

## Анализ и решения экологических проблем в животноводстве



**Александр Юрьевич Брюханов,**  
доктор технических наук,  
член-корреспондент РАН,  
e-mail: sznii@yandex.ru;

**Владимир Дмитриевич Попов,**  
доктор технических наук, академик РАН,  
главный научный сотрудник, e-mail: popov\_vd@mail.ru;  
**Эдуард Вадимович Васильев,**  
кандидат технических наук, ведущий научный  
сотрудник, e-mail: sznii6@yandex.ru;  
**Екатерина Викторовна Шалавина,**  
кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник, e-mail: shalavinaev@mail.ru;  
**Роман Алексеевич Уваров,**  
кандидат технических наук, старший научный  
сотрудник, e-mail: puo-24@mail.ru

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Реферат.** Интенсификация сельскохозяйственного производства привела к нарушению циклов биогенных веществ в агроэкосистемах. В животноводстве одной из ключевых проблем стала низкая степень использования органических удобрений на основе навоза и помета. *(Цель исследования)* Обосновать основные принципы оценки экологической устойчивости агроэкосистем и разработать инженерные методы обеспечения экологической безопасности в животноводстве. *(Материалы и методы)* Для решения задач агроэкологической оценки, выбора эффективных технологий и создания интеллектуализированных систем использовали показатели: удельную плотность животных (преимущественно для макрооценки); баланс питательных веществ (разницу между количеством азота в органических удобрениях и экологически безопасным потреблением); потери азота при утилизации органических отходов животноводства; эффективность внедрения наилучших доступных технологий. *(Результаты и обсуждение)*. Выявили, что по первым двум показателям три района Ленинградской области относятся к территориям с чрезмерным риском для окружающей среды, один район – с высоким риском, пять – с допустимым и восемь районов – с незначительным риском. Для решения проблем в районах с чрезмерной и высокой нагрузкой провели оценку по третьему и четвертому показателям. Исследовали технические решения и выбрали наилучшие доступные технологии для снижения нагрузки на окружающую среду. Показали преимущества основных технических решений в области утилизации органических отходов животноводства – биоферментации и внесения жидких органических удобрений. Определили, что биоферментационные установки позволяют сократить выбросы загрязняющих газов в 2 раза и более, ускорить процесс переработки в 60 раз. Для работы с жидкой органикой разработали интеллектуализированные машины с низкоэмиссионными рабочими органами, позволяющие снизить потери азота при внесении до 50 процентов. Разработали цифровую систему для моделирования сценариев технологического развития и их влияния на экологическую устойчивость агроэкосистем. *(Выводы)* Сформулировали принципы системного анализа экологической устойчивости агроэкосистем с предложением конкретных технических и оптимизационных решений для животноводства.

**Ключевые слова:** агроэкосистема, экологическая устойчивость, экологическая безопасность, животноводство, питательные вещества, машинные технологии, интеллектуальные системы.

**Для цитирования:** Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А. Анализ и решения экологических проблем в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №4. С. 48-55. DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-4-48-55.

## Analysis and Solutions to Environmental Problems in Livestock Farming

**Aleksandr Yu. Bryukhanov,**  
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian  
Academy of Sciences, e-mail: sznii@yandex.ru;  
**Vladimir D. Popov,**  
Dr.Sc.(Eng.), member of the Russian Academy  
of Sciences, chief researcher, e-mail: popov\_vd@mail.ru;

**Eduard V. Vasilev,**  
Ph.D.(Eng.), leading researcher, e-mail: sznii6@yandex.ru;  
**Ekaterina V. Shalavina,**  
Ph.D.(Eng.), senior researcher, e-mail: shalavinaev@mail.ru;  
**Roman A. Uvarov,**  
Ph.D.(Eng.), senior researcher, e-mail: puo-24@mail.ru



Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The intensification of agricultural production has led to the disruption of nutrient cycles in agroecosystems. In livestock farming, one of the key problems is the low degree of using secondary resources (organic fertilizers based on manure and manure). (*Research purpose*) To substantiate the basic principles of assessing the agroecosystem environmental sustainability and to develop engineering methods for ensuring environmental safety in livestock farming. (*Materials and methods*) To solve the problems of agroecological assessment, effective technology choice and intelligent system creation, the following indicators were used: 1. specific density of animals (mainly for macro-assessment); 2. nutrient balance (the difference in the amount of nitrogen available in the formed organic fertilizers with environmentally safe consumption); 3. nitrogen losses during the disposal of organic waste from livestock farming; 4. the effectiveness of implementing the best available techniques (BAT). (*Results and discussion*) Using the assessment of indicators 1 and 2 in the case of the Leningrad region, it was revealed that 3 districts are classified as territories with an excessive risk to the environment, 1 district is classified as a territory with a high risk, 5 districts – with an acceptable risk, and 8 districts – with a low risk to the environment. To solve problems in areas with excessive and high load, we conducted an assessment on indicators 3 and 4, which allowed us to explore technical solutions and select the BAT to reduce the environmental burden. The obtained results showed that among the main technical solutions in the field of organic waste management of livestock farming are biofermentation and the introduction of liquid organic fertilizers. Biofermentation in special chambers can reduce emissions of polluting gases by more than 2 times, and speed up the processing process by more than 60 times. To work with liquid organic fertilizers, intelligent machines with low-emission working bodies have been developed to reduce nitrogen losses during application by up to 50 percent. To solve the problems of agricultural monitoring and engineering solution management, a digital system has been developed that allows to model scenarios of technological development and their impact on the agroecosystem environmental sustainability. (*Conclusions*) The results obtained allow us to systematically analyze the problems of agroecosystem environmental sustainability and propose specific technical and optimization solutions for livestock farming.

**Keywords:** agroecosystem, sustainability, livestock farming, nutrients, machine technology, intelligent systems.

**For citation:** Bryukhanov A.Yu., Popov V.D., Vasil'ev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A. Analiz i resheniya ekologicheskikh problem v zhivotnovodstve [Analysis and solutions to environmental problems in livestock farming]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. N4. 48-55 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2021-15-4-48-55.

Современные достижения аграрной науки, реализованные при поддержке специальных государственных программ в реальном производстве, позволили к 2020 г. достичь высокого уровня выполнения задач обеспечения жителей страны качественными продуктами питания в необходимых объемах и создать фундамент для дальнейшего роста и развития, в том числе экспортного потенциала. Животноводство – одно из приоритетных направлений развития сельскохозяйственного производства. К 2020 г. по ряду стратегически важных продуктов Россия вышла на уровень самообеспеченности и закрепила в первой десятке стран-лидеров производителей сельскохозяйственной продукции: самообеспеченность по свинине и мясу птицы – 100%, молоку – 84, яйцам – более 100%.

Сельское хозяйство развивается по интенсивным технологиям. Особенно ярко это проявляется в животноводстве и птицеводстве, где происходит концентрация поголовья на крупных фермах и комплексах. Это позволяет сократить издержки на обслуживание животных, но создает существенные экологические риски [1-3]. Интенсификация аграрного производства связана с целым рядом экологических проблем. Одна из них – низкая степень использования вторич-

ных ресурсов (органических удобрений на основе навоза и помета) [2-8].

В 2015-2020 гг. агропредприятия использовали не более 30% органики. Такой низкий уровень дестабилизирует агроэкосистемы, повышает диффузную нагрузку на водные объекты вблизи животноводческих комплексов: до 150 кг/га азота и до 20 кг/га фосфора [9, 10]. Отсутствие возврата органики в регионы, выращивающие растениеводческую продукцию и корма для животных, снижает плодородие почв. Нарушается производственный цикл, происходит неконтролируемое выделение в окружающую среду загрязняющих веществ [3-5]. С каждым десятилетием обостряется глобальная экологическая проблема, связанная с потеплением климата. Изменения климата создают для продовольственной безопасности и сельского хозяйства серьезные проблемы с точки зрения ожидаемого негативного воздействия на производительность, а также осуществления отраслевых мер по ограничению глобального потепления [11-13].

В складывающейся ситуации агроинженерная наука призвана разработать научные принципы создания сельскохозяйственных экосистем и управления их функционированием на основе высокоэффективных комплексов машин и оборудования, интеллекту-

альных технологий интенсивного и биологизированного производства сельхозпродукции, обеспечивающих экологическую безопасность.

**ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ** – обосновать основные принципы оценки экологической устойчивости агроэкосистем и разработать инженерные методы обеспечения экологической безопасности в животноводстве.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Мировой опыт в агроэкологических исследованиях свидетельствует о возможности использования ряда основных научных принципов создания устойчивых сельскохозяйственных экосистем [3-5]. В основе заложен главный принцип создания эффективного круговорота биогенных веществ с минимальным расходом внешних ресурсов, обеспечивающего производство сельхозпродукции необходимого объема и качества. Под круговоротом биогенных веществ в аграрном производстве подразумевается переход питательных веществ в замкнутом цикле производства продукции: почва – растения (продукция и корма) – животные (продукция и воспроизводство) – удобрения (преимущественно органические) – почва [14]. Для формализации данного принципа обоснован ряд агроэкологических показателей, которые могут выступать в качестве критериев оценки устойчивости агроэкосистем. К ним относятся удельная плотность животных (отношение условных голов к площади обрабатываемых земель), баланс питательных веществ, диффузная нагрузка на водосбор, уровень потерь питательных веществ, плодородие почвы и др. [15-17]. Можно использовать как отдельные показатели, так и их совокупность для комплексной оценки. Все они объединены круговоротом биогенных (питательных) веществ.

Для решения задач агроэкологической оценки, выбора эффективных технологий, создания интеллектуализированных систем в данной статье использованы показатели [1, 11, 14, 17, 18]:

- удельная плотность животных (преимущественно для макрооценки);
- баланс питательных веществ (разница количества азота, имеющегося в образуемых органических удобрениях с экологически безопасным потреблением);
- потери азота при утилизации органических отходов животноводства;
- эффективность внедрения наилучших доступных технологий (НДТ).

Первые два показателя привязывали к агроэкосистемам исходя из принципа деления по муниципальным районам, так как это позволяет оперативно и достоверно пользоваться данными официальной статистики для необходимых расчетов. Вторую пару допустимо использовать для оценки технологий в целом, а также для отдельных технологических операций и машин.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Исследования проведены на примере сельскохозяйственного производ-

ства Ленинградской области (рис. 1). Результаты оценки по балансу азота и плотности поголовья позволили выделить районы с различной степенью негативного воздействия на окружающую среду (ОС). Из 17 муниципальных районов 3 относятся к территориям с чрезмерным риском для ОС. На их территории удельная плотность животных превышает 3,1 усл. гол./га, что требует более детального анализа на уровне конкретных предприятий, используемых технологий и организационных решений. Один район отнесен к территории с высоким риском (1,6-3,0 усл. гол./га), 5 – с допустимым (1,1-1,6 усл. гол./га) и 8 районов – с незначительным риском для ОС (0,2-1,0 усл. гол./га). В районах с незначительным риском может возникать локальная проблема, связанная с потерей плодородия почв, о чем свидетельствуют отрицательные значения баланса азота [1, 14].

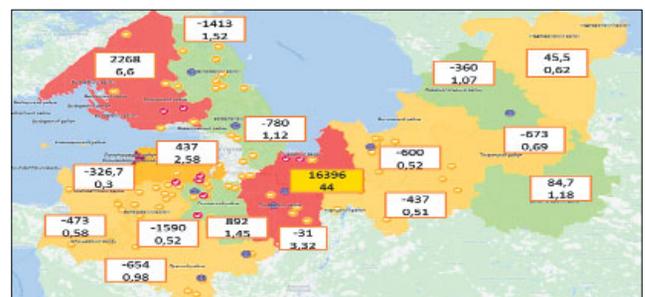


Рис. 1. Результаты агроэкологической оценки (на примере Ленинградской области): верхний показатель – баланс азота, т; нижний показатель – удельная плотность животных, усл. гол./га

Fig. 1. Results of the agroecological assessment (the case of Leningrad region): the upper indicator is nitrogen balance, t; the lower indicator is the specific density of animals, cond. head/ha

Для районов с чрезмерным риском для ОС характерен переизбыток биогенных элементов в составе органических отходов крупных животноводческих комплексов. В данном случае необходимо решение задач перераспределения нагрузки путем обоснования технологий утилизации и организации взаимосвязей с другими районами, имеющими потребность и резерв для приема питательных веществ в составе органических удобрений. При выборе технологий и конкретных машин следует учитывать потери азота при утилизации органических отходов животноводства и эффективность внедрения НДТ. В ранее проведенных исследованиях были обоснованы главные направления технико-технологической модернизации, позволяющие выбрать НДТ для конкретных производственных и природно-климатических условий [1].

