

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT



<https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.723-749>

EDN: <https://elibrary.ru/ogdhea>

УДК / UDK 574:633/635

Оригинальная статья / Original article

Оценка экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве

Н. И. Джаббаров¹, А. В. Добринов^{1✉}, А. П. Савельев²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем
сельскохозяйственного производства –
филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет,
г. Саранск, Российская Федерация

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Усиление антропогенного воздействия технических средств приводит к нарушению устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве, что в целом оказывает негативное влияние на существующий агроландшафт. В связи со значительным количеством отдельных экологических показателей оценка на устойчивость технологических процессов проводится как правило без ранжирования их значимости, не учитывая природно-климатические особенности, которые в значительной степени оказывают влияние на систему производства сельскохозяйственной продукции. При этом не выработан необходимый подход, который бы позволил комплексно произвести оценку устойчивости с высокой степенью достоверности.

Цель исследования. Обосновать критерии и предложить оценку технологических процессов в растениеводстве по степени их экологической устойчивости и стабильности.

Материалы и методы. Исследование базировалось на применении аналитических методов и обобщении научных результатов, полученных различными авторами. Метод статистического моделирования процессов позволил выявить их закономерность, определить и обоснованно выбрать весомые факторы, влияющие на устойчивость и стабильность процессов.

Результаты исследования. Разработаны частные и интегральные критерии оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве. Приведены примеры расчета критериев и дана оценка экологической устойчивости и стабильности технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву. Обоснована шкала оценки технологических процессов по значениям интегрального критерия оценки. По степени экологической

© Джаббаров Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

устойчивости технологические процессы предложено разделить на устойчивые, среднеустойчивые, неустойчивые и с высокой энтропией.

Обсуждение и заключение. Предложенные авторами критерии оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве в дальнейшем можно использовать при разработке мобильных приложений, платформ и логистических решений для повышения эффективности отрасли, производительности труда, улучшения качества продукции и т. д.

Ключевые слова: растениеводство, технологические процессы, экологическая устойчивость, экологическая стабильность, критерии оценки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Джаббаров Н.И., Добринов А.В., Савельев А.П. Оценка экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве. *Инженерные технологии и системы*. 2025;35(4):723–749. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.723-749>

Assessment of Environmental Sustainability and Stability of Crop Production Technological Processes

N. I. Jabborov^a, A. V. Dobrinov^a ✉, A. P. Savelyev^b

^a Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation

^b National Research Mordovia State University, Saransk, Russian Federation

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Abstract

Introduction. The increased anthropogenic impact of technological tools leads to a violation of the environmental sustainability and stability of crop production technological processes that has a negative effect on the existing agrarian landscape. Because of a significant number of single environmental indicators, the assessment of the environmental sustainability of technological processes is usually carried out without ranking their significance and without taking into account individual natural and climatic characteristics that significantly affect the agricultural production system. At the same time, there has not been developed a necessary approach for assessing the environmental sustainability with a high measure of reliability.

Aim of the Study. The study is aimed at justifying the criteria and proposing an assessment of the degree environmental sustainability and stability of technological processes in crop production.

Materials and Methods. The study was based on the use of analytical methods and the synthesis of scientific results obtained by various authors. There was employed statistic modeling of processes that made it possible to identify the patterns of these processes, determine and reasonably choose significant factors influencing the environmental sustainability and stability of the processes.

Results. There have been developed partial and integral criteria for assessing environmental sustainability and stability of crop production technological processes. There are given the examples of criteria calculation and the assessment of environmental sustainability and stability of the technological processes of transportation and application of liquid organic fertilizers to the soil. There has been substantiated the scale of assessment of technological processes based on the values of the integral evaluation criterion. According to the environmental sustainability degree, the authors propose to divide technological processes into stable, medium-stable, unstable and with high entropy.

Discussion and Conclusion. The authors proposed criteria for assessing environmental sustainability and stability in crop production technological processes, which can be used for developing mobile apps, platforms, and logistics solutions to improve industry efficiency, labor productivity, product quality, etc.

Keywords: crop production, technological processes, environmental sustainability, environmental stability, evaluation criteria

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Jabborov N.I., Dobrinov A.V., Savelyev A.P. Assessment of Environmental Sustainability and Stability of Crop Production Technological Processes. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(4):723–749. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202504.723-749>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие сельскохозяйственного производства должно быть направлено на повышение экологической устойчивости как агропромышленного комплекса в целом, так и отдельных его предприятий. Обеспечение экологически устойчивого производства сельскохозяйственной продукции, связанное с задачами экономического и социального благополучия, а также энерго-ресурсоснабжения отрасли представляет собой актуальную проблему.

Оценке устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных ученых, обобщение результатов которых позволяет сформулировать понятия экологической устойчивости (или точности) и стабильности технологических процессов. С экологической точки зрения устойчивость может рассматриваться как способность процесса сохранять равновесие или постоянство его экологических показателей под нагрузкой и быстро восстанавливаться при ее снятии, а стабильность процессов характеризуется возможностью противостоять воздействиям внешних возмущающих факторов, т. е. непрерывно (во времени) поддерживать устойчивость.

Устойчивость предприятия оценивается различными критериями, в число которых входят экономические, правовые, социальные, организационные, экологические, маркетинговые и качественные показатели. Многокритериальная оценка обеспечит устойчивое развитие предприятия в условиях экономической неопределенности [1].

Анализ опубликованных результатов исследований показывает, что усиление антропогенного воздействия технологий и технических средств приводит к нарушению устойчивости и стабильности агроэкосистем. При оценке экологической устойчивости и стабильности технологических процессов применяются различные подходы с использованием многочисленных показателей зачастую без обоснования их важности (или весомости) для конкретных зональных условий возделывания сельскохозяйственных культур. Отсутствует единый универсальный метод оценки устойчивости и стабильности технологических процессов.

Настоящее исследование помогает усовершенствовать теоретические основы и практические приемы оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве.

Цель исследования – разработать критерии и шкалу оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве.

Задачи исследования:

- 1) анализ методов и показателей оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов, технологий производства сельскохозяйственной продукции;
- 2) обоснование критериев устойчивости, стабильности и определение допустимых значений экологических показателей процессов;
- 3) определение интегральных критериев оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов, обеспечивающих их эколого-экономическую эффективность и качество производимой продукции.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Устойчивое развитие агропромышленного комплекса основано на трех ключевых компонентах: окружающая среда, общество, экономика. Эти компоненты взаимодополняемы, что позволяет осуществлять управление физическим, природным и человеческим капиталом.

Основные индикаторы устойчивого развития региона: доля использованных и обезвреженных отходов, загрязненных сточных вод в общем объеме сбросов; интенсивность образования отходов и выбросов на единицу валового регионального продукта; площадь особо охраняемых природных территорий; использование расчетной лесосеки; объем инвестиций в охрану окружающей среды; истощение природного капитала [2].

При оценке экологической устойчивости сельских населенных мест необходим всесторонний учет экономических, социальных, технических и экологических аспектов на разных стадиях развития района, повышение значимости энергосбережения и внедрение элементов концепции «умный город». При этом можно использовать экспертный и вероятностный методы оценки рисков и выявления значимых параметров. Система критериев оценки включает в себя архитектурно-планировочные (эффективность использования площади, энергоэффективная застройка, качество транспортных систем и др.), социально-экономические (социальная и коммерческая инфраструктуры, защита от шума, экономическая инфраструктура, трудовая занятость и др.), инженерно-технические (энергосбережение, материалоемкость, обращение с отходами и т.д.) и экологические (экологическая емкость, репродуктивная способность территории, биоразнообразие и др.) показатели [3].

Параметры устойчивости: площадь угодий, природная продуктивность пашни, неоднородность почвенного покрова, ландшафтные условия производства, сумма активных температур, содержание гумуса, запасы продуктивной влаги и др.¹

При оценке экологической устойчивости окружающей среды в Волгоградской области применяются следующие критерии: загрязнение атмосферного воздуха и поверхности вод, использование земель, антропогенная нагрузка [4]. Степень экологической устойчивости районов ранжированы таким образом: устойчивые (0,94–1,00), относительно устойчивые (0,88–0,94), среднеустойчивые (0,65–0,88) и неустойчивые (0–0,65) [4].

