

Научная статья

УДК 338.439

doi: 10.55186/25876740_2025_68_7_926

МНОГОАГЕНТНЫЙ СИСТЕМНО-ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

С.В. Проницкий

Центральный экономико-математический институт
Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Исследование посвящено решению критически важной задачи обеспечения продовольственной безопасности в архитектуре национальной безопасности в условиях глобальной нестабильности и санкционного давления. Целью работы является формализация управления неопределенностями и коллизиями в логистических цепочках поставок сельхозпродукции. В статье предлагается новая методология, которая основана на гибридном подходе, интегрирующем иерархический анализ (от нано- до мета-уровня) с динамическим моделированием процессов многоагентной системы. В ее состав входят агенты, функционирующие на базе знаний прецедентов и правил разрешения коллизий для автоматического выявления и устранения конфликтов в логистических операциях поставок сельхозпродукции. Предложенный комплексный системно-процессный подход включает анализ структуры потребления и расчет актуального прожиточного минимума. Апробация разработанного инструментария подтвердила высокую точность распознавания коллизий и их автоматического разрешения, а также экономию логистических издержек. Полученные результаты могут быть использованы для создания интеллектуальных систем поддержки принятия управленческих решений, повышающих устойчивость продовольственной системы к внешним шокам за счет оперативной реконфигурации цепочек поставок и реалистичной оценки уязвимости домохозяйств в условиях санкционного давления.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, многоагентные системы, системно-процессный подход, логистическая координация, алгоритм разрешения коллизий, сельскохозяйственная продукция, агрохолдинги

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-00810.

Original article

MULTI-AGENT SYSTEM-PROCESS APPROACH TO ENSURING FOOD SECURITY

S.V. Pronichkin

Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

Abstract. The study is devoted to solving the critical problem of ensuring food security in the national security architecture in the context of global instability and sanctions pressure. The aim of the work is to formalize the management of uncertainties and collisions in the logistics chains of agricultural supplies. The article proposes a new methodology based on a hybrid approach integrating hierarchical analysis (from nano- to meta-level) with dynamic modeling of processes of a multi-agent system. It includes agents operating on the basis of precedent knowledge and collision resolution rules for automatic detection and resolution of conflicts in logistics operations of agricultural supplies. The proposed integrated system-process approach includes analysis of the consumption structure and calculation of the current subsistence minimum. Testing of the developed tools confirmed the high accuracy of collision recognition and their automatic resolution, as well as savings in logistics costs. The obtained results can be used to create intelligent systems to support management decisions that increase the resilience of the food system to external shocks through the rapid reconfiguration of supply chains and a realistic assessment of household vulnerability in the face of sanctions pressure.

Keywords: food security, multi-agent systems, system-process approach, logistics coordination, collision resolution algorithm, agricultural products, agro-holding

Acknowledgments: the study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 25-28-00810.

Введение. Современная ситуация, характеризующаяся глобальной нестабильностью и санкционными режимами, требует строгого научного обоснования теоретико-методологических основ обеспечения продовольственной безопасности [1, 2]. Это обуславливает необходимость системного анализа структурно-сущностных характеристик категории «безопасность потребления» на различных уровнях иерархии системы экономической безопасности государства [3, 4]. Ключевой целью является разработка концептуальной методологии, стратегических приоритетов и передовых инструментов для моделирования торговых потоков в условиях глобальных вызовов.

Достижение синергетического эффекта безопасности потребления в системе национальной безопасности рассматривается [5-7] как результат интегрального взаимодействия общества, бизнеса и государства. Это требует формирования парадигмы безопасного потребления в условиях санкционного давления; создания условий для модернизации предпринимательской деятельности в рамках многокритериальных ограничений и совершенствования институтов обеспечения продовольственной безопасности на региональном, национальном и международном уровнях системной иерархии.

Императивом данного исследования является идентификация системных характеристик процесса потребления и его безопасности, основанная на теоретико-методологических положениях мультиагентного моделирования [8-10]. Нами утверждается, что безопасность потребления должна исследоваться с системных позиций, в то время как обеспечение продовольственной безопасности — с процессных. Сложные причинно-следственные связи в данной области предполагают необходимость гибридного системно-процессного подхода (где система рассматривается как процесс, а процесс — как система).



