

ПОДХОДЫ К ПОСТРОЕНИЮ ИНДЕКСОВ УСТОЙЧИВОСТИ АПК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ НА ОСНОВЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ДАННЫХ СМЕШАННОЙ ЧАСТОТЫ

А.А. Мозоль*

Аннотация. Настоящая статья посвящена разработке теоретико-методологических основ устойчивого развития агропромышленного комплекса (АПК) Республики Беларусь в условиях неопределенности. Рассматриваются стохастические, политико-регуляторные, рыночные и технологические источники неопределенности, а также институциональные аспекты, определяющие динамику аграрной экономики. Особое внимание уделено интеграции международных методик (FAO SAFA, OECD AEI, SDG, CAP/«Зеленый курс») с национальными индикаторами, применению данных смешанной частоты и построению агрегированных индексов (BSI, SNI). Предлагаемые подходы к построению индексов устойчивости позволяют повысить точность прогнозов, обеспечить гармонизацию национальной статистики с глобальными стандартами и создать основу для адаптивного управления АПК Беларуси в условиях волатильности и внешних шоков.

Ключевые слова: устойчивое развитие, агропромышленный комплекс (АПК), неопределенность, смешанная частота данных, экономико-математическое моделирование, международные индикаторы (FAO, OECD, SDG), робастное планирование, индекс устойчивости (BSI, SNI), продовольственная безопасность.

JEL-классификация: C41, C82, Q01, Q16, Q18.

DOI: 10.46782/1818-4510-2025-4-118-132

Материал поступил 28.08.2025 г.

Теоретические основания устойчивого развития агропромышленного комплекса (АПК) целесообразно формулировать не в терминах статического равновесия, а в терминах динамической жизнеспособности сложной социо-эколого-технологической системы. Это положение следует из классических работ по экологической устойчивости и адаптивному управлению (Holling, 1973; Gunderson, Holling, 2002) и означает, что цель политики и управления – не «вернуть систему в исходную точку» после шока, а обеспечить ее способность сохранять ключевые функции и при необходимости переходить на новые, приемлемые траектории развития. Для АПК, где временные масштабы биологических про-

цессов и технико-технологических циклов значительно дольше, чем у типичных промышленных секторов, такой подход приобретает принципиальное значение: важна не только амплитуда колебаний, но и вероятность сохранения критических свойств (плодородие почв, воспроизводство поголовья, экономическая рентабельность хозяйств) в условиях многообразных и разночастотных воздействий.

Неопределенность в аграрной экономике имеет двойственный характер. С одной стороны, существует алеаторная (англ. *aleatory*), стохастическая неопределенность – природные флуктуации погоды, случайные вспышки заболеваний, рыноч-

* Мозоль Алеся Александровна (a.mozol@aol.com), кандидат экономических наук, доцент, Белорусский государственный экономический университет (г. Минск, Беларусь); <https://orcid.org/0009-0005-3624-0860>

Для цитирования: Мозоль А.А. 2025. Подходы к построению индексов устойчивости АПК Республики Беларусь на основе экономико-математических моделей и данных смешанной частоты. *Белорусский экономический журнал*. № 4. С. 118–132. DOI: 10.46782/1818-4510-2025-4-118-132

ные колебания цен. С другой стороны, присутствует эпистемическая (англ. *epistemic*) неопределенность, связанная с неполнотой знаний о механизмах, параметрах и структурной стабильности моделей, отражающая проблемы измерения и несовершенства институтов. Эти два типа неопределенности требуют разных инструментов: первый описывается стохастическими процессами, второй – процедурами обучения, валидации моделей и институционального улучшения (Knight, 1921; Ben-Haim, 2001). На практике решения принимаются в условиях «неполных распределений» (найтсовская/нон-классическая неопределенность), что делает применимыми методы робастного планирования и анализа устойчивости к сценариям (*info-gap*, *robust optimization*, *worst-case analysis*), а также байесовские процедуры для последовательного обновления знаний и оценки ценности информации.

Классические и институциональные подходы к устойчивому развитию АПК Республики Беларусь отражены в исследованиях Института системных исследований в АПК НАН Беларуси. В монографии под редакцией В.Г. Гусакова «Проблемы устойчивого развития АПК: вопросы теории и методологии» обоснованы принципы, индикаторы и механизмы управления устойчивостью на национальном и региональном уровнях (Гусаков, 2016). Более прикладной характер имеет работа С.А. Кондратенко, где разработана многоуровневая система критериев и показателей и предложена управленческая модель устойчивости регионального агропродовольственного комплекса (Кондратенко, 2014). В исследованиях Н.И. Соловцова акцент сделан на стратегических и тактических аспектах устойчивого развития сельских территорий (Соловцов, 2021), тогда как В.Н. Редько и Д.В. Редько анализируют проблемы и перспективы устойчивого развития АПК в условиях институциональных ограничений (Редько, Редько, 2008).

В эмпирическом блоке белорусские авторы активно используют экономико-математические и эконометрические методы. Так, С. Адашкевич применяет корреляционно-регрессионные модели на данных

2000–2019 гг., показывая ограниченное влияние агропродовольственного сектора на экономический рост и необходимость корректировки аграрной политики (Adashkevich, 2021). В журнале «Аграрная экономика» Л. Павлович выделяет ключевые факторы устойчивости и риски АПК Беларуси за 2012–2021 гг., что формирует базу для построения индикаторных систем (Павлович, 2022). В работах Р.К. Леньковой и В.В. Конончука представлены оптимизационные и сценарные модели для задач планирования и прогнозирования устойчивости (Ленькова, 2018; Конончук, 2019). При этом исследования, использующие данные смешанной частоты (MIDAS, MF-VAR), пока единичны и в большей степени обозначают методологический задел для дальнейших работ.

Формализация устойчивости удобно представляется в математике динамических систем и теории управления. Пусть вектор состояния s_t агрегирует ключевые характеристики системы в момент t (уровень производства по культурам и животноводству, запас плодородия почв, эмиссии парниковых газов, уровень занятости, индикаторы институционального качества и т.п.). Управляющие воздействия u_t – это набор политик и частных решений (инвестиции, использование удобрений, режимы кормления, меры поддержки, инструменты страхования). Стохастические возмущения w_t отражают погодные, биологические и рыночные шоки. Динамика может быть записана в общем виде:

$$s_{t+1} = f(s_t, u_t, w_t). \quad (1)$$

Задача же устойчивого управления формулируется через требование сохранять вектор состояния s_t внутри допустимого множества A в течение заданного горизонта либо с заданной вероятностью. Альтернативная постановка – многоцелевой оптимум

$$\max_{\{u_t\}} E \left[\sum_{t=0}^T \beta^t U(s_t, u_t) \right], \quad (2)$$

при ограничениях $s_t \in A$ и ресурсных ограничениях, где функция полезности U агрегирует экономические, экологические и социальные компоненты (и описывает пред-

почтения общества). Устойчивость в этом контексте – свойство траекторий: при допустимом наборе политик вероятность выхода за границы $\mathbf{A}$ остается низкой даже при реалистичных распределениях ω_r , либо система допускает управляемые переходы в новые приемлемые множества при экстремальных шоках (viability theory, Aubin).

