

УДК 63 : 502.17

МЕТОДИКА СБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИФфуЗНОГО СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ (НА ПРИМЕРЕ ВОДОСБОРНОГО БАССЕЙНА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА)

А. Ю. Брюханов¹, С. А. Кондратьев², Н. Н. Филатов³, Э. В. Васильев¹,
Н. С. Обломкова^{1*}

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Фильтровское ш., 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, Россия, 196634), *oblomkovans@gmail.com

² Институт озераведения РАН, СПб ФИЦ РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, Россия, 196105)

³ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Создана и опробована методика сбора информации для расчета диффузного выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий в водные объекты по модели ИАЭП в условиях отсутствия детальных сведений по отдельным сельхозпредприятиям применительно к условиям водосбора Онежского озера. Методика позволяет осуществлять получение комплексной информации о сельскохозяйственных объектах с учетом их воздействия на окружающую среду. В основе методики лежит использование пространственного анализа и ГИС-технологий для более точного расчета нагрузки с учетом характеристики сельскохозяйственной деятельности и местоположения относительно водных объектов. Это позволяет выполнить комплексный анализ в привязке к пространственным параметрам среды. Методика обеспечивает расчет выхода и состава навоза с учетом систем его хранения, переработки и внесения, а также оценку параметров миграции биогенных веществ в зависимости от расположения сельскохозяйственных угодий относительно водных объектов. По итогам анализа сельскохозяйственных объектов в ГИС с учетом общедоступных сведений определяется поголовье животных и птицы, выход навоза, а также количество навозохранилищ на рассматриваемом предприятии, что в итоге позволяет оценить средние нормы внесения азота и фосфора с органическими удобрениями. Предложенная методика реализована на водосборном бассейне Онежского озера с целью подготовки данных для расчета диффузной нагрузки азота и фосфора в 2010 и 2021 гг. Использование модели формирования сельскохозяйственной биогенной нагрузки ИАЭП позволило оценить и сравнить поступление азота и фосфора на водосбор Онежского озера в указанные периоды.

Ключевые слова: биогенная нагрузка; внесение удобрений; животноводческие предприятия; геоинформационная система; Онежское озеро

Для цитирования: Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Филатов Н. Н., Васильев Э. В., Обломкова Н. С. Методика сбора исходных данных для оценки диффузного сельскохозяйственного загрязнения водных объектов (на примере водосборного

**A. Yu. Briukhanov¹, S. A. Kondratyev², N. N. Filatov³, E. V. Vasilev¹, N. S. Oblomkova^{1*}.
METHODOLOGY FOR COLLECTING INITIAL DATA TO ASSESS DIFFUSE AGRICULTURAL
POLLUTION OF WATER BODIES (THE CASE OF THE LAKE ONEGO CATCHMENT)**

¹ Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM” (3 Fil'trovskoe St., 196634 Tyarlevo village, St. Petersburg, Russia), *oblomkovans@gmail.com

² Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (9 Sevastyanova St., 196105 St. Petersburg, Russia)

³ Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (50 Al. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

The article is aimed at developing and testing a methodology for collecting information to calculate the diffuse input of nitrogen and phosphorus from agricultural land to water bodies using the IEEP model due to the lack of detailed information on individual agricultural enterprises in relation to the conditions of the Lake Onego catchment. The methodology enables obtaining comprehensive information about agricultural objects, taking into account their impact on the environment. The methodology is based on the use of spatial analysis and GIS technologies to calculate the load more accurately, considering the characteristics of agricultural activities and distance to water bodies. Thus, one can perform a comprehensive analysis in relation to the spatial parameters of the environment. The methodology provides the calculation of the volume and composition of manure, considering systems for its storage, processing and application, as well as assessment of the nutrients migration parameters depending on the location of agricultural land. Based on the results of the agricultural objects analysis in the GIS, in view of available information, the number of animals and poultry, the production of manure, as well as the number of manure storage facilities at the enterprise, the average application rates of nitrogen and phosphorus with organic fertilizers are quantified. The proposed methodology was implemented in the Lake Onego catchment to prepare data for calculating the nitrogen and phosphorus diffuse load in 2010 and 2021. The IEEP methodology helped to assess and compare nutrient input from agriculture to the Lake Onego water objects in 2010 and 2021.

