of Agricultural and Food Chemistry. — 2024. — Vol. 72. — № 19. — P. 10737–10752. — DOI: https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01934.

10. Zhang, R., Zhu, H., Chang, Q., Mao, Q. A comprehensive review of digital twins technology in agriculture // Agriculture. — 2025. — Vol. 15. — № 9. — DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15090903.

11. Saaty, T. Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. — 2008. — Vol. 1. — № 1. — P. 83–98. — DOI: https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590.

12. FAO. The State of Food and Agriculture 2022: Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome: FAO, 2022. — Mode of access: https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb9479en.

13. McFadden, J., Casalini, F., Antyn, J. Policies to bolster trust in agricultural digitalisation // OECD Food, Agriculture and Fisheries Papers. Paris: OECD Publishing, 2022. — Mode of access: https://www.oecd.org/publications/policies-to-bolster-trust-in-agricultural-digitalisation.

14. Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., Wolfert, S. Digital twins in smart farming // Agricultural Systems. — 2021. — Vol. 189. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046.

15. FAO. Digital technologies in agriculture and rural areas: status report. Rome: FAO, 2019. — Mode of access: https://www.fao.org/3/ca4887en/ca4887en.pdf.

Статья поступила в редколлегию: 13.03.2026 г.