Особое место в теории устойчивого развития занимает институциональное измерение устойчивости. В отличие от только эколого-экономических представлений, институции формируют «правила игры»: они определяют частоту и предсказуемость вмешательств, стоимость и доступность страхования и кредитов, качество статистики и цифровой прослеживаемости, а также механизмы трансформации внешних шоков во внутренние стимулы. В терминах динамической оптимизации изменение институциональной среды эквивалентно изменению ограничений и теневых цен в задаче оптимизации: теоретически это можно трактовать как изменение функции полезности (весов многокритериальной оценки) и/или изменение множества $\mathbf{A}$. Поэтому институциональные реформы действуют как рычаги, смещающие компромиссы между экономической выгодой и экологическими/социальными ограничениями и, тем самым, повышающие вероятность оставаться в желаемом множестве состояний при прочих равных. Международные примеры показывают, что предсказуемая политика субсидий, прозрачные стандарты прослеживаемости и развитая цифровая инфраструктура существенно снижают эпистемическую неопределенность и стимулируют инвестиции в ресурсосберегающие технологии.

Наконец, практическая импликация теории – необходимость учета разночастотных сигналов и многомасштабной структуры неопределенности. Экономические индикаторы, погодные ряды и экосистемные реакции функционируют на разных временных и пространственных шкалах; интеграция этих сигналов требует латентных факторных представлений и методов смешанной частоты, а принятие решений должно опираться как на точки оценок (nowcasts/forecasts), так и на распределения неопре-

деленности вокруг них. Такой теоретический подход объединяет идеи динамической оптимизации, теории управления, робастного принятия решений и байесовского обучения, создавая основу для эмпирического моделирования устойчивости АПК и разработки прикладных индикаторов оперативной устойчивости, пригодных для национальной политики.

Типология неопределенностей в АПК Республики Беларусь формируется на пересечении объективных природных и рыночных факторов с институциональными и технологическими особенностями. В отличие от традиционного подхода, где неопределенность понимается как «шум» или «погрешность» прогнозов, здесь она трактуется как системное условие функционирования АПК, требующее адаптивных и робастных механизмов управления.

Стохастическая неопределенность связана с климатическими и погодными факторами. В Беларуси, где преобладают рискованные зоны земледелия (например, засушливые периоды в Гродненской и Брестской областях), урожайность зерновых можно формализовать как случайный процесс:

$$Y_t = \mu_t + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^2), \quad (3)$$

где Y_t – урожайность в момент времени t ;

μ_t – тренд, зависящий от технологий и качества почв;

ε_t – климатическая вариация.

Рост σ_t^2 при изменении климата делает прогнозы менее надежными, что требует страховых схем и диверсификации культур. Яркий пример – урожай 2010 г., когда засуха в Восточной Европе вызвала падение производства зерна почти на 25%, что мгновенно отразилось на ценах и бюджетной нагрузке на аграрные хозяйства.

Политико-регуляторная неопределенность имеет особое значение для Беларуси, учитывая экспортную ориентацию (молочная продукция, мясо, льноволокно). Санкционные режимы и новые международные стандарты (например, EU Deforestation Regulation – EUDR) могут быть представлены как экзогенные дискретные шоки:

$$P_{t+1} = P_t(1 + g_t + \delta_t), \quad (4)$$

где P_t – цена или доход от экспорта;
 g_t – ожидаемый темп роста;
 δ_t – политико-регуляторный шок, принимающий значения из распределения с тяжелыми хвостами (например, распределение Коши).

Такие шоки трудно прогнозировать и поэтому важным фактором обеспечения устойчивости АПК является институциональная гибкость – способность быстро перенаправить экспортные потоки (например, в Китай или страны ЕАЭС).

Рыночная неопределенность определяется высокой волатильностью мировых цен на продукцию, где Беларусь выступает нетто-экспортером. Пусть p_t – мировая цена на молочную продукцию, ее динамику можно описать стохастической дифференциальной моделью типа геометрического броуновского движения:

$$dp_t = \mu p_t dt + \sigma p_t dW_t \quad (5)$$

где μ – средний тренд;
 σ – волатильность;
 dW_t – винеровский процесс.

Такая модель показывает, что даже при положительном долгосрочном тренде возможны краткосрочные резкие падения, создающие риски для доходов хозяйств. Примером является 2014 г., когда обвал мировых цен на молочную продукцию снизил валютную выручку Беларуси почти на 40%.

Технологическая и биологическая неопределенность формируется под воздействием болезней животных, внедрения новых агротехнологий и уязвимости цепочек поставок. Формально вероятность возникновения сбоя можно описать через пуассоновский процесс:

$$P(N(t) = k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (6)$$

где λ – интенсивность событий (например, эпизоотий или сбоев поставок);

$N(t)$ – число событий за время t .

В 2021 г., например, перебои с поставками белорусских удобрений в связи с ограничениями транзита через Литву привели к краткосрочному росту издержек внутри страны, а вспышки африканской чумы свиней показывают уязвимость животноводства.

Для практического анализа полезно ввести многоуровневую классификацию. На микроуровне (хозяйства) преобладают погодные и биологические шоки, напрямую влияющие на урожайность и здоровье поголовья. На мезоуровне (отрасли, регионы) ключевую роль играют рыночные и технологические факторы – спрос на продукцию, сбои поставок, доступ к инновациям. На макроуровне (национальная экономика, международные рынки) доминируют политико-регуляторные и глобальные рыночные неопределенности. Такая иерархия позволяет структурировать риски и применять разные инструменты: от страхования и диверсификации на микроуровне до стратегического маневрирования экспортными потоками и институциональных реформ на макроуровне.

Таким образом, типология неопределенностей в белорусском АПК предполагает не только систематизацию источников риска, но и разработку инструментов управления ими на разных уровнях. Введение многоуровневой модели неопределенностей позволяет сочетать стохастические подходы (моделирование урожайности и цен), сценарные методы (политико-регуляторные шоки) и институциональные решения (снижение эпистемической неопределенности), создавая основу для построения экономико-математических моделей устойчивого развития в условиях высокой волатильности и сложнопредсказуемой внешней среды (табл. 1).