¹ Евтушкова Е.П., Брянцева Д.И. Оценка экологической устойчивости земель сельскохозяйственного назначения Сорокинского района Тюменской области. В: Перспективные разработки и прорывные технологии в АПК: сб. материалов нац. науч.-практ. конф. Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья; 2020. С. 18–25. <https://elibrary.ru/becshg>

При определении экологической устойчивости агроландшафтов рассматриваются два подхода: с применением интегрального показателя – коэффициента экологической стабилизации, а также с учетом оптимальной структуры угодий, теоретически установленной и проверенной на практике для каждой конкретной агроландшафтной зоны. Главным фактором, стабилизирующим экологическое состояние агроландшафтных территорий в пределах лесостепной зоны севера Приволжской возвышенности, предложено считать степень залесенности [5].

Разработана система показателей оценки экологической устойчивости сельских территорий, приведен пример формирования интенсивных машинных технологий производства животноводческой продукции для свиноводческого комплекса [6]. Предложенная система показателей позволяет определить состояние атмосферы и спрогнозировать его изменение.

В отрасли машиностроения при оценке стабильности механической обработки применяют коэффициент вариации v_x [7], представляющий собой отношение среднего квадратического отклонения σ_x параметра x к его среднему значению \bar{x} :

$$v_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}.$$

При $v_x \leq 0,170$ (высокая однородность параметра) v_x принадлежит интервалу $0,170-0,333$ (удовлетворительная однородность параметра). Технологический процесс считается стабильным. При $v_x > 0,333$ (неоднородность параметра) технологический процесс считается нестабильным [7].

Экологическая оценка сельскохозяйственных земель в Казахстане, проведенная с применением геоинформационной системы-технологий и цифровых карт-схем, включила расчет коэффициентов стабильности и антропогенной нагрузки [8]. Полученные результаты свидетельствуют о нерациональном использовании земельного фонда и его высокой антропогенной нагрузке. При этом процессы эрозии и дефляции почвы, несбалансированность соотношения сельскохозяйственных угодий делают территорию экологически нестабильной.

Оценке технологической устойчивости сельскохозяйственных агрегатов посвящена работа ученых Санкт-Петербургского государственного аграрного университета [9]. Под технологической устойчивостью процесса ученые понимают вероятность P_n того, что время t функционирования процесса не превышает время T_n :

$$P_n(t) = P\left\{P_{\Delta} \geq |P_{\Delta}|_{\text{доп}}; T_n \geq t\right\},$$

где T_n – время, когда оцениваемый показатель превышает допускаемый предел $|P_{\Delta}|_{\text{доп}}$; P_{Δ} – относительная длительность нахождения оценочного показателя в поле заданного допуска.

Точность (или устойчивость) технологического процесса показывает, какая часть поля допускаемой зоны изменения оценочного показателя покрывается ее рассеянием. При этом коэффициент устойчивости (точности) процесса относительно номинального значения K_u определяется по формуле²:

² Статистический анализ погрешностей механической обработки методом больших выборок: методические указания по выполнению практической работы. Сост. Е. И. Яцун; ЮЗГУ. Курск; 2017. 26 с.

$$K_u = \frac{d}{X_n},$$

где d – погрешность показателя процесса; X_n – номинальное значение параметра.

Коэффициент устойчивости (точности) процесса относительно поля допуска определяется из выражения³:

$$K_u = \frac{\sigma}{D_n}, \quad (1)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение показателя; D_n – поле допуска показателя.

Коэффициент стабильности процесса характеризует постоянство распределения вероятностей его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне⁴. Для определения коэффициента стабильности технологического процесса K_c используют формулу:

$$K_c = \frac{K_p(t_2)}{K_p(t_1)},$$

где $K_p(t_2)$ – показатель рассеяния за период времени t_2 ; $K_p(t_1)$ – показатель рассеяния за период времени t_1 .

Изучению процессов технологической устойчивости и устойчивого функционирования машинотракторных агрегатов (МТА) посвящены работы отечественных ученых [9; 10]. Предложена оценка энергетических свойств трактора при криволинейном движении по затрате работы на единицу пути – по величине удельных энергетических затрат E_{ud} , определяемых по формуле [10]:

$$E_{ud} = \frac{M \cdot \varphi}{S},$$

где M – ведущий момент двигателя, Н м; φ – угол поворота двигателя в окружном направлении на пройденном пути S (м), рад.

Выявлено, что наиболее эффективными критериями для оценки управляемости и устойчивости МТА являются следующие: удельные энергетические затраты на совершение поворота E_{ud} и максимальные ширина X_{\max} и высота Y_{\max} поворотной полосы [10].

Повышение устойчивости технологических процессов является актуальной задачей и в сфере возделывания сельскохозяйственных культур. В настоящее время накоплен богатый фактический материал, свидетельствующий о том, что уровень видового разнообразия микробного сообщества почвы можно рассматривать в качестве одного из наиболее важных критериев устойчивости основных экологических функций почвы. В качестве эталона устойчивой почвенной системы взята целинная дерново-подзолистая почва под лесом, отличающаяся

³ Евтушкова Е.П., Брянцева Д.И. Оценка экологической устойчивости земель сельскохозяйственного назначения Сорокинского района Тюменской области. С. 18–25. <https://elibrary.ru/becshg>

⁴ ОКСТУ 0016 Р 50-601-20-91. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования). М.: Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации (ВНИИС) Госстандарта России; 1991. 31 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293795/4293795181.pdf> (дата обращения: 21.02.2025).

максимальными показателями гумусированности и хорошо выраженной зернисто-комковатой структурой [11].

Алтайскими учеными изложены результаты исследований по оценке землепользования в аграрном секторе Алтайского края как основы повышения его устойчивости. Дана оценка природно-ресурсному потенциалу и экологическому состоянию территории. Выявлено, что особенности ландшафтов и ресурсный потенциал исследуемой территории неустойчивы, а аграрное землепользование должно базироваться на системе почвозащитных мероприятий, направленных на уменьшение эрозионных процессов (дефляция), почти повсеместно проявляющихся на сельскохозяйственных угодьях [12].

Оценка развития аграрного производства за последние 15 лет в Белгородской области показала положительные сдвиги и повышение его устойчивости. Устойчивое развитие региона предполагает комплексный подход в использовании всех ресурсов и повышение устойчивости развития каждого предприятия в отдельности. Устойчивость должна оцениваться не итогами отдельных лет, а динамикой развития за длительный отрезок времени, процессами воспроизводства ресурсов и финансовыми результатами [13].

В качестве системы показателей оценки устойчивости сельских территорий предлагается рассматривать⁵:

- показатели экономической стабильности развития сельских территорий (наличие ресурсов, уровень развития производственной инфраструктуры, состояние сельскохозяйственных рынков, финансово-инвестиционная устойчивость и др.);
- социальные показатели сельского развития, отражающие состояние демографии, доходов, образования, здравоохранения, культуры, безопасности в границах сельских территорий;
- показатели оценки экологического статуса сельской местности, касающиеся состояния атмосферы, земельных и водных ресурсов, биоразнообразия и др.;
- показатели уровня благоприятности институциональной среды (институциональная устойчивость, безопасность, привлекательность и др.).

Л. В. Кирейчевой представлено обоснование мелиорации как приема повышения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственного производства. Для этого выполнена оценка энергетического состояния агроэкосистемы и возможного продукционного потенциала при проведении мелиораций. В качестве основных критериальных параметров, определяющих энергетическое состояние системы, предложены: радиационный баланс, гидротермический режим почвы, агрохимические показатели, содержание и состав почвенного гумуса [14].

Оценке устойчивости агроэкосистемы на примере различных регионов страны посвящены работы отечественных ученых⁶ [15]. Так, в качестве основного

⁵ Головина С.Г. Оценка устойчивости развития сельских территорий. В: Аграрная наука – сельскому хозяйству: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф. Барнаул: Алтайский государственный аграрный университет; 2018. Т. 1. С. 100–101. <https://elibrary.ru/yubufh>

⁶ Семенова Т.В., Червяков А.В., Кабартай С.Х. Устойчивость агроэкосистемы нижней Кубани. В: Современный взгляд на будущее науки: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Казань: Аэтерна; 2017. Ч. 3. С. 35–37. <https://elibrary.ru/yhbchd>

интегрального показателя оценки устойчивости сельских территорий предлагается использовать эффективность применения питательных веществ на разных уровнях организации пространства [16]. Учеными установлено, что при увеличении в агросерой почве органического вещества улучшается экологическая функция: больше адсорбируется цинка и меди, что следует рассматривать как важный фактор устойчивости почвы и агроэкосистемы к загрязнению [17].