Keywords: nutrient input; fertilizer application; livestock enterprises; geographic information system; Lake Onego

For citation: Briukhanov A. Yu., Kondratyev S. A., Filatov N. N., Vasilev E. V., Oblomkova N. S. Methodology for collecting initial data to assess diffuse agricultural pollution of water bodies (the case of the Lake Onego catchment). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 2. P. 95–107. doi: 10.17076/lim1863

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 22-17-00193.

Введение

Антропогенное эвтрофирование – одна из важнейших экологических проблем пресноводных водоемов России [Антропогенное..., 1982]. Причиной служит интенсивная биогенная нагрузка антропогенного происхождения со стороны водосбора. При этом современная система мониторинга не позволяет выполнить адекватную оценку поступления азота и фосфора в реки, озера и водохранилища со стоком притоков ввиду малочисленности пунктов измерений

расходов воды и гидрохимических характеристик. Сельскохозяйственная деятельность на водосборе – один из основных источников поступления биогенных элементов в водные объекты.

При оценке воздействия на окружающую среду источники поступления примесей в реки, озера и водохранилища делятся на точечные и рассеянные (диффузные антропогенные + природные). Для оценки точечных источников в настоящее время разработано множество узлов контроля, датчиков, измерительных систем, что позволяет достаточно точно определять

количественный и качественный состав выделяемых в окружающую среду веществ. Оценка диффузного воздействия на окружающую среду представляет большую сложность, так как к диффузному воздействию относится совокупность рассеянных источников, оказывающих влияние на окружающую среду больших по площади и объему территорий, водных и воздушных бассейнов. В современном сельском хозяйстве интенсификация и наращивание объемов производства связаны с концентрацией поголовья животных и птицы на фермах, увеличением количества сильнодействующих средств подкормки и защиты растений на 1 га пашни, увеличением площадей пашни в регионах с благоприятными условиями для ведения растениеводства [Briukhanov et al., 2019].

К основным объектам сельскохозяйственного производства, оказывающим диффузное воздействие на окружающую среду, относятся: животноводческие и птицеводческие фермы, технологические процессы, выполняемые при обработке почв и выращивании растительных культур [Briukhanov et al., 2021]. Сельскохозяйственное предприятие можно рассмотреть в целом как агроэкосистему, взаимодействующую с компонентами окружающей среды и оказывающую на нее воздействие (преимущественно диффузное). Одним из ключевых условий для управления диффузным загрязнением является наличие системы с надежной и актуализированной информацией о его степени и тенденциях к изменению.

Для расчета диффузной нагрузки разработаны ряд российских и зарубежных моделей [Кондратьев, Шмакова, 2019; Applied..., 2019]. Наиболее широкую апробацию за последние 5 лет в нашей стране получил метод (модель) расчета диффузной нагрузки азота и фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности и потенциала ее снижения при использовании наилучших доступных технологий НДТ в сельском хозяйстве [Брюханов и др., 2016]. Метод разработан совместными усилиями специалистов ИАЭП и ИНОЗ РАН (далее – метод ИАЭП). Рассматриваются два источника поступления азота и фосфора – почва и удобрения (минеральные и органические). Одним из ключевых условий корректного применения методики расчета является качество исходных данных. Наличие возможности сбора и анализа полного комплекта актуальных сведений во многом определяет точность и достоверность результатов. В настоящее время ввиду отсутствия общедоступных сведений о деятельности отдельных сельскохозяйственных предприятий существует необходимость

создания метода сбора исходных данных на основе открытой информации без существенной потери точности расчета.

Цель данной работы – создание и апробация методики сбора информации для расчета диффузного выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий в водные объекты по методу (модели) ИАЭП в условиях отсутствия детальных сведений по отдельным сельскохозяйственным предприятиям применительно к условиям водосбора Онежского озера.

Объект исследования

Онежское озеро и его крупнейший приток Илекса–Водла является верхним звеном самой большой европейской озерно-речной системы Невы [Лозовик и др., 2016]. Озеро дренирует значительную территорию, разнообразную по геологическому строению, рельефу, орографии и гидрографии. Бассейн Онежского озера вытянут в широтном направлении и асимметричен. Озеро делит его на две неравные части – западную (64 %) и восточную (36 %), что определяет неравномерность времени добега воды для разных притоков (рис. 1).