В современных условиях формирования устойчивого агропромышленного комплекса особое значение приобретает интеграция национальных стратегий с международными стандартами и практиками. Международные рамки, такие как методология FAO SAFA (Sustainability Assessment of Food and Agriculture Systems), агроэкологические индикаторы OECD AEI (Automatic Exchange of Information), цели устойчивого развития (SDG) и инициативы Европейского союза в контексте CAP и «Зеленого курса», предоставляют системные ориентиры для оценки и управления устойчивостью АПК. Основная цель интеграции этих подходов в условиях Республики Беларусь заключается в создании адаптированной

Таблица 1

Сводная таблица типологии неопределенностей в АПК Республики Беларусь

Уровень воздействия	Тип неопределенности	Примеры для Беларуси	Математическое представление	Инструменты управления
Микроуровень (хозяйства, предприятия)	Стохастическая (климат, погода)	Засухи в Брестской области, паводки в Полесье	$Y_t = \mu_t + \varepsilon_t$, $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^2)$	Страхование урожая, диверсификация культур, мелиорация
	Технологическая и биологическая	Африканская чума свиней, болезни картофеля	$P(N(t)=k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}$	Ветеринарный контроль, биозащита, резервные фонды
Мезоуровень (отрасли, регионы)	Рыночная	Волатильность цен на молочную продукцию, лен, зерновые	$dp_t = \mu p_t dt + \sigma p_t dW_t$	Хеджирование цен, региональная кооперация, создание резервов
	Технологическая	Сбои поставок удобрений и кормов	Стохастические модели надежности цепочек	Импортозамещение, диверсификация поставщиков, локализация производства
Макроуровень (национальная экономика, внешние рынки)	Политико-регуляторная	Санкции ЕС и США, требования EUDR, изменения господдержки	$P_{t+1} = P_t (1 + g_t + \delta_t)$, где δ_t – шок	Перенаправление экспорта (Китай, ЕАЭС), адаптация законодательства, развитие цифрового АПК
	Рыночная глобальная	Обвал цен на молочную продукцию (2014), рост цен на зерно (2022)	Глобальные VAR-модели, DSGE-модели	Участие в международных альянсах, валютные резервы, госпрограммы поддержки

Источник. Авторская разработка.

системы индикаторов, которая позволяет не только соответствовать международным требованиям, но и учитывать локальные экономические, экологические и социальные особенности.

Методология FAO SAFA предлагает комплексную оценку устойчивости сельскохозяйственных систем по четырем базовым измерениям: экологическая, экономическая, социальная и управленческая устойчивость. Применение SAFA позволяет формализовать показатели устойчивого производства, такие как коэффициент биологического разнообразия B_d , уровень выбросов парниковых газов GHG на тонну продукции, индекс равенства оплаты труда E_w , а также управленческую прозрачность T_m . В Беларуси это может быть выражено, например, через показатель энергоемкости на тонну молочной продукции (E_m):

$$E_m = \frac{E_{\text{электр}} + E_{\text{топл}} + E_{\text{удобр}}}{Q_{\text{молоко}}}, \quad (7)$$

где $E_{\text{электр}}$, $E_{\text{топл}}$, $E_{\text{удобр}}$ – потребленная электроэнергия, топливо и минеральные удобрения;

$Q_{\text{молоко}}$ – объем произведенного молока.

Такой подход позволяет оценить эффективность использования ресурсов и выявить направления для снижения энергетических затрат.

Агроэкологические индикаторы OECD AEI формализуют связь между агротехнологиями и их воздействием на экосистему. Основные индикаторы включают уровень использования удобрений N_f , индекс эрозии почвы S_e , водопотребление на гектар W_c , а также биоразнообразие B_d . Для Беларуси актуально интегрировать эти индикаторы с национальной статистикой по плодородию почв, водоснабжению и интенсивности производства, чтобы оценивать не только продуктивность, но и долговременную экологическую устойчивость. Например, индекс устойчивого водопотребления может быть представлен как:

$$W_s = \frac{W_c}{Q_{\text{продукт}}} \cdot \alpha, \quad (8)$$

где α – коэффициент локальной экологической нагрузки, учитывающий чувствительность региона к водным ресурсам.

Цели устойчивого развития (SDG), особенно SDG 2 «Ликвидация голода», SDG 12 «Ответственное потребление и производство», SDG 13 «Борьба с изменением климата» и SDG 15 «Сохранение экосистем суши», формируют стратегические ориентиры. Например, показатель продовольственной безопасности F_s может быть рассчитан как доля внутреннего производства продуктов питания к общей потребности страны, а индекс экологической нагрузки E_L – через суммарные выбросы CO_2 и метана на единицу продукции:

$$F_s = \frac{Q_{\text{внутр}}}{Q_{\text{потреб}}} \cdot 100\%,$$

$$E_L = \frac{GHG_{\text{CO}_2} + GHG_{\text{CH}_4}}{Q_{\text{продукт}}}. \quad (9)$$

САР и «Зеленый курс» ЕС предоставляют ориентиры для долгосрочной экологизации и цифровизации сельского хозяйства. Они стимулируют внедрение точного земледелия, мониторинга выбросов и цифровой прослеживаемости продукции. Для Беларуси адаптация этих подходов может быть реализована через систему отслеживания экспортных партий молочной и мясной продукции, где каждая партия маркируется цифровым идентификатором с указанием происхождения, методов производства и экологических показателей.

В качестве инновационного подхода для Беларуси предлагается *построение интегрированной системы индикаторов устойчивости*, объединяющей международные стандарты и национальные приоритеты. Такая система может включать блоки:

- экологическая устойчивость (ES): S_e , GHG , B_s ;
- экономическая устойчивость (EC): R_m , E_w , I_{inv} ;
- социальная устойчивость (SS): H_r , Edu , G_i ;
- продовольственная безопасность и технологическая прослеживаемость (FS/T): F_s , T_r (цифровые индикаторы САР «Зеленого курса»);
- энергоэффективность и ресурсопотребление (ER): E_m , W_s .

Каждому блоку соответствуют индикаторы, взятые из международной практики и адаптированные под Беларусь (табл. 2). Для каждого индикатора задано значение I_j , нормализованное от 0 до 1, и вес w_j , отражающий его стратегическую значимость. Настройки весов индикаторов и блоков используются, чтобы моделировать приоритеты политики (например, повышение энергоэффективности или усиление продовольственной безопасности). Итоговый интегрированный индекс устойчивости S рассчитывается как:

$$S = \sum_{j=1}^n w_j \cdot I_j, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1. \quad (10)$$

Каждый блок сам агрегируется из индикаторов:

$$S_{ES} = \sum_{i=1}^{n_{ES}} \lambda_i^{ES} \cdot I_i^{ES}, \quad S_{EC} = \sum_{j=1}^{n_{EC}} \lambda_j^{EC} \cdot I_j^{EC},$$

$$S_{SS} = \sum_{k=1}^{n_{SS}} \lambda_k^{SS} \cdot I_k^{SS}, \quad S_{FS/T} = \sum_{l=1}^{n_{FS/T}} \lambda_l^{FS/T} \cdot I_l^{FS/T},$$

$$S_{ER} = \sum_{m=1}^{n_{ER}} \lambda_m^{ER} \cdot I_m^{ER}, \quad (11)$$

где I – индикаторы;

λ – локальные веса внутри блока.