Материалы и методы

1.1 Формальная постановка задачи и математический аппарат

Ключевой проблемой в обеспечении продовольственной безопасности является наличие различных неопределенностей при формировании и принятии управленческих решений [11-13]. Эти неопределенности проявляются в виде потенциальных конфликтов (коллизий) в логистических операциях в цепочках поставок сельхозпродукции.

Введем определения, пусть:

G — множество всех видов сельскохозяйственных товаров;

R — запрос на поставку, определяемый как кортеж $R = \langle T, Q, C \rangle$, где $T \subseteq G$ — множество требуемых товаров, Q — вектор количественных требований, а C — множество дополнительных ограничений (качество, стандарты, сроки);

L — логистическая операция формирования партии поставки, которая направлена на удовлетворение запроса R .

Коллизия (конфликт) K возникает, когда параметры планируемой операции L не могут удовлетворить ограничения C запроса R для подмножества товаров $T_k \subseteq T$, т.е. $L(T_k) \not\subseteq C(T_k)$.

1.2 Теоретические основы многоуровневого системно-процессного подхода

Фундаментальный императив самосохранения домохозяйств проявляется как подсознательная потребность в безопасности [14, 15]. В данном исследовании безопасность определяется как свойство объектов (подсистем и систем) сохранять условия взаимодействия с минимальным ущербом для человеческих, природных и материальных ресурсов в условиях приемлемого риска. Конфигурация взаимосвязей и взаимозависимостей между субъектами безопасности зависит от множества интересов, как внутри изучаемого объекта, так и в его взаимодействии с внешней средой.

Объект безопасности рассматривается через призму системообразования, концептуализированного как многоуровневая иерархия информационно-логических структур: мета-уровень — глобальная безопасность; мега-уровень — экономическая безопасность международных образований; макро-уровень — национальная экономическая безопасность; мезо-уровень — экономическая безопасность регионов страны и отраслей национальной экономики; микро-уровень — экономическая безопасность юридических лиц и индивидуальных предпринимателей; нано-уровень — экономическая безопасность индивида и семьи.

Продовольственная безопасность является всеобъемлющей проблемой на каждом уровне, выступая объектом интересов как субъектов безопасности, так и субъектов управления ею [16-18]. Компоненты продовольственной безопасности являются всепроникающими, пронизывают подсистемы, взаимодействуя с другими компонентами (социальными, экологическими, информационными), и усиливают или ослабляют их воздействие.

1.3 Архитектура многоагентной системы

Для адекватного представления динамики функционирования национальной продовольственной системы с учетом большого количества разнородных изменяющихся во времени факторов применяется технология многоагент-

ных систем [19-21]. Предлагаемая архитектура многоагентных систем состоит из специализированных агентов:

1. Агент-Распознаватель (A_{rec}) — ответствен за выделение признаков и обнаружение потенциальных коллизий.

2. Агент-Координатор (A_{coord}) — выбирает рациональный вариант координирующего решения на основе налагаемых требований.

3. Агент-Решатель (A_{solve}) — проверяет реальное существование коллизии и применяет метод ее разрешения из базы знаний.

Предлагаемый алгоритм формирования координирующих решений представляет собой последовательный процесс, который имеет определенные входы, выходы и управляющие воздействия. Алгоритм разрешения коллизий в логистике поставок сельхозпродукции содержит следующие элементы:

Вход: запрос на поставку R ; множество планируемых логистических операций L .

Выход: множество координирующих решений \mathbb{D} (или эскалация к лицу, принимающему решение — ЛПР).

База знаний: репозиторий прецедентов \mathbb{P} ; множество правил разрешения Φ .

1. Для каждой операции $L_i \in L$:
 - a. A_{rec} извлекает множество признаков F_i указывающих на потенциальные коллизии ($F_i = \{f | f \text{ предлагает } K\}$).
 - b. Сформировать множество потенциальных коллизий $\mathbb{K}_{pot} = \mathbb{K}_{pot} \cup \{K\}$.
2. Для каждой потенциальной коллизии $K_j \in \mathbb{K}_{pot}$:
 - a. Определить тип $\tau(K_j)$.
 - b. Если $\tau(K_j) \in \Phi$ (разрешима автоматически):
 - i. Пусть $T_{conf} = \{t \in T | t = f^{-1}(F_j)\}$, где t является полным прообразом признаков в F_j , чтобы идентифицировать конфликтующие товары.
 - ii. Определить соответствующее звено логической цепи и назначить A_{solve}^j .
 - iii. Сформировать ограничения C^j для операции L_i .
 - c. Иначе: эскалировать K_j к ЛПР для ручного разрешения.
3. A_{solve}^j выполняет запрос для проверки реального существования коллизии K_j .
4. Если коллизия K_j существует:
 - a. A_{coord} извлекает метод разрешения M_j из Φ на основе $\tau(K_j)$.
 - b. A_{coord} формулирует координирующее решение $D_j = M_j(K_j, \mathbb{P})$.
 - c. Применить D_j для разрешения K_j .
 - d. Архивировать D_j в репозитории прецедентов \mathbb{P} .
5. Конец цикла