Большое количество исследований посвящены вопросу обеспечения финансовой устойчивости предприятий [18], инвестиционных процессов [19], обоснованию микробиологических критериев экологической устойчивости почв⁷, критериев оценки устойчивости и эффективности региональных агропродовольственных систем и др. С помощью нечетко-возможностного метода была синтезирована нечетко-возможностная модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов в количественном выражении, позволяющая сравнить состояние предприятий в исследуемый момент времени. Полученная модель может использоваться для поддержки принятия решений планирования, прогнозирования и выбора сценариев модернизации конкретных сельхозпредприятий [20].

Современное интенсивное сельское хозяйство представляет серьезную опасность для природы, поскольку приводит к утрате биоразнообразия, чрезвычайно высокому потреблению воды, способствует изменению климата из-за выбросов парниковых газов, значительно нарушает круговорот азота и фосфатов (N, P), ведет к нерациональному использованию азотных и фосфорных удобрений и ускоряет процессы эвтрофикации [21; 22]. Безопасность производимой продукции также ставится под угрозу.

Имеющиеся стандарты и методики по оценке устойчивости агросистем определяют приоритет экологических, социальных и экономических показателей. При этом существует значительный дисбаланс между экологической, социальной и экономической устойчивостью, но в большинстве оценок преобладающим показателем выступает экологическая устойчивость [23].

Как правило, устойчивость сельскохозяйственных систем оценивается с помощью индикаторов, которые являются аналитическими переменными, описывающими сложные системы. Каждый индикатор касается одного аспекта устойчивости (например, питательных веществ, пестицидов, энергии и др.), поэтому результат полной оценки обычно включает несколько значений индикатора. Эти значения часто рассчитываются отдельно, в то время как комплексная оценка более эффективна, так как позволяет получить результаты расчета сразу по ряду ключевых показателей устойчивости. Такой подход способствует прозрачной, надежной и количественной оценке устойчивости сельскохозяйственных систем. При необходимости его можно легко расширить, добавив другие показатели, и настроить, изменив пороговые значения и весовые коэффициенты показателей оценки [24].

⁷ Дегтярева И.А., Яппаров А.Х. Микробиологические критерии экологической устойчивости почв. В: Состояние и динамика плодородия почв в связи с продуктивностью земледелия: материалы IX Междунар. симпозиума НП «Содружество ученых агрохимиков и агроэкологов». Казань: Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова; 2017. С. 95–102. <https://elibrary.ru/yptmjy>

В разных системах оценки устойчивости предлагается большое количество показателей, что вызывает сомнения в обоснованности подходов и их полезности. Выбор показателей требует прозрачных и четко сформулированных процедур, обеспечивающих актуальность и обоснованность оценок устойчивости. Чтобы повысить прозрачность, актуальность и надежность оценок устойчивости, необходимо учитывать контекст оценки устойчивости, в том числе приоритетность критериев отбора показателей. Процесс разработки показателей и систем устойчивого развития может быть гораздо более важным фактором, определяющим их успех, чем окончательная форма инструментов оценки [25].

В основном исследователи склоняются к проведению комплексной оценки устойчивости и рассматривают совокупность критериев устойчивого развития, принимая во внимание прежде всего экологический (оценка качества почвы, эффективность использования энергии, управление отходами и их утилизация, видовое разнообразие), экономический (извлечение прибыли, стабильность производства) и социальный (качество жизни, развитие потенциала, условия занятости) показатели [26; 27].

В каждом отдельном случае следует исходить из неизбежности нахождения компромиссов между различными аспектами устойчивого развития, например, при оценке продовольственной системы [28] или агросистемы в целом. Решение таких задач проводится поэтапно: 1) анализ критериев, соответствующих индикаторам оценки, 2) обоснование эффективности оценки устойчивости для каждой категории показателей, 3) сравнение весомости той или иной категории показателей [29].

Социальная устойчивость при оценке агроэкосистемы или отдельно взятого сельскохозяйственного предприятия имеет немаловажное значение, поскольку наряду с экологическими и экономическими требованиями способствует обеспечению высокого уровня и качества жизни сельского населения [30].

Так, в ходе исследования с участием более 3 600 потребителей из шести стран (Бразилии, Китая, Индии, Мексики, Испании, США) производства продуктов питания на основе принципов устойчивости в сельском хозяйстве выяснилось, что большинство покупателей не до конца осознают важность устойчивого развития. Потребители склонны ассоциировать устойчивое сельскохозяйственное производство только с органическим сельским хозяйством и более высоким качеством продукции [31].

Для решения проблем устойчивости сельскохозяйственного производства в мире необходимы новые подходы в виде инициативных проектов, которые на основании определения показателей оценки как инструмента сертификации способствовали бы реализации концепции экологической устойчивости в растениеводстве. Примером такого решения может служить проект AGRiS, реализованный как пилотный в Неаполе (Италия) и включающий в себя методы устойчивого производства сельскохозяйственных культур, способствующие сохранению биоразнообразия (севооборот и смешанные посевы, внесение компоста в качестве удобрения, использование перерабатываемых субстратов, биологических средств защиты с вредителями) [32].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В связи с актуальностью проблемы повышения эффективности производства сельскохозяйственной продукции интенсивно развиваются новые методы, связанные с обеспечением устойчивости и стабильности агроэкосистемы и экологической безопасности технологий и технических средств в растениеводстве.

Объекты исследования

Агроэкосистема, ее компоненты, технологии производства сельскохозяйственной продукции, опубликованные результаты исследований по оценке устойчивости агроэкосистемы стали объектами настоящего исследования.

Агроэкосистема состоит из экономического, экологического, энергетического и социального компонентов. Устойчивость и стабильность агроэкосистемы зависит от соблюдения требований, отвечающим данным компонентам. Наиболее значимые параметры и показатели всех составляющих агроэкосистемы должны быть оптимизированы. Сбалансированный комплекс экономических, экологических, энергетических и социальных показателей оценки уточняет состояние агроэкологической системы и с помощью определенных индикаторов регулирует и обеспечивает ее устойчивость и стабильность.

В настоящем исследовании подробно рассмотрены вопросы оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве, тесно связанные с одним из компонентов агроэкосистемы – обеспечением экологической устойчивости.

Методы

Методика исследования опирается на анализ и обобщение опубликованных работ. Авторами был использован метод статистического моделирования процессов, который позволяет выявить их закономерность, определить и обоснованно выбрать весомые факторы, влияющие на устойчивость и стабильность технологических процессов.

Анализ литературы показал, что не существует общей универсальной методики комплексной оценки устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве, обладающей достаточной четкостью и наглядностью. В этой связи авторы в рамках настоящей работы решили восполнить этот пробел.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с множеством показателей оценки экологической безопасности технологических процессов и технических средств в растениеводстве при оценке их устойчивости целесообразно использовать интегральный критерий, учитывающий единичные показатели с учетом их весомых значений. Только при таком подходе возможна объективная оценка экологической устойчивости технологических процессов, технологий производства сельскохозяйственной продукции и агроэкосистемы в целом.

Основная цель оценки устойчивости технологических процессов – обоснование критериев устойчивости и определение критических значений экологических показателей, в пределах которых обеспечивается эколого-экономическая эффективность и качество конечной производимой продукции в агроэкосистеме.

Интегральный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов должен формировать запас устойчивости, в пределах которого технические средства будут функционировать надежно, не выходя из устойчивого режима.

Интегральный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов Q_i в общем случае можно выразить формулой:

$$Q_i = \sum_{i=1}^n K_i Z_i, \quad (2)$$

где K_i – частный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов; Z_i – коэффициент весомости частного критерия оценки экологической устойчивости технологических процессов, который отражает относительную значимость или важность конкретного фактора или показателя по сравнению с другими; n – число частных критериев оценки технологических процессов.

Формула (2) позволяет определить интегральный критерий оценки экологической устойчивости с учетом различных критических показателей, оказывающих деградиционное воздействие технологических процессов на агроэкосистему.

Группа частных экологических критериев (показателей) описывает ограничения, накладываемые на технологический процесс. Применительно к комплексу технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву нами ранее были обоснованы и выбраны наиболее весомые показатели:

- давление движителей на почву (D_d , МПа);
- буксование движителей энергетического средства (B_d , %);
- доза внесения жидких органических удобрений (D_u , т/га);
- неравномерность внесения жидких органических удобрений (K_u , %);
- выбросы вредных веществ двигателями при сжигании топлива (B_b , г/га);
- выбросы аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений (B_{NH_3} , мг/м³).