Рассчитав отдельные показатели по каждому из блоков, можно переходить к расчету *сбалансированного индекса устойчивости* (Balanced Sustainability Index, BSI), где отдельные блоки индикаторов формируют вклад в агрегированный показатель. Общая структура индекса может быть представлена в виде взвешенной суммы:

$$BSI = w_{ES} \cdot S_{ES} + w_{EC} \cdot S_{EC} + w_{SS} \cdot S_{SS} + w_{FS/T} \cdot S_{FS/T} + w_{ER} \cdot S_{ER}, \quad (12)$$

где S_{ES} , S_{EC} , S_{SS} , $S_{FS/T}$, S_{ER} – нормированные субиндексы по экологическому, экономическому, социальному, институциональному и энергетическому блокам;

w_{ES} , w_{EC} , w_{SS} , $w_{FS/T}$, w_{ER} – веса блоков (могут быть заданы экспертно или рассчитаны методом главных компонент).

Таким образом, *национальная панель индикаторов устойчивости* встраивается в систему управления АПК как комплексный инструмент, позволяющий одновременно

Расчет индикаторов устойчивости

Блок	Индикатор	Формула	Пример значения
Экологическая устойчивость (S_{ES}). SDG 13, 15, 12	GHG – выбросы ПГ	$I_{GHG} = 1 - \frac{GHG}{GHG_{max}}$	0,8
	S_e – эрозия почвы	$I_{S_e} = 1 - S_e$	0,9
	B_s – биоразнообразие	$I_{B_s} = \frac{B_s}{B_{s, max}}$	0,7
Экономическая устойчивость (S_{EC}). SDG 8, 9, 10	R_m – рентабельность	$I_{R_m} = \frac{R_m - R_{min}}{R_{max} - R_{min}}$	0,85
	E_w – равенство оплаты труда	$I_{E_w} = E_w$	0,9
	I_{inv} – инновации	$I_{inv} = \frac{I_{inv, real}}{I_{inv, max}}$	0,7
Социальная устойчивость (S_{SS}). SDG 1, 3, 4, 5, 16	H_i – здоровье работников	$I_{H_i} = \frac{H_i}{H_{i, max}}$	0,9
	Edu_i – образование	$I_{Edu_i} = Edu_i$	0,8
	G_i – гендерное равенство	$I_{G_i} = \frac{N_{жен}}{N_{муж}}, \max = 1$	1,0
Продовольственная безопасность и технологическая прослеживаемость ($S_{FS T}$). SDG 2, 12, 17	F_s – самообеспеченность	$I_{F_s} = \frac{Q_{внутр}}{Q_{потреб}}$	0,95
	T_r – прослеживаемость	% партий с цифровым ID	0,8
Энергоэффективность и ресурсопотребление (S_{ER}). SDG 7, 12	E_m – энергоемкость	$I_{E_m} = 1 - \frac{E_m}{E_{m, max}}$	0,7
	W_s – водопотребление	$I_{W_s} = 1 - \frac{W_s}{W_{s, max}}$	0,9

Источник. Авторская разработка.

отслеживать производственные, экологические, энергетические, социальные и институциональные параметры. В перспективе именно такая панель станет основой для международных сопоставлений и интеграции белорусской аграрной статистики в систему глобальных индикаторов целей устойчивого развития.

В современных условиях построение экономико-математических моделей устойчивого развития агропромышленного комплекса Республики Беларусь невозможно без интеграции *данных смешанной частоты*, позволяющей учитывать динамику процессов на разных временных горизонтах и создавать более точные прогнозы в условиях неопределенности. Особенность белорусского АПК, ориентированного на животноводство, молочную отрасль, картофе-

водство и льноводство, требует сочетания высокочастотных, среднечастотных и низкочастотных источников данных, которые обеспечивают комплексное понимание технологических, экономических и экологических процессов.

Высокочастотные данные включают ежедневные и почасовые показатели погодных условий, предоставляемые Белгидрометом, такие как температура T_p , осадки P_p , влажность H_t и скорость ветра W_t . Эти показатели критичны для расчета индекса климатической устойчивости культур C_s , который может быть представлен через скользящее окно по дням вегетационного периода:

$$C_s(t) = \frac{Y_{\text{факт}}(t)}{Y_{\text{средн}}} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_T(t)}{T_{\text{макс}}} \right), \quad t = 1, 2, \dots, n, \quad (13)$$

где $Y_{\text{факт}}(t)$ – фактическая урожайность к данному дню;

$\sigma_T(t)$ – стандартное отклонение температуры за окно t ;

n – число дней вегетации.

Важным источником высокочастотных данных являются спутниковые наблюдения, включая NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и данные Sentinel-2, которые позволяют отслеживать состояние посевов и биомассу в режиме реального времени. Для анализа продуктивности отдельных полей можно рассчитать индекс продуктивности V_{NDVI} через усредненное значение NDVI на площади A :

$$V_{NDVI} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A NDVI_i. \quad (14)$$

Кроме того, ежедневные котировки кормов и энергоносителей ($C_{\text{корм}}(t)$, $E_{\text{электро}}(t)$) позволяют моделировать экономические риски и энергозатраты производства с высокой детализацией. Например, динамику энергоемкости производства молока $E_m(t)$ можно представить как функцию текущих цен и потребления:

$$E_m(t) = \frac{E_{\text{электро}}(t) \cdot C_{\text{электро}}(t)}{Q_{\text{молоко}}(t)} + \frac{E_{\text{топл}}(t) \cdot C_{\text{топл}}(t) + E_{\text{корм}}(t) \cdot C_{\text{корм}}(t)}{Q_{\text{молоко}}(t)}. \quad (15)$$

Среднечастотные данные, такие как месячные отчеты сельхозорганизаций, перерабатывающих предприятий и агрометеорологические сводки, позволяют создавать агрегированные показатели для анализа производственной эффективности и устойчивости. Так, месячный индекс энергоэффективности $I_{E_m}(m)$ по предприятию рассчитывается как:

$$I_{E_m}(m) = \frac{\Sigma(E_m(t) \cdot Q_{\text{продукт}}(t))}{\Sigma(Q_{\text{продукт}}(t))}, \quad t \in m. \quad (16)$$

Среднечастотные показатели также включают уровень заболеваемости животных, остатки удобрений на полях, месячные изменения NDVI и отклонения температуры от нормы, что позволяет формировать индикаторы адаптивного управления АПК.