В естественном состоянии озеро принимало сток с водосборного бассейна площадью 53 100 км². После строительства в 1953 г. на р. Свири Верхне-Свирской ГЭС озеро стало водохранилищем с водосборной площадью, равной 57 300 км². Около 70 % территории бассейна относится к Республике Карелия, остальная часть расположена в Ленинградской, Вологодской и Архангельской областях. Более половины бассейна занято водосборами трех главных притоков озера: рек Шуи (площадь водосбора 10,1 тыс. км²), Суны (7,7 тыс. км²), Водлы (13,7 тыс. км²). Вытекает из озера лишь одна река – Свирь, крупнейший приток Ладожского озера. Изучаемая территория относится к Европейской сельскохозяйственной провинции среднетаежной зоны холодного пояса, для которой характерны низкая биоклиматическая продуктивность и избыточное увлажнение. Сельскохозяйственное производство здесь сосредоточено в основном в южной части водосбора и представлено личными подсобными и фермерскими хозяйствами.

Материалы и методы

Согласно методу ИАЭП эмиссия азота и фосфора рассчитывается от площади сельскохозяйственных угодий, на которых осуществляется хозяйственная деятельность и которые имеют привязку к водотокам.

Порядок расчета диффузной нагрузки азота и фосфора на водосбор при ведении сельскохозяйственной деятельности определяется следующим выражением (1):

$$L_{agr} = \sum_i A_i (M_{soil} K_1 + (\alpha_1 M_{min} + \alpha_2 M_{org}) K_6) K_2 K_3 K_4 K_5 / 1000, \quad (1)$$

где L_{agr} – нагрузка, сформированная на полях сельхозпредприятий и поступившая в ближайший водоток (т/год); M_{soil} , M_{min} и M_{org} – содержание биогенного вещества в пахотном слое почвы, а также дозы внесения минеральных и органических удобрений на поля i -го сельхозпредприятия (кг/га); A_i – площадь угодий i -го сельхозпредприятия (га); α_1 и α_2 – коэффициенты попадания биогенных веществ в сток с учетом усвоения соответственно минеральных и органических удобрений сельхозкультурами; K_1 – коэффициент, характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почв; K_2 – коэффициент удаленности контура сельскохозяйственных угодий от гидрографической сети; K_3 – коэффициент, характеризующий тип почв (по происхождению); K_4 – коэффициент,

характеризующий механический состав почв; K_5 – коэффициент, учитывающий тип сельхозпредприятия и структуру сельхозугодий; K_6 – коэффициент соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям (НДТ).

Сбор информации, необходимой для выполнения расчетов по методу ИАЭП, представляет собой отдельную трудоемкую задачу, требующую квалифицированной экспертной оценки каждого конкретного объекта, опыта работы с базами данных и архивными материалами, высоким уровнем владения ГИС-технологиями и дешифрирования космических снимков. На рис. 2. приведено схематическое представление методики сбора и анализа данных, необходимых для оценки параметров метода (модели) ИАЭП.