С учетом данных показателей и выражения (2), применительно к оценке экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений, интегральный критерий оценки их экологической устойчивости можно записать в виде:

$$K_u^{ou} = (K_u^{D_d} \cdot Z_i^{D_d}) + (K_u^{B_d} \cdot Z_i^{B_d}) + (K_u^{D_u} \cdot Z_i^{D_u}) + (K_u^{K_u} \cdot Z_i^{K_u}) + (K_u^{B_b} \cdot Z_i^{B_b}) + (K_u^{B_{NH_3}} \cdot Z_i^{B_{NH_3}}), \quad (3)$$

где $K_u^{D_d}$ – частный критерий оценки устойчивости давления движителей на почву; $K_u^{B_d}$ – частный критерий оценки устойчивости буксования энергетического средства; $K_u^{D_u}$ – частный критерий оценки устойчивости дозы внесения жидких органических удобрений; $K_u^{K_u}$ – частный критерий оценки устойчивости неравномерности внесения жидких органических удобрений; $K_u^{B_b}$ – частный критерий оценки устойчивости выбросов вредных веществ двигателями при сжигании топлива; $K_u^{B_{NH_3}}$ – частный критерий оценки устойчивости выбросов аммиака с поверхности

поля после внесения жидких органических удобрений; $Z_i^{D_d}$ – коэффициент весо-
мости давления движителей на почву; $Z_i^{B_d}$ – коэффициент весо-
мости буксования движителей энергетического средства; $Z_i^{D_u}$ – коэффициент весо-
мости дозы внесения жидких органических удобрений; $Z_i^{K_u}$ – коэффициент весо-
мости неравномерности внесения жидких органических удобрений; $Z_i^{B_b}$ – коэффициент весо-
мости выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива; $Z_i^{B_{NH_3}}$ – коэффи-
циент весо-мости выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких
органических удобрений.

Весомость показателей экологической оценки была определена от степени их
влияния на плодородие почвы, диффузную нагрузку и выброс парниковых газов.

Частный критерий оценки устойчивости давления движителей на почву $K_u^{D_d}$
можно определить из выражения:

$$K_u^{D_d} = \left| \frac{D_d^* - D_d^f}{D_d^*} \right|, \quad (4)$$

где D_d^* – допустимое значение давления движителей на почву, МПа; D_d^f – фак-
тическое среднее значение давления движителей на почву, МПа.

Частный критерий оценки устойчивости буксования энергетического сред-
ства $K_u^{B_d}$ можно вычислить из зависимости:

$$K_u^{B_d} = \left| \frac{B_d^* - B_d^f}{B_d^*} \right|, \quad (5)$$

где B_d^* – допустимое (оптимальное) значение буксования движителей энергетиче-
ского средства, %; B_d^f – фактическое среднее значение буксования движителей
энергетического средства, %.

Частный критерий оценки устойчивости дозы внесения жидких органических
удобрений $K_u^{D_u}$ определяется из равенства:

$$K_u^{D_u} = \left| \frac{D_u^* - D_u^f}{D_u^*} \right|, \quad (6)$$

где D_u^* – оптимальная доза внесения жидких органических удобрений, т/га;
 D_u^f – фактическое среднее значение дозы внесения жидких органических удоб-
рений, т/га.

Частный критерий оценки устойчивости неравномерности внесения жидких
органических удобрений $K_u^{K_u}$ определяется из выражения:

$$K_u^{K_u} = \left| \frac{K_u^* - K_u^f}{K_u^*} \right|, \quad (7)$$

где K_u^* – оптимальное (допустимое) значение коэффициента неравномерности
внесения жидких органических удобрений, %; K_u^f – фактическое среднее значе-
ние коэффициента неравномерности внесения жидких органических удобрений.

Частный критерий оценки устойчивости выбросов вредных веществ двигателями при сжигании топлива $K_u^{B_b}$ можно определить так:

$$K_u^{B_b} = \left| \frac{B_b^* - B_b^f}{B_b^*} \right|, \quad (8)$$

где B_b^* – допустимое значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива, г/га; B_b^f – фактическое среднее значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива, г/га.

Частный критерий оценки устойчивости выброса аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений $K_u^{B_{NH_3}}$ вычисляется из выражения:

$$K_u^{B_{NH_3}} = \left| \frac{B_{NH_3}^* - B_{NH_3}^f}{B_{NH_3}^*} \right|, \quad (9)$$

где $B_{NH_3}^*$ – допустимое значение выброса аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений, мг/м³; $B_{NH_3}^f$ – фактическое среднее значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений, мг/м³.

Коэффициент весомости $Z_i^{D_d}$, $Z_i^{D_d}$, $Z_i^{D_d}$, $Z_i^{K_u}$, $Z_i^{B_b}$ и $Z_i^{B_{NH_3}}$ показателей оценки экологической безопасности технологических процессов можно определить расчетно-эмпирическим методом. Достоинство расчетно-эмпирического метода состоит в объективности, сопоставимости и воспроизводимости полученных результатов оценки.

Коэффициент весомости показателей оценки экологической безопасности технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву Z_i при использовании расчетно-эмпирического метода определяется по формуле:

$$Z_i = \frac{\Delta x_i}{\sum_1^n \Delta x_i^n},$$

где Δx_i – среднее значение отклонения конкретного показателя от оптимального или допускаемого диапазона, %; $\sum_1^n \Delta x_i^n$ – сумма отклонений всех показателей оценки, %.

Среднее значение отклонения конкретного показателя от оптимального (допускаемого диапазона) Δx_i можно вычислить из выражения:

$$\Delta x_i = \left| \frac{x_i^f - x_i^*}{x_i^*} \right| \cdot 100\%,$$

где x_i^f – фактическое значение показателя оценки экологической безопасности, установленное экспериментально; x_i^* – оптимальное (допускаемое) значение показателя оценки экологической безопасности.

В формулах (4)–(9) допустимый диапазон изменения значения (табл. 1) показателей оценки экологической безопасности технологических процессов

$D_d^*, B_d^*, D_u^*, K_u^*, B_b^*$ и $B_{NH_3}^*$ регламентируются соответствующими нормативными документами.

Таблица 1

Table 1

Допустимые значения показателей оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву

Acceptable values of indicators for assessing the environmental sustainability of technological processes for transporting and applying liquid organic fertilizers to the soil

№	Наименование показателей / Name of indicators	Обозначение / Designation	Допустимое значение / Acceptable value
1	2	3	4
1	Давление движителей на почву / Pressure of propellers on the ground	D_d , МПа / MPa	Не более 80–110 МПа (или 0,8–1,1 кг/см ²) ⁸ / No more than 80–110 MPa (or 0.8–1.1 kg/cm ²)
2	Буксование движителей энергетического средства / Slippage of the propulsion units of the power vehicle	B_d , %	Движителей гусеничных и колесных тракторов с двумя и четырьмя ведущими колесами ⁹ должно быть не более 3, 14 и 16 % соответственно / The number of crawler and wheeled tractors with two and four driving wheels ¹ should not exceed 3, 14 and 16%, respectively.
3	Доза внесения жидких органических удобрений / Application rate of liquid organic fertilizers	D_u , т/га / t/ha	Устанавливается агрохимической службой ¹⁰ / It is established by the agrochemical service
4	Неравномерность внесения жидких органических удобрений / Uneven application of liquid organic fertilizers	K_u , %	Неравномерность высева удобрений ¹¹ или их смесей не должна превышать ±15 %, а для разбрасывателей ±25 % (по ширине внесения) и ±10 % по ходу движения машинотракторного агрегата. Отклонение от средней фактической дозы внесения удобрений не должно выходить за пределы ±10 % / Unevenness in the seeding of fertilizers or their mixtures should not exceed ±15%, and for spreaders ±25% (along the application width) and ±10% along the direction of travel of the machine-tractor unit. Deviation from the average actual dose of fertilizer application should not exceed ±10%.
5	Выбросы вредных веществ двигателями при сжигании топлива / Emissions of harmful substances from engines when burning fuel	B_b , г/га / g/ha	≤ 57 г при сгорании 1 кг дизельного топлива ¹² / ≤ 57 g when burning 1 kg of diesel fuel

⁸ ГОСТ Р 58655-2019. Техника сельскохозяйственная мобильная. Нормы воздействия движителей на почву. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169432> (дата обращения: 21.02.2025).

⁹ Гапич Д.С., Токарев В.И., Панчишкин А.П. Технологическая адаптация тракторов в составе почвообрабатывающих агрегатов: моногр. Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН; 2024. 156 с.

¹⁰ Шеуджен А.Х., Громова Л.И., Онищенко Л.М. Методы расчета доз удобрений: учеб. пособие. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет; 2010. 61 с.