Низкочастотные данные – это ежегодные статистические обзоры Белстата, национальные отчеты по экологии, продовольственной безопасности и аграрным программам. Эти данные формируют базовые ориентиры для стратегического моделирования, включая:

- долю внутреннего производства к потребности F_s ;
- индекс соответствия стандартам сертификации E_c ;
- долгосрочные тренды биоразнообразия и энергоэффективности.

Для интеграции низко-, средне- и высокочастотных данных применяется архитектура индикаторов на нескольких уровнях, где каждый уровень данных имеет собственный временной вес и степень влияния на интегрированный индекс устойчивости S :

$$S = \sum_{i=1}^{N_{hf}} (w_i^{hf} \cdot I_i^{hf}) + \sum_{j=1}^{N_{mf}} (w_j^{mf} \cdot I_j^{mf}) + \sum_{k=1}^{N_{lf}} (w_k^{lf} \cdot I_k^{lf}), \quad (17)$$

$$\sum w = 1,$$

где hf, mf, lf – высоко-, средне- и низкочастотные индикаторы соответственно;

w – веса, отражающие стратегическую значимость показателя;

I – нормализованные значения индикаторов.

Данный подход полезен в том случае, если есть возможность ежедневно воспользоваться данными о температуре, осадках и NDVI для 50 полей, ежемесячно получать отчеты по урожайности и потреблению энергии на предприятии, а ежегодно – статистику Белстата по молочной отрасли. При соблюдении таких условий эти данные можно агрегировать для расчета показателя устойчивости региона или предприятия, что позволяет:

- выявлять краткосрочные аномалии (например, засуху или вспышку заболеваний);
- анализировать среднесрочные тренды (уровень энергоэффективности, урожайность по месяцам);
- формировать долгосрочные прогнозы и сценарии развития АПК в условиях неопределенности.

Таким образом, использование данных смешанной частоты и соответствующая архитектура индикаторов создают основу для построения динамических, адаптивных моделей устойчивого развития АПК Беларуси, позволяя принимать решения на всех временных горизонтах и оптимизировать как производственные, так и экологические и экономические показатели.

Разработка методологии экономико-математического моделирования устойчивого развития АПК в Беларуси требует особого внимания к *гармонизации данных и обеспечению их качества*, поскольку именно от корректности исходной информации зависит точность прогнозов и сопоставимость с международными практиками. Ключевые вызовы здесь связаны с различиями в частоте и полноте данных, несовпадением национальных и международных классификаторов, а также с необходимостью интеграции статистики Белстата в систему глобальных индикаторов FAO и OECD.

Одной из центральных задач является работа с *пропусками данных*, которые возникают как в высокочастотных временных рядах (погодные наблюдения, спутниковые данные NDVI), так и в средне- и низкочастотных источниках (месячная отчетность предприятий, годовые обзоры Белстата). В условиях пропусков применяются методы *импутации*, среди которых наиболее релевантны для Беларуси Expectation-Maximization (EM) и метод Калмана.

Метод EM основывается на максимизации правдоподобия при наличии неполных данных. Для наблюдаемого временного ряда $X=(x_1, x_2, \dots, x_T)$, где часть значений пропущена, целевая функция правдоподобия определяется как:

$$L(\theta|X) = \prod_{i=1}^T f(x_i|\theta). \quad (18)$$

На шаге **Е** вычисляется условное математическое ожидание:

$$Q(\theta|\theta^{(k)}) = E \left[\log L(\theta|X_{obs}, X_{miss}) | X_{obs}, \theta^{(k)} \right]. \quad (19)$$

На шаге **М** осуществляется максимизация:

$$\theta^{(k+1)} = \arg \max_{\theta} Q(\theta|\theta^{(k)}). \quad (20)$$

Для примера, если в дневном ряде осадков за июль пропущены 3 дня из 31, метод EM позволяет восстановить эти значения на основе распределения по соседним дням и среднемесячного уровня осадков. В итоге восстановленный ряд становится пригодным для расчета индекса климатической устойчивости C_s .

Метод Калмана применим в динамических моделях состояния, где данные представлены как скрытый процесс z_t и наблюдения как y_t :

$$z_t = Az_{t-1} + \varepsilon_t, \quad y_t = Hz_t + \eta_t. \quad (21)$$

Здесь $\varepsilon_t \sim N(0, Q)$, $\eta_t \sim N(0, R)$. Применение фильтра Калмана позволяет не только оценивать скрытые состояния (например, уровень влаги в почве), но и восстанавливать отсутствующие наблюдения в серии NDVI по спутниковым снимкам с учетом облачности.

Не менее важным является вопрос *адаптации международных методик к национальным классификаторам*. В Беларуси применяется система национальных счетов (СНС) и собственные классификаторы сельскохозяйственных культур и животных, в то время как FAO и OECD используют другие агрегаты. Например, по классификации FAO картофель относится к группе «корнеплоды», а в белорусской статистике выделяется отдельно как стратегическая культура. Для гармонизации вводится матричное преобразование данных:

$$Y^{FAO} = M \cdot Y^{Bel}, \quad (22)$$

где Y^{Bel} – вектор показателей по национальной классификации (картофель, лен, зерновые, молоко, мясо);

M – матрица перехода к международной классификации;

Y^{FAO} – агрегированный набор показателей в терминах FAO (корнеплоды, технические культуры, зерновые, молочные продукты, мясные продукты).

Если Беларусь за год произвела 6 млн т картофеля, FAO фиксирует этот объем в категории «Roots & Tubers». Сопоставле-

ние через матрицу **M** обеспечивает эквивалентность отчетности, что позволяет включать белорусские данные в международные сравнения. Аналогично учитывается и удой молока: Белстат публикует данные по удою молока на корову (Q_{milk}^{bel}) в литрах, FAO (Q_{milk}^{FAO}) – в килограммах на животное. Для гармонизации используется коэффициент пересчета:

$$Q_{milk}^{FAO} = \alpha \cdot Q_{milk}^{bel}, \quad \alpha = \rho / 1000, \quad (23)$$

где $\rho \approx 1,03$ кг/л – плотность молока.

При использовании такого подхода обеспечивается прямая сопоставимость. Именно совмещение методов импутации, гармонизации классификаторов и международного сопоставления формирует основу для архитектуры данных устойчивого развития АПК. Это позволяет Беларуси одновременно решать три задачи: повышать качество собственных прогнозов, обеспечивать участие в международных сравнительных исследованиях и интегрировать национальные программы с глобальными целями устойчивого развития.