К приоритетным машинным технологиям утилизации органических отходов с минимальным риском загрязнения ОС относятся биоферментация в установках закрытого типа и внесение органических удобрений машинами с низкоэмиссионными рабочими



органами [1]. В ИАЭП – филиале ФНАЦ ВИМ разработан типоразмер автоматизированных биоферментационных установок серии *BIOFERM* для переработки твердых органических отходов (таблица, рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид установки *BIOFERM 10.0*: а – 3D-модель; б – промышленный образец (изготовлен совместно с ООО «Научно-производственный центр «ОКАН»)

Fig. 2. Exterior view of the *BIOFERM 10.0* unit: а – 3D model; б – industrial design (manufactured jointly with OKAN Research and Production Center LLC)

Применение биоферментационных установок позволит в 2 раза сократить выбросы загрязняющих газов в процессе переработки навоза и помета и в 60 раз ускорить процесс превращения исходного сырья в высококачественный конечный продукт по сравнению с длительным выдерживанием. Сроки переработки при технологии длительного выдерживания в штабеле составляют 160-240 суток, а при использовании биоферментационных установок – 3 суток. Потери азота в составе газообразных выбросов в первом случае достигают 30-50% от исходного содержания, а во втором – не более 15%.

Изучение потерь азота при основных технологиях утилизации куриного помета для птицефабрики, рассчитанной на содержание 1 млн гол. птицы, показало возможность сокращения эмиссий до 353 т в год при использовании технологии ускоренной биоферментации (рис. 3).

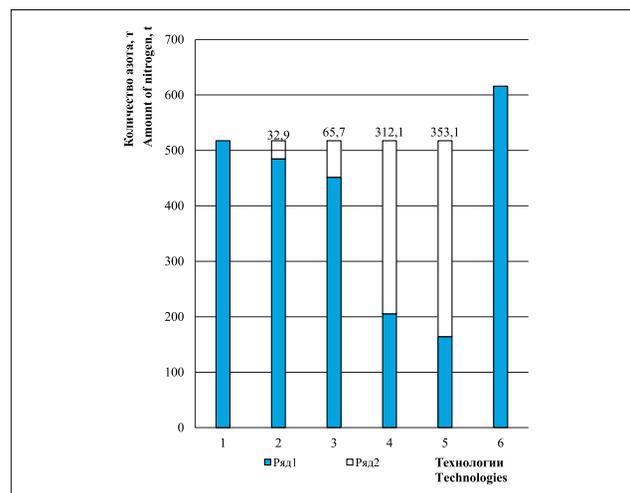


Рис. 3. Технологические потери азота при утилизации куриного помета: 1 – длительное хранение; 2 – пассивное компостирование; 3 – активное компостирование; 4 – камерная ферментация; 5 – барабанная ферментация; 6 – термическая сушка

Fig. 3. Technological nitrogen losses during the disposal of poultry manure: 1 – long-term storage; 2 – passive composting; 3 – active composting; 4 – chamber fermentation; 5 – drum fermentation; 6 – thermal drying

При работе с жидкими органическими удобрениями (ЖОУ) важной технологической операцией считается внесение их в почву. Использование неэффективных технологий и технических средств может привести к потере более 50% азота, в основном в виде газообразных выделений. Для решения данной проблемы разработано техническое задание на изготовление интеллектуализированных машин для транспортировки и внесения ЖОУ. Основными особенностями машин стали автоматизированная фиксация и

Основные характеристики биоферментационных установок серии <i>BIOFERM</i> Main characteristics of biofermentation plants of the <i>BIOFERM</i> series					
Модели Models	Производительность одного модуля, т/год Productivity of one module, t/year	Объем биореактора, м <sup>3</sup> Bioreactor volume, m <sup>3</sup>	Габаритные размеры Д×Ш×В, м Overall dimensions L×W×H, m	Удельное потребление электроэнергии, кВт·ч/т Specific electricity consumption, kWh/t	Ориентировочная стоимость установки, млн руб. Estimated cost of the installation, million rubles
BIOFERM 1.0	360	5,4	6×2×2	25,4	от 2
BIOFERM 2.5	900	13,5	7×2,4×2,4	13,4	от 5
BIOFERM 5.0	1800	27,0	9×2,8×2,8	9,8	от 8
BIOFERM 10.0	3600	54,0	14×3,5×3,5	8,4	от 15

управление следующими функциями:

- автоматический учет содержания питательных веществ в удобрении и адаптивный расчет дозы внесения (с учетом характеристик почвы и выращиваемой культуры);
- автоматическая регулировка дозы внесения в зависимости от скорости движения машины и контрол зон пропусков/перекрытия при внесении.