Данный алгоритм встроен в послынную архитектуру системы поддержки принятия решений, обеспечивающую гомогенность информационного пространства за счет четкого позиционирования каждого функционального блока и широкого использования типовых решений.

1.4 Социально-экономическое моделирование
Анализ структуры потребления крайне важен для обеспечения продовольственной безопасности [22, 23]. Пусть S_c — вектор структуры потребления, представляющий доли расходов на различные категории продовольственных товаров. Улучшение условий жизни способствует росту работоспособности и уровня жизни, изменяя S_c .

Критическим ограничением является официальный прожиточный минимум (PM), который включает стоимость минимальной продовольственной корзины. Однако его размер негативно влияет на благосостояние домохозяйств и усиливает неравенство доходов. В условиях санкционного давления наиболее уязвимыми оказываются домохозяйства, зависящие от социальных выплат.

В данном исследовании мы выходим за рамки этой упрощенной модели. Мы предлагаем мониторинг актуального прожиточного минимума (APM), который значительно выше установленного PM . APM основывается на современной потребительской корзине товаров и услуг (K_{mod}), которая, в отличие от стандартной, включает жизненно необходимые затраты, часто игнорируемые: жилье (покупка или аренда); образование; уход за детьми в дошкольных учреждениях; платные медицинские услуги.

Тогда $APM = \sum_{i=1}^n p_i q_i^{mod}$, где p_i — цена товара/услуги i , а q_i^{mod} — его количество в современной корзине K_{mod} . Разрыв $\Delta = APM - PM$ количественно определяет неадекватность текущих систем обеспечения продовольственной безопасности.

Результаты

Для верификации и валидации разработанной многоагентной системы и алгоритмов был проведен вычислительный эксперимент на основе ретроспективных данных логистических операций одного из крупных агрохолдингов Южного федерального округа. Апробация включала следующие этапы.

Формирование тестового корпуса данных. На основе исторических данных было смоделировано 1200 уникальных запросов на поставку (R), содержащих как стандартные, так и нестандартные условия, приводящие к потенциальным коллизиям. Были искусственно внесены известные ошибки для проверки работы агента-распознавателя в нестандартных условиях.

В контексте предложенной многоагентной системы нестандартные условия — это отклонения от стандартных или плановых параметров логистической операции, которые система-координатор не может разрешить штатными средствами и которые создают потенциальную коллизию — конфликт между требованиями запроса и возможностями его исполнения.

Рассмотрим примеры нестандартных условий и вытекающих из них цепочек потенциальных коллизий.

Сценарий № 1: агрохолдинг должен поставить в торговую сеть партию раннего картофеля (Товар: Картофель, сорт «Ред Скарлет»).

Исходный запрос на поставку (R): $T = \{\text{Картофель «Ред Скарлет»}\}$; $Q = \{\text{Объем: 20 тонн}\}$; $C = \{\text{Стандарт: ГОСТ R 51808-2001; Упаковка: сетка по 25 кг; Температура хранения: +2...+4°C; Дата поставки на склад сети: дата}\}$

Возникающее нестандартное условие — из-за продолжительных дождей в период уборки урожая фактическое содержание влаги в клубнях составило 68% при максимально допустимом по ГОСТу значению в 65%.

Цепочка потенциальных коллизий, которые должен распознать и обработать алгоритм:

1. Коллизия № 1 (Качество → Логистика): $L(\text{Картофель}) \vdash C(\text{ГОСТ}) \rightarrow \text{ЛОЖь}$. Партия не соответствует требованию по стандарту качества. Потенциальные последствия: отказ приемки, финансовые санкции, репутационные потери.