Ключевым предложением для Республики Беларусь в рамках методологии устойчивого развития АПК является создание *Sustainability Nowcast Index (SNI)* – агрегированного индекса, формируемого на основе данных смешанной частоты и позволяющего в реальном времени оценивать состояние устойчивости агропродовольственного комплекса. В отличие от классических индексов, рассчитываемых с годовой или квартальной задержкой, SNI будет использовать динамическое байесовское сглаживание и смешанно-частотные модели (Mixed-Frequency VAR, MIDAS), что позволит интегрировать как ежедневные показатели (погодные, ценовые), так и редкие годовые отчетные данные.

Формально индекс может быть представлен как взвешенная сумма нормированных блоков:

$$SNI_t = \alpha E_t + \beta Eco_t + \gamma S_t + \delta Inst_t, \quad (24)$$

где E_t – экономический подиндекс (производительность, рентабельность, инвестиции);

Eco_t – экологический подиндекс (выбросы, деградация почв, баланс азота);

S_t – социальный подиндекс (занятость, миграция, качество жизни);

$Inst_t$ – институциональный подиндекс (эффективность господдержки, доступность кредитов);

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – веса, определяемые методом главных компонент или экспертной калибровкой.

Для интеграции разнородных данных вводится оператор смешанной частоты:

$$X_t^{(m)} = \sum_{i=0}^k \theta_i x_{t-i/f}, \quad (25)$$

где $X_t^{(m)}$ – агрегированный показатель с низкой частотой m (например, квартал);

$x_{t-i/f}$ – наблюдения высокой частоты (день или месяц);

f – коэффициент частотности;

θ_i – веса распределения (обычно экспоненциальные или лаговые).

В формуле (25) θ – это весовой коэффициент (параметр модели), который показывает, какая доля влияния принадлежит отдельным лагам временного ряда. Недавние наблюдения, как правило, имеют больший вес.

Соответственно, формула агрегированного индекса будет выглядеть следующим образом:

$$SNI_t = \alpha \left(\sum_{i=0}^k \theta_i^{econ} x_{t-i/f}^{econ} \right) + \beta \left(\sum_{i=0}^k \theta_i^{eco} x_{t-i/f}^{eco} \right) + \gamma \left(\sum_{i=0}^k \theta_i^{soc} x_{t-i/f}^{soc} \right) + \delta \left(\sum_{i=0}^k \theta_i^{inst} x_{t-i/f}^{inst} \right). \quad (26)$$

К примеру, при анализе устойчивости молочного сектора SNI объединяет:

- ежедневные погодные показатели (температура, осадки, индекс NDVI для оценки продуктивности пастбищ);
- ежемесячные цены на корма и энергоносители;
- квартальные показатели инвестиций и занятости;
- годовые данные о выбросах метана и деградации почв.

Таким образом, уже в середине вегетационного сезона возможно получить обновленное значение индекса, отражающее не только текущую производственную ситуацию, но и прогноз устойчивости на ближайшие кварталы.

Оба предложенных индекса имеют важное значение при принятии управленческих решений. Рассмотрим особенности каждого из индексов (табл. 3).

Построение системы мониторинга устойчивости АПК в условиях неопределенности невозможно без комплексной диагностики доступности данных. Для этого формируется *матрица «показатель × частота × источник × доступность»*, позволяющая выявить пробелы в информационном поле и оценить степень готовности белорусской статистики к интеграции в международные системы сопоставлений.

Структурно матрица доступности D может быть описана как:

$$D_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & \text{если показатель } i \text{ доступен} \\ & \text{из источника } k \text{ с частотой } j \\ 0, & \text{если показатель отсутствует или} \\ & \text{не публикуется систематически} \end{cases}, \quad (27)$$

где i – индикатор (например, цены, урожайность, выбросы);

j – частота (день, месяц, год);

k – источник (Белстат, Белгидромет, FAO, кадастровые данные и др.).

Суммирование по всем измерениям позволяет определить коэффициент полноты информации:

$$C_i = \sum_{j,k} \frac{D_{i,j,k}}{N_{j,k}}, \quad (28)$$

где $N_{j,k}$ – общее число возможных комбинаций частота–источник.

Для наглядности представим индикатор «цены на зерно». Если потенциально доступны 3 источника данных (Белстат, Министерство сельского хозяйства, биржевые котировки) и 2 частоты (день, месяц), т. е. $N_{j,k} = 6$, но фактически публикуются лишь 2 ряда (месячные цены Белстата и биржевые дневные котировки), то:

$$C_{\text{цена}} = \frac{2}{6} = 0,33. \quad (29)$$

Это означает, что лишь треть потенциальной информации по данному индикатору используется систематически.

Высоочастотные данные в белорусских условиях чаще всего фрагментарны. Например, котировки кормов на внутреннем рынке могут собираться ежедневно торговыми площадками, но они не интегрированы в единую систему мониторинга. Если обозначить индекс рыночной прозрачности T как долю доступных ежедневных котировок к общему числу кормов (товаров):

Таблица 3

Сравнение индексов BSI и SNI

Характеристика	BSI (Balanced Sustainability Index)	SNI (Sustainability Nowcast Index)
Назначение	Долгосрочная, стратегическая оценка устойчивости АПК; мониторинг выполнения национальных и международных целей (SDG, CAP)	Оперативная, тактическая оценка состояния устойчивости в режиме, близком к реальному времени; поддержка адаптивного управления
Используемые данные	Преимущественно низко- и среднечастотные: годовые и квартальные отчеты (Белстат, FAO, OECD, национальные доклады)	Данные смешанной частоты: ежедневные (погода, NDVI, цены), ежемесячные (себестоимость, энергоёмкость), квартальные (инвестиции, занятость), годовые (выбросы, деградация почв)
Методы расчета	Взвешивание субиндексов (экспертные веса или метод главных компонент), агрегирование по блокам: экологический, экономический, социальный, институциональный, энергетический	Модели смешанной частоты (MIDAS, MF-VAR), байесовское сглаживание, динамическая интеграция высоко- и низкочастотных данных
Применение	Международные сопоставления, стратегическое планирование, оценка прогресса в долгосрочной перспективе	Мониторинг текущего сезона, раннее выявление рисков (засуха, скачки цен, вспышки болезней), корректировка госпрограмм и ресурсов в реальном времени

Источник. Авторская разработка.

$$T = \frac{n_{avail}}{n_{total}}, \quad (30)$$

и предположить, что котировки публикуются по 15 из 50 видов кормов, то:

$$T = \frac{15}{50} = 0,3, \quad (31)$$

что свидетельствует о низкой степени открытости.