В 2020 г. при сотрудничестве с фирмой ООО «Агро-Маг» (официальным дилером *JOSKIN*, Бельгия) изготовлены две экспериментальные машины для внесения жидких органических удобрений (рис. 4). Эти машины должны обеспечить наилучшие значения показателя эффективности внедрения НДТ, который выражается в минимальной стоимости приведенных затрат на одну тонну сокращения эмиссий загрязняющих веществ (рис. 5).



Рис. 4. Интеллектуализированные машины для транспортировки и внесения жидких органических удобрений

Fig. 4. Intelligent machines for transporting and applying liquid organic fertilizers

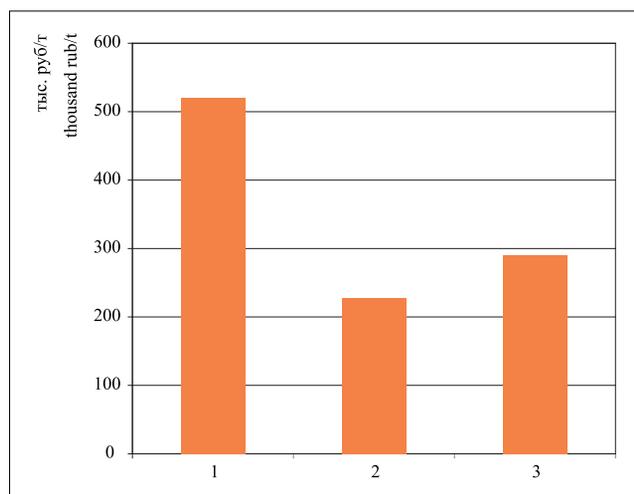


Рис. 5. Эффективность внедрения наилучших доступных технологий внесения жидких органических удобрений: 1 – внесение машиной с шланговой системой; 2 – внесение интеллектуализированной машиной с низкоэмиссионными рабочими органами; 3 – внутрпочвенное внесение без интеллектуализированной системы

Fig. 5. Efficiency of implementing the best available technologies for liquid organic fertilizer application: 1 – application by a machine with a hose system; 2 – application by an intellectualized machine with low-emission working bodies; 3 – subsoil application without intellectualized system

Промышленные образцы биоферментационной установки и машин для внесения ЖОУ изготовлены и поставлены для проведения производственных испытаний при поддержке проекта *EcoAgRAS*, реализуемого в рамках программы приграничного сотрудничества «Юго-Восточная Финляндия – Россия» на 2014-2020 гг.

В целом существует более 30 технологических вариантов утилизации органических отходов животноводства, которые могут обеспечить соответствующую эффективность в конкретных производственных и природно-климатических условиях.

Для достижения экологической устойчивости сельскохозяйственных экосистем необходимо создание комплексной системы агромониторинга, управления инженерными и организационными решениями. Такая система должна строиться на цифровых паспортах сельских территорий, алгоритмах сбора и обработки информации, моделях прогнозирования с учетом сценариев технологического развития и стратегий управления.

В 2021 г. ИАЭП – филиал ФНАЦ ВИМ, ООО «ЦИТ «Петройнт» и АО «НИО ЦИТ «Петрокомета» совместно с Комитетом по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области приступил к тестированию цифровой системы (компьютерной интерактивной программы) для мониторинга образования органики и ее эффективного использования [19]. Система позволяет оценивать текущую ситуацию и моделировать сценарии развития

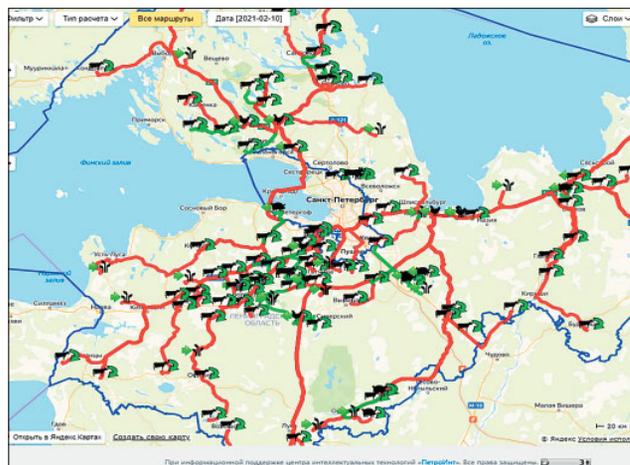


Рис. 6. Снимок экрана интерактивной программы мониторинга образования органических удобрений и их эффективного использования (стрелками указана возможность внутреннего потребления удобрений, красными линиями обозначены взаимосвязи сельхозпредприятий с учетом транспортной инфраструктуры)