2. Коллизия № 2 (Качество → Время): $L(\text{Картофель}) \vdash C(\text{Дата поставки}) \rightarrow \text{ЛОЖь}$. Нарушение контрактного срока поставки. Необходимость дополнительной процедуры просушки/калибровки для приведения партии в соответствие с ГОСТом ведет к сдвигу сроков отгрузки.

3. Коллизия № 3 (Логистика → Риски): $L(\text{Логистика}) \vdash C(\text{Рентабельность}) \rightarrow \text{ЛОЖь}$. Резкий рост логистических издержек. Сдвиг сроков отгрузки приводит к необходимости изменения логистического маршрута (например, вместо более дешевого железнодорожного транспорта приходится использовать дорогостоящий автомобильный для соблюдения итоговой даты).

Работа алгоритма управления коллизиями:

1. Агент-распознаватель A_{rec} . На этапе формирования партии данные с датчиков влажности анализируются. A_{rec} выделяет признак $f_1 = \{\text{Влажность: } 68\% > 65\%\}$. Этот признак идентифицируется как потенциальная коллизия типа $t(K_1) = \text{«Несоответствие качеству по ГОСТ»}$.

2. Определение типа. Система проверяет, что для типа «Несоответствие качеству по ГОСТ» в базе знаний Φ существуют методы решения. Коллизия признана автоматически разрешимой.

3. Агент-решатель A_{solve} . Система проверяет реальное существование коллизии, запрашивая актуальные данные. Подтверждается, что коллизия существует.

4. Агент-координатор A_{coord} .
– A_{coord} обращается к базе знаний Φ и репозиторию прецедентов Π .

– Алгоритм находит сценарий-прецедент D_{prev} с аналогичной коллизией (высокая влажность картофеля).

– Согласно прецеденту, координирующее решение D_j формируется по методу компенсации: вариант А (приоритет скорости) — предложить скидку в 5% от стоимости партии в обмен на приемку товара с отклонением по влажности и изменение даты поставки; вариант Б (приоритет качества) — направить партию на быструю послеуборочную доработку (сушку) на ближайшем элеваторе, автоматически забронировав мощностные и скорректировав маршрут транспорта, а также рассчитать новые сроки и затраты, предложить их сети.

5. Выбранное решение D_j (вариант А) архивируется в Π как новый прецедент для будущего использования.

Нештатное условие (аномальная влажность) привело к потенциальной коллизии, которая была автоматически распознана, верифицирована и разрешена путем генерации координирующего решения, минимизирующего убытки и сохраняющего ликвидность партии товара.

Сценарий № 2: агрохолдинг заключает контракт на поставку семенного картофеля элитных сортов из стран ЕС для обеспечения посевной кампании в регионах России.

Исходный запрос на поставку (R): $T = \{\text{Семенной картофель, сорт «Ред Скарлет»}\}$; $Q = \{\text{Объем: 200 тонн}\}$; $S = \{\text{Стандарт: ГОСТ 33996-2016; Категория: элита; Фитосанитарный сертификат: EU; Срок поставки: дата; Условия оплаты: безотзывный аккредитив}\}$.

Возникающее штатное условие — введение очередного пакета санкций ЕС, который включает:

1. Прямой запрет на экспорт в Россию семенного материала категории «Элита» и «Суперэлита» по кодам ТН ВЭД 070110.

2. Заморозку активов и запрет на транзакции с ключевыми российскими банками, обслуживающими агропромышленный комплекс.

3. Приостановку действия фитосанитарных сертификатов для поставок в Россию.

Цепочка потенциальных коллизий:

1. Коллизия № 1 (Финансовая): $L(\text{Оплата}) \vdash C(\text{Аккредитив}) \rightarrow \text{ЛОЖь}$. Европейский банк-корреспондент отказывается подтверждать аккредитив из-за санкций против банка-эмитента. Денежные средства заморожены.

2. Коллизия № 2 (Правовая): $L(\text{Товар}) \vdash C(\text{Фитосертификат}) \rightarrow \text{ЛОЖь}$. Действие фитосанитарных сертификатов EU приостановлено. Товар не может быть ввезен на территорию РФ.

3. Коллизия № 3 (Логистическая): $L(\text{Поставка}) \vdash C(\text{Срок}) \rightarrow \text{ЛОЖь}$. Груз заблокирован на границе ЕС. Посевная кампания под угрозой срыва.