Региональная детализация экологических индикаторов также ограничена. Например, Белгидромет фиксирует осадки и температуру с дневной частотой, но данные по качеству почв или уровню деградации публикуются только в агрегированном виде. Для оценки информационного разрыва можно ввести индекс региональной доступности:

$$R = \frac{m_{regions}^{avail}}{m_{regions}^{total}}. \quad (32)$$

В качестве практического примера можно привести данные о деградации почв, публикующиеся лишь по 3 областям из 6, тогда:

$$R = \frac{3}{6} = 0,5, \quad (33)$$

т. е. детализация покрывает только половину регионов страны.

Спутниковые данные (NDVI, Sentinel-2, Copernicus) являются потенциально ценным источником высокочастотной информации, однако без интеграции с кадастровыми сведениями их использование затруднено. Например, при расчете индекса соответствия земельных участков (Land Match Index, LMI) используется:

$$LMI = \frac{A_{matched}}{A_{total}}, \quad (34)$$

где $A_{matched}$ – площадь, по которой спутниковые наблюдения успешно привязаны к кадастровым участкам;

A_{total} – общая площадь сельхозугодий.

Если общая площадь земель составляет 8,5 млн га, а успешно интегрированы спутниковые данные лишь для 5,1 млн га, то:

$$LMI = \frac{5,1}{8,5} \approx 0,6, \quad (35)$$

что указывает на существенный разрыв в пространственной интеграции данных.

Таким образом, карта доступности данных позволяет выявить структурные слабые места белорусской статистики: низкую прозрачность по внутренним ценам, недостаточную регионализацию экологической информации и ограниченность пространственной интеграции спутниковых наблюдений. Для практической реализации предлагается формирование *единого цифрового атласа данных АПК Беларуси*, где каждый индикатор сопровождается меткой доступности по шкале $0 \leq C_i \leq 1$, что создает основу для выстраивания национальной архитектуры данных устойчивого развития, а также цифровизации белорусского АПК (табл. 4).

Соответственно, можно сделать несколько выводов относительно доступности данных по ключевым индикаторам АПК Республики Беларусь:

- наибольшая полнота данных наблюдается для социальных показателей (занятость), а также для погодных рядов (близкие к $C_i = 0,9$);
- экологические индикаторы имеют низкий коэффициент полноты информации ($C_i = 0,45-0,60$) и слабую региональную детализацию ($R \leq 0,5$), что отражает дефицит систематических замеров;
- спутниковые наблюдения (NDVI, Sentinel-2) обладают высоким потенциалом ($C_i = 0,7$, $R = 0,85$), но требуют дальнейшей пространственной привязки: $LMI = 0,6$;
- финансовые индикаторы (доступность кредитов, инвестиции) остаются частично закрытыми (данные публикуются агрегированно, что занижает C_i).

Современное состояние статистической базы агропромышленного комплекса Республики Беларусь характеризуется высоким уровнем фрагментарности и неполноты. Высокочастотные данные (метеорологические ряды, спутниковые наблюдения, биржевые котировки) в большинстве случаев не интегрированы в единую систему мониторинга, тогда как средне- и низкочастотные источники (месячная и годовая отчетность) содержат значительные пропуски и недостаточную региональную детализацию. Данный дисбаланс ограничивает потенциал построения экономико-матема-

Матрица доступности данных по ключевым индикаторам АПК Республики Беларусь

Показатель	Частота	Коэффициент полноты информации C_i	Региональная доступность R	Индекс пространственной интеграции (LMI)
Цены на зерно и корма	день / месяц	0,33	1,00	—
Погодные условия (температура, осадки)	день / час	0,90	0,95	—
Урожайность зерновых	год	0,80	0,70	0,60
Деградация почв	год	0,50	0,50	—
Выбросы ПГ в молочном секторе	год	0,60	0,40	—
Баланс азота и фосфора	год	0,45	0,30	—
Спутниковый NDVI	10 дней / месяц	0,70	0,85	0,60
Занятость в сельской местности	квартал / год	0,95	0,90	—
Инвестиции в АПК	квартал / год	0,80	0,85	—
Доступность кредитов	месяц / квартал	0,65	0,50	—

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 ООН; Министерства экономики Республики Беларусь; Национального банка Республики Беларусь.

тических моделей и снижает надежность прогнозных оценок.

В условиях усиления процессов глобализации ключевым направлением становится интеграция национальной статистики с методологиями FAO, OECD и системой индикаторов целей устойчивого развития (SDG). Это требует внедрения цифровых решений, обеспечивающих сопоставимость классификаторов, автоматизацию преобразования данных и формирование единой методологической базы. Без цифровизации невозможна корректная интеграция белорусских показателей в международные сравнительные исследования.

Развитие цифровых инструментов позволяет существенно повысить прозрачность функционирования аграрных рынков, сократить информационные асимметрии и обеспечить более эффективное регулирование. Инструменты цифрового мониторинга цен, урожайности, энергоемкости и экологических параметров создают предпосылки для укрепления доверия со стороны инвесторов и международных партнеров, а

также для повышения результативности государственной поддержки.

Создание единого цифрового атласа данных АПК представляется стратегически необходимым шагом. Такая платформа должна обеспечивать:

- консолидацию высоко-, средне- и низкочастотных данных;
- пространственную интеграцию спутниковых наблюдений с кадастровыми сведениями;
- формирование индикаторов с метками полноты, детализации и доступности.

Функционирование подобной системы позволит рассчитывать интегрированные индексы устойчивости (например, SNI, BSI) в режиме, близком к реальному времени, что расширит возможности для адаптивного управления.

Цифровизация агропромышленного комплекса Республики Беларусь выступает не только как технологическая инновация, но и как структурная необходимость, определяющая устойчивость и конкурентоспособность сектора. Без цифровой трансформации невозможно обеспечить качество

статистической базы, ее сопоставимость с международными стандартами, а также своевременное выявление рисков и формирование адекватных управленческих решений. В связи с этим цифровизация должна рассматриваться как приоритетное направление аграрной политики и стратегический ресурс устойчивого развития национальной экономики.

Устойчивое развитие агропромышленного комплекса Республики Беларусь требует комплексного подхода, который учитывает как внутренние институциональные особенности, так и международные ориентиры. Неопределенность в аграрной экономике носит многоуровневый характер: от стохастических природных и рыночных колебаний до институциональной и технологической нестабильности. Для эффективного управления необходимы методы динамической оптимизации, робастного анализа и интеграции данных смешанной частоты.

Международные методологии (FAO SAFA, OECD AEI, SDG, CAP/«Зеленый курс») в сочетании с национальными приоритетами позволяют выстроить адаптированную систему индикаторов устойчивости, которая делает возможной оценку экологических, экономических, социальных и институциональных факторов. Введение агрегированных индексов (BSI, SNI) обеспечивает не только долгосрочное планирование, но и оперативное реагирование на шоки.