Fig. 6. Screenshot of an interactive program for monitoring the formation of organic fertilizers and their effective use (the arrows indicate the possibility of domestic consumption of fertilizers, the red lines indicate the relationship of agricultural enterprises, taking into account the transport infrastructure)



и их влияние на экологическую устойчивость агроэкосистем. Алгоритм программы реализует принцип баланса питательных веществ и позволяет оптимизировать логистические межхозяйственные связи отдельных сельхозтоваропроизводителей с целью сбалансированного использования питательных веществ и достижения условий экологической устойчивости (рис. 6).

Программа позволяет формировать электронные паспорта по каждому сельхозпредприятию, району и всей области. Паспорта содержат подробную информацию о достижении оптимального баланса питательных веществ и необходимого для этого материально-технического и ресурсного обеспечения. В перспективе такую систему можно масштабировать для всех территориальных субъектов Российской Федерации с центральной координационной функцией, которую может выполнять Минсельхоз.

### Выводы

Для оценки и регулирования агроэкосистем применили ряд показателей: удельную плотность животных; баланс питательных веществ; потери азота при утилизации органических отходов животноводства; эффективность внедрения наилучших доступных технологий.

При оценке по первым двум показателям на примере Ленинградской области, выявили, что 3 района относятся к территориям с чрезмерным риском для окружающей среды, 1 район отнесен к территории с высоким риском, 5 – с допустимым и 8 районов – с незначительным риском. Для решения проблем в районах с чрезмерной и высокой нагрузкой целесообразно проводить оценку по третьему и четвертому показателям, позволяющим исследовать технические решения и подобрать наилучшие доступные техноло-

гии для снижения нагрузки на окружающую среду.

Показали, что применение биоферментационных установок позволит в 2 раза сократить выбросы загрязняющих газов в процессе переработки навоза и помета и в 60 раз ускорить процесс превращения исходного сырья в высококачественный конечный продукт по сравнению с длительным выдерживанием. Сроки переработки при технологии длительного выдерживания в штабеле составляют 160-240 суток, а при использовании биоферментационных установок – 3 суток. Потери азота в составе газообразных выбросов в первом случае достигают 30-50% от исходного содержания, а во втором – не более 15%.

Представили типоразмер биоферментационных установок производительностью одного модуля от 360 до 3600 т/год.

Определили, что использование интеллектуализированных машин для транспортировки и внесения ЖОУ с низкоэмиссионными рабочими органами позволит снизить потери азота при внесении до 50% относительно применяемых в настоящее время технических средств.

Разработали цифровую систему, для оценки текущей ситуации и моделирования сценария технологического развития и их влияния на экологическую устойчивость агроэкосистем. Алгоритм программы реализует принцип баланса питательных веществ и помогает оптимизировать межхозяйственные связи отдельных сельхозтоваропроизводителей с целью достижения условий экологической устойчивости. В перспективе такая система может быть масштабирована для всех территориальных субъектов Российской Федерации с центральной координационной функцией, которую может выполнять Минсельхоз.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., Shalavina E., Subbotin I., Lukin S. Environmental assessment of livestock farms in the context of BAT system introduction in Russia. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 246. 283-288.
2. Danilov-Danilyan V.I., Venitsianov E.V., Belyaev S.D. Some Problems of Reducing the Pollution of Water Bodies from Diffuse Sources. *Water Resources*. 2020. N47. 682-690.
3. Nainggolan D., Hasler B., Andersen H.E., Gyldenkarne S., Termansen M. Water Quality Management and Climate Change Mitigation: Cost-effectiveness of Joint Implementation in the Baltic Sea Region. *Ecological Economics*. 2018. Vol. 144. 12-26.
4. Kontsevoi G.R., Ermakov D.N., Rylova N.I., Leoshko V.P., Safonova M.F. Management accounting of agricultural production: improving planning and standardization of costs in the management information system. *Amazonia Investiga*. 2020. Vol. 9. N27. 284-293.
5. Ghimire S., Wang J., Fleck J.R. Integrated Crop-Livestock Systems for Nitrogen Management: A Multi-Scale Spatial Analysis. *Animals*. 2021. N11. 100.
6. Porter S.A., James D.E. Using a Spatially Explicit Approach to Assess the Contribution of Livestock Manure to Minnesota's Agricultural Nitrogen Budget. *Agronomy*. 2020. N10(4). 480.
7. Franzluebbers A., Hunt D., Telford G., et al. Integrated crop-livestock systems: lessons from New York, British Columbia, and the South-Eastern United States. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2021. N8(1). 81-96.
8. Schut A.G.T., Cooledge E.C., Moraine M., et al. Reintegration of crop-livestock systems in Europe: an overview. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2021. 8(1). 111-129.
9. Pozdynakov Sh.R., Briukhanov A.Yu., Kondratev S.A., Ignateva N.V., Shmakova M.V., Minakova E.A., Rasulova A.M., Oblomkova N.S., Vasilev E.V., Terekhov A.V. Perspectives of the reduction of nutrient export from river watersheds through the introduction of best available technologies for agricultural production: based on modeling results. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. N5. 771-784.