Работа алгоритма управления коллизиями:

1. Распознавание (A_{rec}). Система мониторинга санкционных рисков детектирует:

– $f_1 = \{\text{Запрет на экспорт семенного материала}\}$;

– $f_2 = \{\text{Банк в санкционном списке}\}$;

– $f_3 = \{\text{Приостановка фитосертификатов}\}$.

2. Верификация (A_{solve}). Подтверждается реальность коллизии через интеграцию с таможенными и банковскими системами.

3. Решение (A_{coord}). На основе прецедентов система предлагает:

– Сценарий А. Срочная перенаправление поставки через третьи страны (Сербия, Турция) с переоформлением документов.

– Сценарий Б. Замена на отечественный семенной материал с пересчетом логистики и корректировкой планов посевной.

– Сценарий В. Использование схемы аутсорсинга с закупкой через дружественные юрисдикции.

4. Реализация. Система автоматически:

– Иницирует переговоры с альтернативными поставщиками.

– Корректирует логистические маршруты.

– Генерирует новый пакет документов.

– Вносит изменения в производственные планы.

Данный пример демонстрирует как санкции создают каскадные коллизии в критической точке продовольственной системы — обеспечении семенным материалом. Без автоматизированной системы управления коллизиями подобная ситуация привела бы к:

– Срыву посевной кампании.

– Потере урожая.

– Росту цен на картофель.

– Снижению продовольственной безопасности региона.

Предложенный алгоритм позволяет парировать санкционные ограничения за счет оперативного перенаправления товарных потоков и реконфигурации цепочек поставок, что напрямую способствует обеспечению продовольственной безопасности страны в условиях внешнего давления.

Для оценки эффективности алгоритма были выбраны следующие метрики:

– Точность распознавания (P) — доля верно идентифицированных коллизий среди всех обнаруженных агентом A_{rec} .

– Полнота распознавания (R) — доля верно идентифицированных коллизий среди всех реально существующих в данных.

– Среднее время разрешения коллизии (T_{res}) — время от момента обнаружения признака коллизии до формирования координирующего решения.

– Доля коллизий, потребовавших эскалации ЛПР (DM_{esc}).

– Экономический эффект — оценка снижения логистических издержек за счет минимизации простоев и оптимизации маршрутов. Количественные результаты апробации:

– Агент-распознаватель (A_{rec}) показал высокую эффективность: $P = 0.89$, $R = 0.84$. Ложные срабатывания были связаны с аномальными, ранее не встречавшимися значениями признаков.

– Алгоритм разрешения коллизий продемонстрировал способность автоматически устранять 82% всех возникающих конфликтов ($DM_{esc} = 18\%$). Основная доля эскалации пришлась на коллизии, требующие стратегических, а не оперативных решений.

– Среднее время разрешения коллизии (T_{res}) составило 4.7 минуты против 45 минут при традиционном, неавтоматизированном согласовании. Это свидетельствует о более чем 9-кратном увеличении операционной скорости реагирования.

– За счет оперативного перераспределения потоков и выбора оптимального координирующего решения был зафиксирован средний эффект снижения логистических издержек на 5.8% на одной операции. В годовом выражении для тестового агрохолдинга это эквивалентно экономии порядка 12-15 млн рублей.

Качественные результаты и устойчивость системы:

– По мере работы системы и наполнения репозитория прецедентов Π наблюдалась положительная динамика: количество эскалаций к ЛПР снижалось, а доля автоматически разрешаемых коллизий росла, что подтверждает способность системы к обучению.

– Предложенная модель расчета APM была применена для анализа данных по Краснодарскому краю и Белгородской области. Расчеты выявили, что $\Delta = APM - PM$ составляет от 28% до 41% в зависимости от региона, что количественно подтверждает гипотезу о значительном занижении официального показателя и позволяет точно идентифицировать наиболее уязвимые группы домохозяйств в условиях санкционного давления.

– Проведенный анализ чувствительности модели показал ее устойчивость к вариациям входных данных (изменениям в K_{mod}), а ключевые выводы о значительном разрыве Δ оставались статистически значимыми ($p\text{-value} < 0.05$).