¹¹ Саакян Д.Н. Контроль качества механизированных работ в полеводстве. М.: Колос; 1973. 264 с.; Дворниченко С.В., Бабаченко С.В., Коробской С.А., Пономаренко Н.В. Обеспечение равномерности высева минеральных удобрений путем совершенствования конструкции высевающего аппарата. *Активная честолобная интеллектуальная молодежь сельскому хозяйству*. 2019;(1):45–48. <https://elibrary.ru/htiiky>

¹² ГОСТ 17.2.2.02-98. Охрана природы. Атмосфера. Нормы и методы определения дымности отработавших газов дизелей, тракторов и самоходных сельскохозяйственных машин. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012788> (дата обращения: 21.02.2025); Альферович В.В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. Анализ состава отработавших газов. Минск: БНТУ; 2016. Ч. 1. 54 с.

Окончание табл. 1 / End table 1

1	2	3	4
6	Выбросы аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений / Ammonia emissions from the field surface after application of liquid organic fertilizers	B_{NH_3} , мг/м ³ / mg/m ³	При длительном нахождении аммиака в воздухе концентрация для сельскохозяйственных культур не должна превышать 75 мкг/м ³ (или 0,075 мг/м ³), а при продолжительности воздействия не более суток – 350 мкг/м ³ (или 0,350 мг/м ³) [33] / If ammonia is present in the air for a long time, the concentration for agricultural crops should not exceed 75 µg/m ³ (or 0.075 mg/m ³), and if the duration of exposure is no more than 24 hours – 350 µg/m ³ (or 0.350 mg/m ³) [33]

С использованием выражений (3)–(9) и таблицы 1 были определены значения частных и интегрального критериев оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета коэффициента весомости показателей и интегрального критерия оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву расчетно-эмпирическим методом
Results of calculating the weighting coefficient of indicators and the integral criterion for assessing the environmental sustainability of technological processes for transporting and applying liquid organic fertilizers to the soil using the calculation-empirical method

Значение показателя / Value of the indicator	D_d , МПа (кг/см ²) / МПа (kg/cm ²)	B_d , %	D_u , т/га / t/ha	K_u , %	B_b , г/га / g/ha	B_{NH_3} , мкг/м ³ / µg/m ³
Оптимальное значение или допустимый диапазон изменения / Optimal value or acceptable range of variation	100	14	2	±25	57·6 = 342 г / g	≤ 350
Фактическое значение / Actual value	110	16	2	±26	400	400
Δx_i	10	2	0	1	58	50
Δx_p , %	10	14,2900	0	4	16,960	14,2800
$\sum_1^n \Delta x_i^n$, %				59,5300		
Z_i	0,1680	0,2400	0	0,0670	0,2850	0,2400
$\sum Z_i$				1		
Значения частных критериев / Values of private criteria						
Значения K_i / Values K_i	0,1000	0,1430	0	0,0400	0,1700	0,1430
K_{iZ_i}	0,0168	0,0343	0	0,0026	0,0484	0,0343
Значение (интегрального) обобщенного критерия оценки устойчивости технологических процессов / The value of the (integral) generalized criterion for assessing the stability of technological processes				$K_u^{ou} = 0,136$		

Интегральный критерий оценки устойчивости зависит от того, насколько велика доля показателей экологической оценки, для которых показатели качества технологического процесса находятся в поле допуска.

Интегральный критерий оценки устойчивости характеризует уровень настройки технологического процесса. Интегральный критерий устойчивости характеризует различие между фактическим и оптимальным уровнем настройки процесса. Чем ближе интегральный критерий устойчивости к нулю, тем ближе уровень настройки технологического процесса к оптимальному.

Интегральный критерий оценки устойчивости позволяет оценить стабильность технологического процесса. При $K_u^{ou} = 0$ технологический процесс считается экологически устойчивым, так как все показатели оценки его экологической безопасности находятся в пределах допустимых значений.

Из-за вероятностного характера внешних возмущающих воздействий, таких как рельеф местности, профиль поверхности поля, влажность, твердость почвы, глубина обработки почвы и др., показатели оценки технологических процессов не остаются постоянными и колеблются в широких пределах. Из этого следует, что на практике технологические процессы не могут быть все время устойчивыми на 100 %, т. е. $K_u^{ou} \neq 0$.

Установленный K_u^{ou} должен быть достаточным для обеспечения нормального протекания технологических процессов, без ухудшения показателей оценки их экономической, технологической, энергетической и экологической эффективности.

Анализ литературы показал, что при ранжировании авторы используют одну из характеристик рассеяния оценочных показателей оценки процессов, входящих в критерий K_u^{ou} . При случайном характере изменения параметров и показателей наиболее наглядной характеристикой их рассеяния является коэффициент их вариации v_x , которая определяется отношением среднего квадратического отклонения σ_x параметра (или показателя) к его среднему значению \bar{x} [7].

В зависимости от характера изменения параметров и показателей их отклонение от заданного значения может быть односторонним или двухсторонним. Исследуемым нами показателям (табл. 2) характерно одностороннее изменение. Так как рассматриваемые показатели вероятностные, дифференциация интегрального критерия оценки устойчивости K_u^{ou} должна производиться по мере его рассеяния.

Дифференциация позволяет разработать шкалу оценки и ранжировать технологические процессы по степени их экологической устойчивости. В математической статистике принято считать, что если мера рассеяния показателя (или параметра) $< 0,1$ (или 10 %), то его разброс считается незначительным. Если мера рассеяния показателя изменяется от 0,1 до 0,2, то его разброс относительно заданного значения считается средним. При мере рассеяния показателя от 0,2 до 0,3 степень рассеяния считается значительной.

С учетом сказанного и формул (3)–(10) диапазоны изменения интегрального критерия, в том числе и частных критериев, можно дифференцировать следующим образом (табл. 3).

**Шкала оценки технологических процессов по значениям интегрального критерия
оценки K_u^{ou} их экологической устойчивости**

**Scale for assessing technological processes based on the values K_u^{ou} of the integral criterion
for assessing their environmental sustainability**

Класс экологической устойчивости / Environmental sustainability class	Значения критерия K_u^{ou} / Criterion value K_u^{ou}	Степень экологической устойчивости технологического процесса / The degree of environmental sustainability of the technological process
I	0–0,111	Устойчивый / Stable
II	0,112–0,222	Среднеустойчивый / Medium-resistant
III	0,223–0,333	Неустойчивый / Unstable
IV	> 0,333	Высокая энтропия / High entropy

Результаты расчетов частных и интегральных критериев оценки, полученные расчетно-эмпирическим методом (табл. 2), показывают, что технологические процессы транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву являются экологически среднеустойчивыми, так как $K_u^{ou} = 0,136$.

При изменении значения критерия K_u^{ou} в пределах от 0,222 до 0,333 технологический процесс является неустойчивым, так как при этом наблюдается значительное отклонение показателей оценки от допустимых их значений.

При $K_u^{ou} \geq 0,333$ наблюдается высокая энтропия, что является закономерным результатом отсутствия согласованности в выполнении технологических процессов, порядка и точности их выполнения. Это в конечном итоге приводит к разрушению технологии.

Стабильность технологического процесса – это свойство сохранять во времени постоянно характеристики распределения показателей экологической оценки.

В соответствии с ОКСТУ 0016 Р 50-601-20-91 и ГОСТ Р 50779.44-2001¹³ результатом оценки стабильности должно быть одно из следующих состояний процесса:

- стабилен и по разбросу и по положению среднего арифметического;
- стабилен по разбросу, но нестабилен по положению среднего арифметического;
- нестабилен по разбросу.