10. Kondratyev S.A., Ershova A.A., Ekholm P., Victorova N.V. Nutrient load from the Russian territory on the gulf of Finland. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12. N2. 77-87.
11. Kebede A.S., Nicholls R.J., Clarke D., Savin C., Harrison P.A. Integrated assessment of the food-water-land-ecosystems nexus in Europe: Implications for sustainability. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 768. 144461.
12. Bleischwitz R., Spataru C., VanDeveer S.D., et al. Resource nexus perspectives towards the United Nations Sustainable Development Goals. *Nat Sustain* 1. 2018. 737-743.
13. Kiryushin V.I. Ecological functions of landscapes. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. N1. 14-21.
14. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Обломкова Н.С. Показатели негативного воздействия на окружающую среду при производстве сельскохозяйственной продукции // *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2019. N2(99). С. 250-260.
15. Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. (Eds.) Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen; Centre for Ecology and Hydrology (CEH): Edinburgh, UK. 2014. 82.
16. Santonja G.G., Georgitzikis K., Scalet B.M., Montobbio P., Roudier S., Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs. Publications Office of the European Union: Luxembourg. 2017.
17. Субботин И.А., Васильев Э.В. Модель прогнозирования комплексного негативного воздействия технологий сельхозпроизводства на водные объекты // *Инженерные технологии и системы*. 2021. N31(2). С. 227-240.
18. Суханов П.А. Земля и почва, почва и земля – двуединый ресурс? // *Агрехимический вестник*. 2020. N3. С. 3-6.
19. Briukhanov A., Dorokhov A., Shalavina E., Trifanov A., Vorobyeva E., Vasilev E. Digital methods for agro-monitoring and nutrient load management in the Russian part of the Baltic sea catchment area. *IOP CONFERENCE SERIES: Earth and Environmental Science*. 2020. N578. 012011.