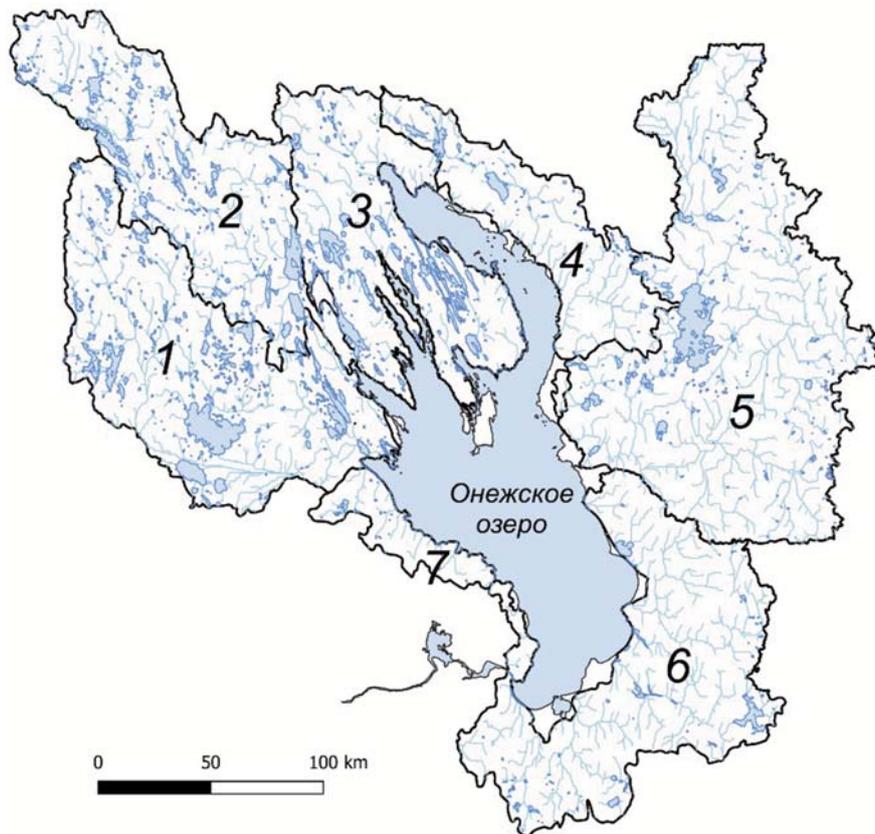


Рис. 1. Гидрографическая структура бассейна Онежского озера: водосборы рек Шуи (1) и Суны (2), Заонежье (3), водосборы восточных притоков (4), реки Водлы (5), южных (6) и западных притоков (7)

Fig. 1. Hydrographic structure of the Lake Onega basin: watersheds of the Shuya (1) and Suna (2), Zaonezhye (3) Rivers, watersheds of eastern tributaries (4), Vodla River (5), southern (6) and western tributaries (7)