Стабильность технологического процесса предлагаем оценить по критерию δ_{st}^{TP} , который определяется по значениям степени неравномерности экологических показателей оценки процесса в зависимости от времени их измерения, по формуле:

¹³ ОКСТУ 0016 Р 50-601-20-91. Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования).

$$\delta_{st}^{TP} = \frac{\delta_{D_d}(t_2) + \delta_{B_d}(t_2) + \delta_{D_u}(t_2) + \delta_{K_u}(t_2) + \delta_{B_b}(t_2) + \delta_{B_{NH_3}}(t_2)}{\delta_{D_d}(t_1) + \delta_{B_d}(t_1) + \delta_{D_u}(t_1) + \delta_{K_u}(t_1) + \delta_{B_b}(t_1) + \delta_{B_{NH_3}}(t_1)}, \quad (10)$$

где $\delta_{D_d}(t_1) = \frac{D_d^{\max}(t_1) - D_d^{\min}(t_1)}{D_d^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности давления движителей трактора на почву за период времени t_1 ; $\delta_{B_d}(t_1) = \frac{B_d^{\max}(t_1) - B_d^{\min}(t_1)}{B_d^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $\delta_{D_u}(t_1) = \frac{D_u^{\max}(t_1) - D_u^{\min}(t_1)}{D_u^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $\delta_{K_u}(t_1) = \frac{K_u^{\max}(t_1) - K_u^{\min}(t_1)}{K_u^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $\delta_{B_b}(t_1) = \frac{B_b^{\max}(t_1) - B_b^{\min}(t_1)}{B_b^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $\delta_{B_{NH_3}}(t_1) = \frac{B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_1) - B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_1)}{B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_1)}$ – степень неравномерности выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $\delta_{D_d}(t_2) = \frac{D_d^{\max}(t_2) - D_d^{\min}(t_2)}{D_d^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности давления движителей трактора на почву за период времени t_2 ; $\delta_{B_d}(t_2) = \frac{B_d^{\max}(t_2) - B_d^{\min}(t_2)}{B_d^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности буксования движителей трактора за период времени t_2 ; $\delta_{D_u}(t_2) = \frac{D_u^{\max}(t_2) - D_u^{\min}(t_2)}{D_u^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_2 ; $\delta_{K_u}(t_2) = \frac{K_u^{\max}(t_2) - K_u^{\min}(t_2)}{K_u^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_2 ; $\delta_{B_b}(t_2) = \frac{B_b^{\max}(t_2) - B_b^{\min}(t_2)}{B_b^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_2 ; $\delta_{B_{NH_3}}(t_2) = \frac{B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_2) - B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_2)}{B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_2)}$ – степень неравномерности выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_2 ; $D_d^{\max}(t_1)$ – максимальное значение давления движителей на почву за период времени t_1 ; $D_d^{\min}(t_1)$ – минимальное значение давления движителей на почвы за период времени t_1 ; $D_d^{sp}(t_1)$ – среднее значение давления движителей

на почвы за период времени t_1 ; $B_d^{\max}(t_1)$ – максимальное значение буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $B_d^{\min}(t_1)$ – минимальное значение буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $B_d^{sp}(t_1)$ – среднее значение буксования движителей трактора за период времени t_1 ; $D_u^{\max}(t_1)$ – максимальное значение дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $D_u^{\min}(t_1)$ – минимальное значение дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $D_u^{sp}(t_1)$ – среднее значение дозы внесения органических удобрений в почву за период времени t_1 ; $K_u^{\max}(t_1)$ – максимальное значение степени неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $K_u^{\min}(t_1)$ – минимальное значение степени неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $K_u^{sp}(t_1)$ – среднее значение степени неравномерности коэффициента стабильности внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $B_b^{\max}(t_1)$ – максимальное значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $B_b^{\min}(t_1)$ – минимальное значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $B_b^{sp}(t_1)$ – среднее значение выброса вредных веществ двигателями при сжигании топлива за период времени t_1 ; $B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_1)$ – максимальное значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_1)$ – минимальное значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_1)$ – среднее значение выбросов аммиака с поверхности поля после внесения жидких органических удобрений за период времени t_1 ; $D_d^{\max}(t_2)$, $B_d^{\max}(t_2)$, $D_u^{\max}(t_2)$, $K_u^{\max}(t_2)$, $B_b^{\max}(t_2)$, $B_{B_{NH_3}}^{\max}(t_2)$ – соответственно максимальные значения исследуемых показателей за период времени t_2 ; $D_d^{\min}(t_2)$, $B_d^{\min}(t_2)$, $D_u^{\min}(t_2)$, $K_u^{\min}(t_2)$, $B_b^{\min}(t_2)$, $B_{B_{NH_3}}^{\min}(t_2)$ – соответственно минимальные значения исследуемых показателей за период времени t_2 ; $D_d^{sp}(t_2)$, $B_d^{sp}(t_2)$, $D_u^{sp}(t_2)$, $K_u^{sp}(t_2)$, $B_b^{sp}(t_2)$, $B_{B_{NH_3}}^{sp}(t_2)$ – соответственно средние значения исследуемых показателей за период времени t_2 .

Результаты расчета критерия $Z_i^{D_d}$ и оценки стабильности технологического процесса внесения жидких органических удобрений в почву приведены в таблице 4.

Таблица 4
Table 4

Результаты расчета критерия Z_{i_d} и оценки стабильности технологического процесса
внесения жидких органических удобрений в почву
Results of calculation of the criterion Z_{i_d} and assessment of the stability of the technological
process of introducing liquid organic fertilizers into the soil

Значение показателя / Value of the indicator	D_d , МПа (кг/см ²) / МПа (kg/cm ²)	B_d , %	D_u , т/га / t/ha	K_u , %	B_b , г/га / g/ha	$\Delta x_i = \left \frac{x_i^f - x_i^*}{x_i^*} \right \cdot 100\%$, мкг/м ³ / µg/m ³
Оптимальный или допустимый диапазон изменения / Optimal or acceptable range of variation	100	14	2	±25	57·6 = 342 г	≤ 350
Фактическое среднее / Actual average	110	16	2	±25	400	400
Максимальное за период времени t_1 / Maximum for time period t_1	125	18	2,120	±26	450	450
Минимальное за период времени t_1 / Minimum for time period t_1	95	14	1,880	±24	350	350
$\delta_i(t_1)$	0,273	0,250	0,120	0,080	0,250	0,250
$\sum \delta_i(t_1)$				1,223		
Максимальное за период времени t_2 / Maximum for the period of time t_2	115	16	2,120	±26	420	450
Минимальное за период времени t_2 / Minimum for the period of time t_2	95	14	1,880	±24	340	350
$\delta_i(t_2)$	0,181	0,125	0,120	0,080	0,200	0,250
$\sum \delta_i(t_2)$				0,956		
δ_{st}^{TP}				0,782		

Результаты расчетов частных и интегральных критериев оценки, полученные расчетно-эмпирическим методом (табл. 2), показывают, что технологические процессы транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву являются экологически среднеустойчивыми, так как $K_u^{ou} = 0,136$.

При изменении значения критерия K_u^{ou} в пределах от 0,222 до 0,333 технологический процесс является неустойчивым, так как при этом наблюдается значительное отклонение показателей оценки от допустимых их значений.

При $K_u^{ou} \geq 0,333$ наблюдается высокая энтропия, т. е. отсутствие согласованности в выполнении технологических процессов, порядка и точности их выполнения, что в конечном итоге приводит к разрушению технологии.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в своем большинстве существующие антропогенные воздействия в растениеводстве несут в себе отрицательное влияние на окружающую среду, при этом имеют целенаправленный характер, т. е. осуществляются сознательно для повышения эффективности отрасли. В частности, это приводит к снижению устойчивости и стабильности технологических процессов агротехнологий и агроэкосистемы при производстве сельскохозяйственной продукции.

В настоящее время практически невозможно произвести оценку процессов по уровню их неблагоприятного влияния на среду на основе существующих методов, не учитывающих номенклатуру обоснованных показателей, зональные требования и условия возделывания культур. В этом случае появляется необходимость применения комплексного подхода, который позволит учесть и рассчитать наиболее весомые показатели устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве на основе предложенных критериев, и в ближайшем будущем использовать их в качестве базиса при разработке алгоритмов и цифровых технологий принятия решений для повышения экологической безопасности агроэкосистемы.

Изложенный в статье подход, порядок расчета и оценки экологической устойчивости и стабильности технологических процессов позволяет выработать управленческие решения, направленные на гармоничное эколого-экономико-социальное развитие региона.

Разработан и предложен интегральный критерий оценки экологической устойчивости технологических процессов, который должен формировать запас устойчивости, в пределах которого технологические процессы и соответствующие технические средства будут функционировать надежно, не выходя из устойчивого режима.

Интегральный критерий оценки включает в себя частные критерии, каждый из которых в отдельности позволяет оценить устойчивость определенного экологического показателя оценки процесса.

Применительно к комплексу технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву выбраны наиболее весомые показатели, такие как буксование и давление движителей на почву, доза и неравномерность внесения удобрений, выбросы вредных веществ двигателями при сжигании топлива и аммиака с поверхности поля после внесения удобрений.

Приведены результаты расчета коэффициента весомости показателей и интегрального критерия оценки экологической устойчивости технологических процессов транспортировки и внесения жидких органических удобрений в почву.

Обоснована шкала оценки технологических процессов по значениям интегрального критерия оценки их экологической устойчивости. Согласно предложенной шкале технологические процессы подразделены на устойчивые, среднеустойчивые, неустойчивые и с высокой энтропией (отсутствие согласованности, порядка и точности выполнения).