## REFERENCES

1. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., Shalavina E., Subbotin I., Lukin S. Environmental assessment of livestock farms in the context of BAT system introduction in Russia. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 246. 283-288 (In English).
2. Danilov-Danilyan V.I., Venitsianov, E.V., Belyaev S.D. Some Problems of Reducing the Pollution of Water Bodies from Diffuse Sources. *Water Resources*. 2020. N47. 682-690 (In English).
3. Nainggolan D., Hasler B., Andersen H.E., Gyldenkarne S., Termansen M. Water Quality Management and Climate Change Mitigation: Cost-effectiveness of Joint Implementation in the Baltic Sea Region. *Ecological Economics*. 2018. Vol. 144. 12-26 (In English).
4. Kontsevoi G.R., Ermakov D.N., Rylova N.I., Leoshko V.P., Safonova M.F. Management accounting of agricultural production: improving planning and standardization of costs in the management information system. *Amazonia Investiga*. 2020. Vol. 9. N27. 284-293 (In English).
5. Ghimire S., Wang J., Fleck J.R. Integrated Crop-Livestock Systems for Nitrogen Management: A Multi-Scale Spatial Analysis. *Animals*. 2021. N11. 100 (In English).
6. Porter S.A., James D.E. Using a Spatially Explicit Approach to Assess the Contribution of Livestock Manure to Minnesota's Agricultural Nitrogen Budget. *Agronomy*. 2020. N10(4). 480 (In English).
7. Franzluebbbers A., Hunt D., Telford G., et al. Integrated crop-livestock systems: lessons from New York, British Columbia, and the South-Eastern United States. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2021. N8(1). 81-96 (In English).
8. Schut A.G.T., Cooledge E.C., Moraine M., et al. Reintegration of crop-livestock systems in Europe: an overview. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*. 2021. 8(1). 111-129 (In English).
9. Pozdynakov Sh.R., Briukhanov A.Yu., Kondratev S.A., Ignateva N.V., Shmakova M.V., Minakova E.A., Rasulova A.M., Oblomkova N.S., Vasilev E.V., Terekhov A.V. Perspectives of the reduction of nutrient export from river watersheds through the introduction of best available technologies for agricultural production: based on modeling results. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. N5. 771-784 (In English).
10. Kondratyev S.A., Ershova A.A., Ekholm P., Victorova N.V. Nutrient load from the Russian territory on the gulf of Finland. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2019. Т. 12. N2. 77-87 (In English).
11. Kebede A.S., Nicholls R.J., Clarke D., Savin C., Harrison P.A. Integrated assessment of the food-water-land-ecosystems nexus in Europe: Implications for sustainability. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 768. 144461 (In English).
12. Bleischwitz R., Spataru C., VanDeveer S.D., et al. Resource nexus perspectives towards the United Nations Sustainable Development Goals. *Nat Sustain* 1. 2018. 737-743 (In English).
13. Kiryushin V.I. Ecological functions of landscapes. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51. N1. 14-21 (In English).
14. Bryukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasil'ev E.V., Oblomkova N.S. Pokazateli negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu pri proizvodstve sel'skokhozyaystvennoy produktsii [Indicators of ecological sustainability of rural areas with intensive livestock production]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva*. 2019. N2(99). 250-260 (In Russian).
15. Bittman S., Dedina M., Howard C.M., Oenema O., Sutton M.A. (Eds.) Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen; Centre for Ecology and Hydrology (CEH): Edinburgh, UK. 2014. 82 (In English).
16. Santonja G.G., Georgitzikis K., Scalet B.M., Montobbio P.,

Roudier S., Delgado Sancho L. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Intensive Rearing of Poultry or Pigs. Publications Office of the European Union: Luxembourg. 2017 (In English).

17. Subbotin I.A., Vasil'ev E.V. Model' prognozirovaniya kompleksnogo negativnogo vozdeystviya tekhnologiy sel'khozproduktstva na vodnye obekty [A Forecast Model of the Complex Negative Impact of Agricultural Production Technologies on Water Bodies]. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy*. 2021. N31(2). 227-240 (In Russian).

#### Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Заявленный вклад соавторов

Брюханов А.Ю. – разработка теоретических предпосылок исследований, доработка текста, формирование общих выводов.

Попов В.Д. – научное руководство, формулирование основных направлений исследования.

Васильев Э. В. – обоснование показателей экологических оценки агроэкосистем, технических требований на интеллектуализированные машины для транспортировки и внесения жидких органических удобрений, литературный анализ.

Шалавина Е.В. – разработка алгоритмов и баз данных для интерактивной программы мониторинга образования органических удобрений и их эффективного использования.

Уваров Р.А. – обоснование параметров и режимов работы биоферментационных установок для ускоренной переработки органических отходов животноводства.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

18. Sukhanov P.A. Zemlya i pochva, pochva i zemlya – dvuedinyy resurs? [The earth and soil, soil and the earth – a two-uniform resource?]. *Agrokhimicheskiy vestnik*. 2020. N3. 3-6 (In Russian).

19. Briukhanov A., Dorokhov A., Shalavina E., Trifanov A., Vorobyeva E., Vasilev E. Digital methods for agro-monitoring and nutrient load management in the Russian part of the Baltic sea catchment area. *IOP CONFERENCE SERIES: Earth and Environmental Science*. 2020. N578. 012011 (In English).

#### Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

#### Coauthors' contribution:

Bryukhanov A.Yu. – development of theoretical prerequisites for the research, the text revision, the formation of the general conclusions.

Popov V.D. – scientific leadership, the formulation of the research main directions

Vasil'ev E.V. – substantiation of agroecosystem ecological assessment indicators and technical requirements for intelligent machines for transportation and application of liquid organic fertilizers, literature analysis.

Shalavina E.V. – development of algorithms and databases for an interactive program for monitoring organic fertilizer formation and effective use.

Uvarov R.A. – substantiation of the parameters and operating modes of biofermentation plants for the accelerated processing of animal husbandry organic waste.

*All authors have read and approved the final manuscript.*

Статья поступила в редакцию  
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on  
The paper was accepted for publication on

11.08.2021  
02.11.2021