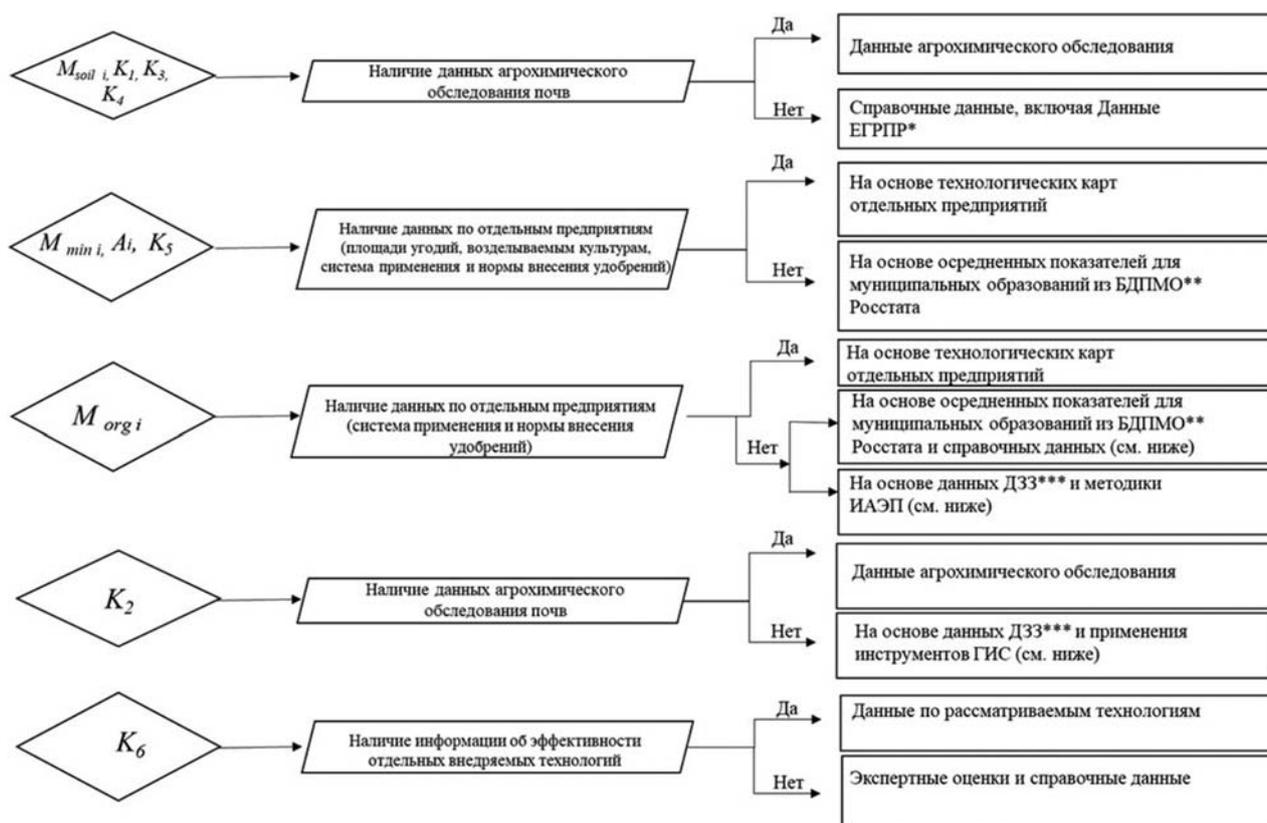


Рис. 2. Процесс сбора исходных данных в зависимости от доступности информации о деятельности сельскохозяйственных предприятий:

*ЕГРПР – Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, **БДПМО – база данных показателей муниципальных образований, ***ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

Fig. 2. Collecting initial data depending on the availability of information about agricultural activities:

*ЕГРПР – Unified State Register of Soil Resources of Russia, **БДПМО – database of municipalities indicators, ***ДЗЗ – Earth remote sensing

Содержание или запас азота и фосфора в пахотном слое почв (20–25 см) M_{soil} определяется по справочным материалам и литературным данным [Единый...; Почвоведение, 1972; Гинзбург, 1981]. За основу расчета в данном случае принимается подзолистая почва. Коэффициент K_1 , характеризующий вынос биогенных веществ из пахотного слоя почвы, определяет долю биогенных веществ, содержащихся в почве, которые могут перейти в сток с единичного участка сельхозугодий в месте непосредственного соприкосновения стока и почвы. Зависит от условий увлажнения и содержания азота и фосфора в почве сельскохозяйственных угодий – чем богаче почва азотом и фосфором, тем, соответственно, их вымывается больше. Значение коэффициента могут быть получены по итогам выполнения обследования конкретных территорий, а в случае отсутствия сведений значения могут быть рассчитаны на основе справочных данных для характерных типов почв и условий увлажнения.

K_3 и K_4 используются в качестве дополнительных коэффициентов, позволяющих учесть распространенность различных типов почв в границах рассматриваемого водосборного бассейна и связанных с этим параметров, определяющих содержание питательных веществ в почве и интенсивность миграции за пределы пахотного слоя. В условиях отсутствия детальных сведений о доле потерь биогенных веществ из корнеобитаемого горизонта в результате вымывания и смыва на рассматриваемой территории используются средние значения, приведенные в агрохимической литературе [Методические..., 2000].

Коэффициенты попадания биогенных веществ в сток определяют долю потерь минеральных (α_1) и органических (α_2) удобрений, не усвоенных сельхозкультурами. Азот поступает в гидрографическую сеть водосбора только из той части минеральных удобрений, которая не связана с урожаем, почвенной микрофлорой и почвенным поглощающим комплексом.

В среднем до 70 % азота минеральных удобрений не могут участвовать в вымывании в водные объекты. С учетом этого для минеральных удобрений коэффициент попадания азота в сток (α_1) может быть ориентировочно принят равным 0,3. В органических удобрениях основное количество азота находится в органической форме, и поэтому он менее подвижен. Часть подвижного азота усваивается растениями и микрофлорой почвы, другая закрепляется в почве, как и азот минеральных удобрений. Поэтому коэффициент, влияющий на попадание в сток азота из органических удобрений (α_2), составляет 0,1 [Barrows, Kilmer, 1963; Amberger, Schweiger, 1973; Справочник..., 1976].

Фосфор минеральных удобрений малоподвижен в почве, большая его часть закрепляется в ней и поглощается растениями и микрофлорой почвы. Коэффициент α_1 для минеральных фосфорных удобрений может быть принят равным 0,03. Значение α_2 для органических удобрений может ориентировочно оцениваться в 0,02, так как часть фосфора органических удобрений находится в органических соединениях и становится подвижной только после минерализации [Barrows, Kilmer, 1963; Amberger, Schweiger, 1973; Справочник..., 1976].