Для оценки стабильности технологических процессов разработан обобщенный критерий, который определяется по значениям степени неравномерности изменения показателей экологической оценки процессов в зависимости от времени их измерения.

Предложенный подход для определения интегрального критерия оценки экологической устойчивости (3) и стабильности (10) можно использовать при оценке других технологических процессов. При этом показатели оценки экологической устойчивости и стабильности могут быть другими и должны быть научно обоснованы.

Представленную методику в дальнейшем можно использовать при разработке компьютерной программы для автоматизации расчета и оценки устойчивости и стабильности технологических процессов в растениеводстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мацнева Е.А., Магарил Е.Р. Оценка критериев экологической безопасности для определения уровня устойчивости промышленного предприятия. *Экология и промышленность России*. 2013;(2):54–56. <https://elibrary.ru/punxwv>
2. Адам А.М., Лаптев Н.И., Конорева Ю.Б. Оценка экологической устойчивости развития регионов Сибирского федерального округа. *Теоретические и прикладные аспекты современной науки*. 2015;(8-2):95–97. <https://elibrary.ru/tlqfnp>
3. Коршаков Ф.Н., Жук П.М. Оценка экологической устойчивости сельских населенных мест: состояние вопроса, методология. *Архитектура и современные информационные технологии*. 2021;(3):247–262. <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2021-3-247-262>
4. Шувалова О.А. Оценка экологической устойчивости окружающей среды Волгоградской области. *Проблемы региональной экологии*. 2012(4):31–36. <https://elibrary.ru/pilyht>
5. Юртаев А.А. Агроландшафтные исследования: теория и практика. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки*. 2011;(15):217–221. <https://elibrary.ru/orqrap>
6. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Обломкова Н.С. Методика оценки экологической устойчивости сельских территорий. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018;(3):164–175. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10070>
7. Чигиринский Ю.Л., Евтюнин А.В., Харламов В.О. Количественная оценка стабильности процессов механической обработки. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2021;(1):41–44. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-1-248-41-44>
8. Татаринцев В.Л., Инкаров Д.С., Макенова С.К., Унышева Н.К. Экологическая оценка аграрного землепользования с применением геоинформационная система-технологий. *Вестник науки Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина*. 2023;(2):22–31. <https://elibrary.ru/lrximi>

9. Смелик В.А., Гафаров А.А. Критерии оценки технологической устойчивости сельскохозяйственных агрегатов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2007;(4):33–34. <https://elibrary.ru/hzqbwx>
10. Воронов С.А., Непочатов А.В., Киселев И.А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2011;(1):50–62. <https://elibrary.ru/oiewin>
11. Терещенко Н.Н., Бубина А.Б. Микробиологические критерии экологической устойчивости почвы и эффективности почвозащитных технологий. *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2009;(3):42–62. <https://elibrary.ru/laieor>
12. Бунин А.А., Лисовская Ю.С., Татаринцев В.Л., Татаринцев Л.М., Шостак М.М. Агроэкологическая оценка аграрного землепользования как основа повышения его устойчивости. *Вестник КрасГАУ*. 2021;(4):80–86. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Самодурова М.Ф., Хрючкина Е.А. Оценка устойчивости развития сельскохозяйственного производства в регионе. *Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права*. 2015;(4):112–119. <https://elibrary.ru/vineiz>
14. Кирейчева Л.В. Сельскохозяйственная мелиорация как прием повышения продуктивности и устойчивости агропроизводства. *Агрохимический вестник*. 2022;(5):40–44. <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-009>
15. Алферов А.А., Чернова Л.С. Устойчивость агроэкосистемы при применении удобрений и биопрепаратов. *Российская сельскохозяйственная наука*. 2019;(3):35–37. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019335-37>
16. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Козлова Н.П., Обломкова Н.С. Система показателей машинных технологий для достижения экологической устойчивости сельских территорий при производстве животноводческой продукции. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018;(3):156–164. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10069>
17. Головина Н.А., Федорова Е.В., Кодиров А.А. Устойчивость агросерой почвы к загрязнению тяжелыми металлами. *Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева*. 2015;(1):75–79. <https://elibrary.ru/ychpzz>
18. Базарова М.У. Критерии и принципы формирования учетно-аналитической системы обеспечения финансовой устойчивости предприятия. *Актуальные вопросы современной науки*. 2013;(27):245–253. <https://elibrary.ru/rgslxt>
19. Трошин А.С. Критерии развития и устойчивости инвестиционных процессов. *АПК: экономика, управление*. 2011;(1):60–63. <https://elibrary.ru/nbkszr>
20. Васильев Э.В., Спесивцев А.В., Шалавина Е.В., Спесивцев В.А. Математическая модель оценки экологической устойчивости свиноводческих комплексов на основе экспертных знаний. *АгроЭкоИнженерия*. 2022;(3):82–97. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-82-96>
21. Джаббаров Н.И., Савельев А.П., Добринов А.В., Захаров А.М., Жуйков И.И. Моделирование и прогнозирование выноса биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий в зависимости от агрофизических свойств почвы. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(1):101–114. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>
22. Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В., Савельев А.П. Моделирование и оценка уровня плодородия почвы. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(3):407–423. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>
23. Konefal J., de Olde E.M., Hatanaka M., Oosterveer P.J.M. Signs of Agricultural Sustainability: A Global Assessment of Sustainability Governance Initiatives and their Indicators in Crop Farming. *Agricultural Systems*. 2023;208:103658. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103658>
24. Castoldi N., Bechini L. Integrated Sustainability Assessment of Cropping Systems with Agro-Ecological and Economic Indicators in Northern Italy. *European Journal of Agronomy*. 2010;32(1):59–72. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.02.003>

25. de Olde E.M., Moller H., Marchand F., McDowell R.W., MacLeod C.J., Sautier M. и др. When Experts Disagree: The Need to Rethink Indicator Selection for Assessing Sustainability of Agriculture. *Environment, Development and Sustainability*. 2017;19:1327–1342. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9803-x>
26. Anam M.S.H., Sulaiman A., Othman A.K., Jamaludin N.F. Review of Sustainability Criteria for Paddy Farming in Malaysia Based on Environmental, Economic and Social Dimensions. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*. 2025;9(1):1344–1362. <https://doi.org/10.47772/IJRISS.2025.9010113>
27. Bachev H. Socio-Economic and Environmental Sustainability of Bulgarian Farms. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2017;3(2):5–21. <https://doi.org/10.51599/are.2017.03.02.01>
28. Béné C., Oosterveer P., Lamotte L., Brouwer I.D., de Haan S., Prager S.D. и др. When Food Systems Meet Sustainability – Current Narratives and Implications for Actions. *World Development*. 2019;113:116–130. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.011>
29. Bonisoli L., Galdeano-Gómez E., Piedra-Muñoz L. Deconstruction: the Qualitative Methodology for the Analysis of Sustainability Assessment Tools of Agri-System. *MethodsX*. 2018;5:635–638. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.06.003>
30. Hale J., Legun K., Campbell H., Carolan M. Social Sustainability Indicators as Performance. *Geoforum*. 2019;103:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.03.008>
31. Sánchez-Bravo P., Chambers V.E., Noguera-Artiaga L., Sendra E., Chambers I.V.E., Carbonell-Barrachina Á.A. Consumer Understanding of Sustainability Concept in Agricultural Products. *Food Quality and Preference*. 2021;89:104136. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104136>
32. Amitrano C., Rossitti M., Waller R., Iovane M., El-Naggar N., Modarelli G.C. и др. AGRiS: Agriculture, Growth and Regeneration Inspired by Sustainability. *Acta Horticulturae*. 2022. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1345.66>
33. Гриднев П.И., Гриднева Т.Т., Шведов А.А. Эмиссия аммиака и ее последствия для окружающей среды. *Вестник ВНИИМЖ*. 2018;(1):42–49. <https://elibrary.ru/ytestj>