Проведённая апробация подтвердила не только теоретическую состоятельность, но и практическую эффективность предложенного многоагентного подхода и алгоритмического обеспечения для задач обеспечения



продовольственной безопасности, демонстрируя значительное повышение скорости, точности и экономичности логистических процессов. Введение метрики *APM* дает более реалистичную оценку благосостояния домохозяйств под санкционным давлением, выявляя значительный разрыв (Δ) между официальными метриками и реальными потребностями. Потенциальные сбои в логистике поставок определены как конфликты между ограничениями запроса S и операционными возможностями $L(T_k)$. Архитектура многоагентных систем, путем последовательного применения алгоритма разрешения конфликтов в логистике поставок сельхозпродукции, предоставляет механизм для выявления, проверки и разрешения коллизий с использованием базы знаний прецедентов и методов компенсации.

Обсуждения. Предложенный системно-процессный подход позволяет осуществить целостную интеграцию многоуровневой природы продовольственной безопасности (от нано- до мета-) с динамической, процессно-ориентированной природой ее реализации (логистика, потребление). Формальная математическая модель и связанный с ней алгоритм трансформируют теоретические концепции «координирующих решений» и «разрешения коллизий» в действенные вычислительные процедуры.

Преимущества данного подхода многогранны. Технология многоагентных систем обеспечивает масштабируемость и адаптируемость к гетерогенной и динамичной природе национальной продовольственной системы. База знаний и репозиторий прецедентов позволяют системе обучаться на прошлых решениях, повышая свою эффективность с течением времени. Использование *APM* смещает фокус с абстрактной доступности продовольствия на конкретную экономическую доступность пищи и основных услуг для домохозяйств, что является краеугольным камнем безопасности потребления.

Ограничением, которое предстоит решить в будущих работах, является наполнение и непрерывная актуализация базы знаний Φ и репозитория прецедентов Π , что требует обширных предметных знаний и исторических больших данных.

Заключение

Данное исследование представляет комплексную научную основу для обеспечения продовольственной безопасности в условиях глобальной нестабильности. Основные выводы:

1. Обеспечение продовольственной безопасности России должно рассматриваться как сложная, многофакторная категория, характеризующая способность национальной

экономики к расширенному воспроизводству для удовлетворения потребностей населения и противодействия внешним угрозам.

2. Для понимания взаимодействия между иерархическими уровнями безопасности и процессами, ее обеспечивающими, необходим гибридный системно-процессный подход.

3. Присущие цепям поставок продовольствия неопределенности могут быть эффективно управляемы через формальную архитектуру многоагентной системы, разработанную вокруг алгоритма разрешения коллизий.

4. Социально-экономическая политика должна основываться на реалистичной оценке благосостояния домохозяйств, основанной на актуальном прожиточном минимуме (*APM*), который учитывает все жизненно важные затраты, а не на устаревшем и минималистичном официальном прожиточном минимуме. Значительный разрыв Δ между этими метриками выявляет критическую уязвимость, которую необходимо устранить для обеспечения безопасности потребления.

Предложенные модели и алгоритмы закладывают основу для разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений для акторов национальной системы продовольственной безопасности, от логистических координаторов до политиков.

Список источников/ References

- Aygun, O., Aygun, I., Kaya, M. (2025). Using aspect-based sentiment analysis to evaluate the global effects of the food security crisis during the Russia-Ukraine war. *Global Food Security*, vol. 44, pp. 100828.
- Abay, K.A., Breisinger, C., Glauber, J., et al. (2023). The Russia-Ukraine war: Implications for global and regional food security and potential policy responses. *Global Food Security*, vol. 36, pp. 100675.
- Namany, S., Govindan, R., Di Martino, M., et al. (2022). Developing intelligence in food security: An agent-based modelling approach of Qatar's food system interactions under socio-economic and environmental considerations. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 32, pp. 669689.
- Hemerijckx, L.-M., De Vos, K., Kaunda, J.O., et al. (2025). Future scenarios for urban agriculture and food security in sub-Saharan Africa: Modelling the urban land-food system in an agent-based approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 118, pp. 102258.
- Plotnikov, V., Nikitin, Y., Maramygin, M., et al. (2020). National food security under institutional challenges (Russian experience). *International Journal of Sociology and Social Policy*, vol. 41, no. 12, pp. 139-153.
- Glinksiy, V., Serga, L., Alekseev, M., et al. (2018). The Development of the Food Industry as a Condition for Improving Russia's National Security. *Procedia Manufacturing*, vol. 21, pp. 838-845.
- Battalova, A. (2015). Food Security as a Component of Economic Security System of Russia. *Procedia Economics and Finance*, vol. 27, pp. 235-239.
- Kuhla, K., Kubiczek, P., Otto, C. (2025). Understanding agricultural market dynamics in times of crisis: The dynamic

agent-based network model Agrimate. *Ecological Economics*, vol. 231, pp. 108546.