При определении массы азота и фосфора, поступающих с минеральными удобрениями (M_{min}), площади сельскохозяйственных угодий (A_i) и структуры землепользования (K_g) используются официальные данные статистики по агропромышленному комплексу, данные конкретных сельхозпредприятий, нормативные и справочные материалы. В условиях отсутствия детальных сведений по отдельным предприятиям применяется метод осредненной оценки по агрегированным сведениям, приведенным в базе данных показателей муниципальных образований. В подобном случае в качестве исходных данных выступают количественные показатели о площади посевов различных культур, суммарном внесении минеральных удобрений на уровне муниципального района за рассматриваемый год.

Определение массы азота и фосфора, поступающих с органическими удобрениями (M_{org}), целесообразно проводить на основе данных о фактическом внесении по отдельным предприятиям. С учетом того, что подобная информация в большинстве случаев недоступна, ИАЭП разработана дополнительная методика анализа животноводческих сельскохозяйственных объектов, позволяющая определять показатели деятельности животноводческих предприятий, необходимые для приближенной оценки поступления азота и фосфора на рассматриваемой территории с органическими удобрениями.

Алгоритм методики включает четыре основных пункта. На первом этапе выполняется сбор необходимых исходных данных о животноводческом предприятии, регионе размещения предприятия, применяемых технологиях и технических средствах. Осуществляется формализованное представление данных. Далее производится расчет количественных характеристик навоза/помета и определение количества/объема систем хранения навоза/помета с применением существующих методик расчета [Shalavina et al., 2022]. На заключительном этапе проводится анализ деятельности сельхозпредприятия. В результате определяется поголовье животноводческих и птицеводческих предприятий, выход навоза/помета, количество и объем навозохранилищ.

Коэффициент K_2 , учитывающий удаленность сельскохозяйственных угодий от водных объектов, играет ключевую роль при оценке условий миграции биогенных веществ в водные объекты. Для расчета значения коэффициента определяется средневзвешенное значение удаленности поля от водного объекта на основе пространственного анализа в среде ГИС с использованием инструментов построения буферных зон вдоль основных водотоков.

Коэффициенты, учитывающие удаленность сельскохозяйственных угодий от водных объектов, принимаются на основании обобщения данных, полученных из литературы и справочных материалов, и представлены в табл. 1 [Методические..., 1988; Johnes, Heathwaite, 1997].

Таблица 1. Коэффициенты удаленности сельскохозяйственных угодий от водных объектов

Table 1. Coefficients, related to the distance between agricultural land and water bodies

Удаленность контура, м Distance to water body, meters	для азота for nitrogen	для фосфора for phosphorous
от 50 до 500 from 50 to 500	0,6	0,6
от 500 до 2000 from 500 to 2000	0,2	0,2
от 2000 до 5000 from 2000 to 5000	0,1	0,2

Коэффициент соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям (K_6) применяется для оценки потенциального снижения потерь азота и фосфора в водные объекты при внедрении принципов НДТ на рассматриваемых сельскохозяйственных предприятиях. Внедрение НДТ применения удобрений предусматривает оценку качества почвы, потребности выращиваемых культур и расчет

необходимых доз удобрений. Поэтому коэффициент K_6 отражает комплексное воздействие на снижение выноса азота и фосфора наилучшего сочетания технологических и управленческих решений, направленных на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду. При определении факторов воздействия НДТ на вынос азота и фосфора с водосбора используются критерии НДТ по ГОСТ Р 54097-2010 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации».

Определение значений коэффициента соответствия технологии применения органических и минеральных удобрений наилучшим доступным технологиям является сложной методической задачей. Значения коэффициента K_6 , полученные специалистами ИАЭП по результатам анализа отечественного и зарубежного опыта внедрения НДТ, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициент K_6 , отражающий уровень технологий применения удобрений

Table 2. K_6 coefficient, related to the technologies of fertilizer application

Вид удобрения Fertilizer type	Азот Nitrogen		Фосфор Phosphorous	
	без НДТ without BAT	с НДТ with BAT	без НДТ without BAT	с НДТ with BAT
Твердые органические Solid organic	1	0,25	1	0,1
Жидкие органические Liquid organic	1	0,25	1	0,1

Результаты и обсуждение

Предложенная методика сбора данных использована для оценки значений параметров уравнения (1) метода ИАЭП и последующего выполнения расчетов диффузного выноса азота и фосфора сельскохозяйственного происхождения с водосборного бассейна Онежского озера. Расчеты проводились для условий 2010 и 2021 гг. с целью выявления общей тенденции изменения биогенной сельскохозяйственной нагрузки за эти годы.