Ключевым вызовом остается гармонизация статистики и повышение качества данных, включая устранение пропусков, пространственную интеграцию спутниковых наблюдений и согласование национальных классификаторов с международными. Решение этих задач позволит Беларуси включиться в глобальные сравнительные исследования и повысить эффективность собственной аграрной политики.

Таким образом, предложенный в статье подход формирует методологическую основу для построения экономико-математических моделей устойчивости АПК, которые способны работать в условиях высокой волатильности и неопределенности. Это создает базу для стратегического ма-

неврирования, повышения продовольственной безопасности и интеграции страны в международное сообщество в сфере устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

Гусаков В.Г. (ред.) 2016. *Проблемы устойчивого развития АПК: вопросы теории и методологии*. Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси. 127 с. [Gusakov V.G. (ed.) 2016. *Problems of Sustainable Development of The Agro-Industrial Complex: Theoretical and Methodological Issues*. Minsk: Institut sistemnykh issledovaniy v APK NAN Belarusi. 127 p. (In Russ.)]

Кондратенко С.А. 2014. *Устойчивое развитие регионального агропромышленного комплекса: вопросы теории, методологии и управления*. Под ред. В.Г. Гусакова. Минск: Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси. 286 с. [Kondratenko S.A. 2014. *Sustainable Development of the Regional Agro-Industrial Complex: Issues of Theory, Methodology and Management*. Ed by V.G. Gusakova. Minsk: Institut sistemnykh issledovaniy v APK NAN Belarusi. 286 p. (In Russ.)]

Конончук В.В. 2019. Методологические аспекты моделирования инновационного устойчивого развития агропромышленного комплекса региона. *Вестник Брэсцкага ўніверсітэта. Серыя 2. Гісторыя. Эканоміка. Права*. № 2. С. 64–69. [Kononchuk V.V. Methodological Aspects of Modeling of Informativ Sustainable Development of Agribusiness in the Region. *Vesnik Brestskaga universiteta. Seryya 2. Gistoryya. Ecanomika. Prava*. No 2. PP. 64–69. (In Russ.)] URL: <https://jurnal.brsu.by/index.php/history/article/view/2109>

Ленькова Р.К. 2018. Системный подход при прогнозировании экономики. *Проблемы экономики: сборник научных трудов*. № 2 (27). С. 98–107. [Len'kova R.K. System Approach to Economics Forecasting. *Problemy ekonomiki: sbornik naychnykh trudov*. No 2 (27). PP. 98–107. (In Russ.)] URL: <https://hdl.handle.net/123456789/1299>

Павлович Л. 2022. Факторы устойчивости и риски АПК Беларуси. *Аграрная экономика*. Т. 10. № 2. С. 45–56. [Pavlovich L. 2022. Sustainability Factors and Risks of the Belarusian Agro-Industrial Complex. *Agrarnaya ekonomika*. Vol. 10. No 2. PP. 45–56. (In Russ.)]

Редько В.Н., Редько Д.В. 2008. Проблемы и перспективы устойчивого развития АПК Республики Беларусь. *Экономика и управление: проблемы, решения*. Т. 2. № 3. С. 115–121. [Red'ko V.N., Red'ko D.V. 2008. Problems and Prospects of

Sustainable Development of the Agro-Industrial Complex of the Republic of Belarus. *Ekonomika i upravleniye: problemy, resheniya*. Vol. 2. No 3. PP. 115–121. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-i-perspektivy-ustoychivogo-razvitiya-apk-respubliki-belarus/pdf>

Соловцов Н.И. 2021. Стратегические и тактические аспекты устойчивого развития сельских территорий. *Аграрная экономика*. Т. 9. № 3. С. 65–74. [Solovtsov N.I. 2021. Strategic and Tactical Aspects of Sustainable Development of Rural Areas. *Agrarnaya ekonomika*. Vol. 9. No 3. PP. 65–74. (In Russ.)]

Adashkevich S. 2021. The Impact of the Agri-Food Sector on Belarus's Economic Growth. *European Research Studies Journal*. Vol. 24. Iss 3. PP. 800–810. URL: <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/105674>

Ben Haim Y. 2001. Information-Gap Decision Theory. In: Marchau V.A.W.J., Walker W.E., Bloemen P.J.T.M., Popper S.W. (eds.) *Decision Making under Deep Uncertainty. From Theory to Practice*. PP. 93–115. San Diego, CA: Academic Press. DOI: 10.1007/978-3-030-05252-2_5

Holling C./ S. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. Vol. 4. PP. 1–23. DOI: 10.1146/annurev.es.04.110173.000245

Gunderson L.H., Holling C.S. (eds.) 2002. *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington, DC: Island Press. 507 p. DOI: 10.1016/S0006-3207(03)00041-7

Knight F.H. 1921. *Risk, Uncertainty and Profit*. Boston; New York: Houghton Mifflin Company. PP. 682–690.

APPROACHES TO CONSTRUCTING SUSTAINABILITY INDICES OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX OF THE REPUBLIC OF BELARUS BASED ON ECONOMIC-MATHEMATICAL MODELS AND MIXED-FREQUENCY DATA

Alesia Mazol¹ (<https://orcid.org/0009-0005-3624-0860>)

¹ Belarusian State Economic University (Minsk, Belarus).

Corresponding author: Alesia Mazol (a.mozol@aol.com).

ABSTRACT. This article develops the theoretical and methodological foundations for advancing the sustainable development of the agro-industrial complex (AIC) of the Republic of Belarus in uncertain conditions. The analysis addresses stochastic, political-regulatory, market, and technological sources of uncertainty, alongside institutional factors shaping the dynamics of the agricultural economy. Particular attention is given to the integration of international frameworks (FAO SAFA, OECD AEI, SDG, CAP/«Green Deal») with national indicators, the application of mixed-frequency data, and the construction of aggregated indices such as BSI and SNI. The proposed methodology enhances forecasting accuracy, promotes the harmonisation of national statistics with global standards, and establishes a foundation for adaptive governance of the Belarusian AIC in the context of volatility and external shocks.

KEYWORDS: sustainable development, agro-industrial complex (AIC), uncertainty, mixed-frequency data, economic-mathematical modeling, international indicators (FAO, OECD, SDG), robust planning, sustainability index (SNI, BSI), food security.

JEL-code: C41; C82; Q01; Q16; Q18.

DOI: 10.46782/1818-4510-2025-4-118-132

Received 28.08.2025

In citation: Mazol A. 2025. Approaches to Constructing Sustainability Indices of the Agro-Industrial Complex of the Republic of Belarus Based on Economic-Mathematical Models and Mixed-Frequency Data. *Belorusskiy ekonomicheskii zhurnal*. No 4. PP. 118–132. DOI: 10.46782/1818-4510-2025-4-118-132 (In Russ.)