9. Öttl, A., Termansen, M. (2025). Agent-Based Modelling of food systems: A scoping review on incorporation of behavioural insights. *Environmental Modelling & Software*, vol. 193, pp. 106617.

10. Saint Bois, A., Boix, M., Montastruc, L. (2024). Multi-actor integrated modeling approaches in the context of Water-Energy-Food Nexus systems: Review. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 182, pp. 108559.

11. Haji, M., Govindan, R., Al-Ansari, T. (2022). A computational modelling approach based on the 'Energy — Water — Food nexus node' to support decision-making for sustainable and resilient food security. *Computers & Chemical Engineering*, vol. 163, pp. 107846.

12. Ur Rehman, K., Andleeb, S., Ashfaq, M., et al. (2023). Blockchain-enabled smart agriculture: Enhancing data-driven decision making and ensuring food security. *Journal of Cleaner Production*, vol. 427, pp. 138900.

13. Zuhanda, M.K., Hasibuan, S.A., Muthmainnah, N., et al. (2025). An evolutionary analytics model for enhancing food distribution through two-tier routing. *Decision Analytics Journal*, vol. 16, pp. 100621.

14. Egerson, D., Kpegba-Fiaboe, E.E., Christian, A.K. (2025). Understanding food (In) security through land and livelihoods: Evidence from longitudinal household data. *Journal of Rural Studies*, vol. 119, pp. 103750.

15. van Wijk, M.T., Rufino, M.C., Enahoro, D., et al. (2014). Farm household models to analyse food security in a changing climate: A review. *Global Food Security*, vol. 3, no. 2, pp. 77-84.

16. Khambalkar, P.A., Agrawal, S., Dhaliwal, S.S., et al. (2025). Sustainable nutrient management balancing soil health and food security for future generations. *Applied Food Research*, vol. 5, no. 2, pp. 101087.

17. Isik, Ö., Shabir, M., Moslem, S. (2024). A hybrid MCDM framework for assessing urban competitiveness: A case study of European cities. *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 96, pp. 102109.

18. Haghjoo, R., Choobchian, S., Morid, S., et al. (2022). Development and validation of management assessment tools considering water, food, and energy security nexus at the farm level. *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 16, pp. 100206.

19. Namany, S., Govindan, R., Alfagih, L., et al. (2020). Sustainable food security decision-making: An agent-based modelling approach. *Journal of Cleaner Production*, vol. 255, pp. 120296.

20. Bazzana, D., Foltz, J., Zhang, Y. (2022). Impact of climate smart agriculture on food security: An agent-based analysis. *Food Policy*, vol. 111, pp. 102304.

21. Emamjomehzadeh, O., Omid, F., Kerachian, R., et al. (2024). Water-energy-food-greenhouse gases nexus management in urban environments: A robust multi-agent decision-support system. *Sustainable Cities and Society*, vol. 113, pp. 105676.

22. Forgenie, D., Hutchinson, S.D., Mahase-Forgenie, M., et al. (2024). Analyzing per capita food consumption patterns in net food-importing developing countries. *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 18, pp. 101278.

23. Muhiwa, F., Li L., Laspidou, C. (2025). Global ecosystem sustainability indexing and patterns in the success of SDGs of water, energy and food security. *Journal of Cleaner Production*, vol. 516, pp. 145830.

Информация об авторе:

Проницкий Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела интеллектуальных технологий и систем, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории компьютерного моделирования социально-экономических процессов, Центральный экономико-математический институт РАН, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0677-2189>, sergeipronychkyn@gmail.com

Information about the author:

Sergey V. Pronichkin, candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher, department of intelligent technologies and systems, Federal Research Center «Informatics and Control» of the Russian Academy of Sciences, leading researcher, laboratory of computer modeling of socio-economic processes, Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0677-2189>, sergeipronychkyn@gmail.com

✉ sergeipronychkyn@gmail.com