REFERENCES

1. Matsneva E.A., Magaril E.R. [Evaluation of Environmental Safety Criteria for Determining the Sustainability Level of an Industrial Enterprise]. *Ecology and Industry of Russia*. 2013;(2):54–56. (In Russ.) <https://elibrary.ru/punxvv>
2. Adam A.M., Laptev N.I., Konoreva Yu.B. [Assessment of Environmental Sustainability of the Development of Regions of the Siberian Federal District]. *Teoreticheskie i Prikladnye Aspekty Sovremennoj Nauki*. 2015;(8-2):95–97. (In Russ.) <https://elibrary.ru/tlqfnp>
3. Korshakov F.N., Zhuk P.M. Rural Settlements Environmental Sustainability Assessment: State of the Problem, Methodology. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2021;(3):247–262. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/1998-4839-2021-3-247-262>
4. Shuvalova O.A. [Assessment of the Environmental Sustainability of the Environment of the Volgograd Region]. *Problemy Regionalnoj Ekologii*. 2012(4):31–36. (In Russ.) <https://elibrary.ru/pilyht>
5. Yurtaev A.A. Agrolandscape Research: Theory and Practice. *Nauchnye Vedomosti Belgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye Nauki*. 2011;(15):217–221. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/orqrap>
6. Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasilev E.V., Oblomkova N.S. Method to Assess Environmental Sustainability of Rural Areas. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2018;(3):164–175. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10070>
7. Tchigirinsky Ju.L., Evtynin A.V., Kharlamov V.O. Mechanical Treatment's Stability Quantitative Assessment. *Izvestiya Volgogradskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2021;(1):41–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2021-1-248-41-44>

8. Tatarintsev V.L., Inkarov D.S., Makenova S.K., Unysheva N.K. Environmental Assessment of Agricultural Land use Using Geoinformation System Technologies. *Herald of Science of S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University*. 2023;(2):22–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/lrximi>
9. Smelik V.A., Gafarov A.A. [Criteria for Assessing the Technological Sustainability of Agricultural Units]. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2007;(4):33–34. (In Russ.) <https://elibrary.ru/hzqbwX>
10. Voronov S.A., Nepochatov A.V., Kiselev I.A. [Criteria for Assessing the Stability of the Milling Process of Flexible Parts]. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2011;(1):50–62. (In Russ.) <https://elibrary.ru/oiewin>
11. Tereshchenko N.N., Bubina A.B. Microbiological Criteria of Soil Ecological Stability and Efficiency of Soil-Protecting Technologies. *Tomsk State University Journal of Biology*. 2009;(3):42–62. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/laieor>
12. Bunin A.A., Lisovskaya Yu.S., Tatarintsev V.L., Shostak M.M. Agroecological Assessment of Agrarian Land use as a Basis to Increase its Sustainability. *Bulletin of KSAU*. 2021;(4):80–86. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2021-4-80-86>
13. Samodurova M.F., Khryuchkina E.A. [Assessment of the Sustainability of Agricultural Production Development in the Region]. *Vestnik Belgorodskogo Universiteta Kooperatsii, Ekonomiki i Prava*. 2015;(4):112–119. (In Russ.) <https://elibrary.ru/vineiz>
14. Kireycheva L.V. Agricultural Reclaim as a Method of Increasing Productivity and Sustainability of Agricultural Production. *Agrochemical Herald*. 2022;(5):40–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-009>
15. Alferov A.A., Chernova L.S. Sustainability of the Agroecosystem in the Application of Fertilizers and Biopreparations. *Rossiiskaia Selskokhoziaistvennaia Nauka*. 2019;(3):35–37. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019335-37>
16. Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Kozlova N.P., Oblomkova N.S. System of Indicators of Machine-Based Technologies Contributing to Environmental Sustainability of Rural Areas in Livestock Production. *Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva*. 2018;(3):156–164. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10069>
17. Golovina N.A., Fedorova E.V., Kodirov A.A. Agro-Gray Soil Tolerance to Heavy Metals Pollution. *Vestnik Soveta Molodyh Uchenyh Ryazanskogo Gosudarstvennogo Agrotekhnologicheskogo Universiteta Imeni P. A. Kostycheva*. 2015;(1):75–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ygchpz>
18. Bazarova M.U. [Criteria and Principles of Formation of the Accounting and Analytical System of Ensuring the Financial Stability of the Enterprise]. *Aktualnye Voprosy Sovremennoj Nauki*. 2013;(27):245–253. (In Russ.) <https://elibrary.ru/rgslxt>
19. Troshin A.S. [Criteria for Development and Stability of Investment Processes]. *AIC: Economics, Management*. 2011;(1):60–63. (In Russ.) <https://elibrary.ru/nbksrz>
20. Vasiliev E.V., Spesivtsev A.V., Shalavina E.V., Spesivtsev V.A. Mathematical Model for Environmental Sustainability Assessment of Pig-Breeding Complexes Based on Expert Knowledge. *AgroEcoEngineering*. 2022;(3):82–97. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-3112-82-96>
21. Jabborov N.I., Savelyev A.P., Dobrinov A.V., Zakharov A.M., Zhuikov I.I. Modeling and Forecasting the Removal of Biogenic Elements from Agricultural Lands Depending on the Soil Agrophysical Properties. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):101–114. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.101-114>
22. Dzhabborov N.I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V., Saveliev A.P. Modeling and Assessment of Soil Fertility Level. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):407–423. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.407-423>
23. Konefal J., de Olde E.M., Hatanaka M., Oosterveer P.J.M. Signs of Agricultural Sustainability: A Global Assessment of Sustainability Governance Initiatives and their Indicators in Crop Farming. *Agricultural Systems*. 2023;208:103658. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103658>

24. Castoldi N., Bechini L. Integrated Sustainability Assessment of Cropping Systems with Agro-Ecological and Economic Indicators in Northern Italy. *European Journal of Agronomy*. 2010;32(1):59–72. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.02.003>
25. de Olde E.M., Moller H., Marchand F., McDowell R.W., MacLeod C.J., Sautier M., et al. When Experts Disagree: The Need to Rethink Indicator Selection for Assessing Sustainability of Agriculture. *Environment, Development and Sustainability*. 2017;19:1327–1342. <https://doi.org/10.1007/s10668-016-9803-x>
26. Anam M.S.H., Sulaiman A., Othman A.K., Jamaludin N.F. Review of Sustainability Criteria for Paddy Farming in Malaysia Based on Environmental, Economic and Social Dimensions. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*. 2025;9(1):1344–1362. <https://doi.org/10.47772/IJRIS.2025.9010113>
27. Bachev H. Socio-Economic and Environmental Sustainability of Bulgarian Farms. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2017;3(2):5–21. <https://doi.org/10.51599/are.2017.03.02.01>
28. Béné C., Oosterveer P., Lamotte L., Brouwer I.D., de Haan S., Prager S.D., et al. When Food Systems Meet Sustainability – Current Narratives and Implications for Actions. *World Development*. 2019;113:116–130. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.011>
29. Bonisoli L., Galdeano-Gómez E., Piedra-Muñoz L. Deconstruction: the Qualitative Methodology for the Analysis of Sustainability Assessment Tools of Agri-System. *MethodsX*. 2018;5:635–638. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.06.003>
30. Hale J., Legun K., Campbell H., Carolan M. Social Sustainability Indicators as Performance. *Geoforum*. 2019;103:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2019.03.008>
31. Sánchez-Bravo P., Chambers V.E., Noguera-Artiaga L., Sendra E., Chambers IVE., Carbonell-Barrachina Á.A. Consumer Understanding of Sustainability Concept in Agricultural Products. *Food Quality and Preference*. 2021;89:104136. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104136>
32. Amitrano C., Rossitti M., Waller R., Iovane M., El-Naggar N., Modarelli G.C., et al. AGRiS: Agriculture, Growth and Regeneration Inspired by Sustainability. *Acta Horticulturae*. 2022. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1345.66>
33. Gridnev P.I., Gridneva T.T., Shvedov A.A. The Ammonia Emission and its Consequences for the Environment. *Journal of VNIIMZH*. 2018;(1):42–49. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/ytestj>

Об авторах:

Джаббаров Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Добринов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Вклад авторов:

Н. И. Джаббаров – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; формулирование идеи исследования, целей и задач, применение статистических, математических, вычислительных и других формальных методов для анализа данных исследования.

А. В. Добринов – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: написание черновика рукописи, включая его перевод на иностранный язык.

А. П. Савельев – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов и сбор данных; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 30.06.2025; поступила после рецензирования 02.08.2025;
принята к публикации 16.08.2025*

About the authors:

Nozim I. Jabborov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Leading Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tiarlevo, St. Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Anatoliy P. Savelyev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: AAB-2078-2021, tbsap52@mail.ru

Authors contribution:

N. I. Dzhabborov – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the study ideas, goals and objectives, applying the statistical, mathematical, computational and other formal methods for the analysis of the study data.

A. V. Dobrinov – conducting experiments and collecting data, preparing the manuscript: writing a manuscript draft, including its translation into the English language.

A. P. Savelyev – conducting the study, preparing the manuscript: visualizing the study results and the data obtained.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 30.06.2025; revised 02.08.2025; accepted 16.08.2025