Для определения ежегодного количества азота и фосфора, вносимых с органическими удобрениями, проведен анализ поголовья основных видов сельскохозяйственных животных. Анализ и сбор данных производился на основе изучения официальных статистических данных. В результате сбора, анализа и обобщения данных была сформирована таблица с указанием поголовья основных видов животных. При определении поголовья учитывались животные, которые содержатся в сельскохозяйственных организациях, хозяйствах населения, крестьянских (фермерских) хозяйствах и индивидуальными предпринимателями. Анализ поголовья животных и птицы за 2010 и 2021 гг. показывает, что на рассматриваемой территории имеется множество личных подсобных и фермерских хозяйств, на их долю приходится большая часть поголовья животных и птицы, при этом практически отсутствуют крупные животноводческие предприятия. На рис. 3 приведены сводные данные.

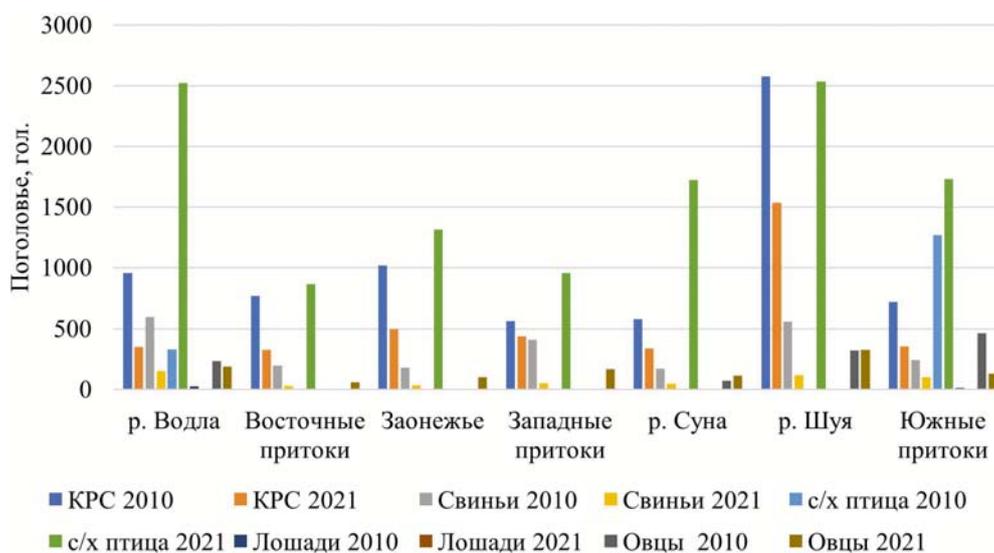


Рис. 3. Поголовье сельскохозяйственных животных на исследуемой территории (КРС – крупный рогатый скот)

Fig. 3. Livestock on the studied area (KPC – cattle)

Исходя из информации, представленной на рис. 3, можно сделать заключение, что наибольшая концентрация сельскохозяйственной птицы характерна для подбассейнов рек Водлы и Шуи, по поголовью крупного рогатого скота лидирует территория в пределах бассейна р. Шуя. По всем видам животных на исследуемых территориях с 2010 по 2021 год произошло сокращение поголовья, кроме сельскохозяйственной (с/х) птицы. В ходе анализа установлено, что основное поголовье сосредоточено в личных подсобных и фермерских хозяйствах. На рассматриваемой территории действуют три основных сельскохозяйственных предприятия по разведению крупного рогатого скота – ОАО «Агрокомплекс им. В. М. Зайцева», ЗАО «Пряжинское» и ЗАО «Эссойла» (рис. 4).

На рис. 5 проиллюстрирован процесс сбора и анализа данных для расчета коэффициента K_2 , а именно:

- шаг 1 – сбор данных о структуре землепользования на рассматриваемой территории (как правило, используются данные дистанционного зондирования земли);
- шаг 2 – формирование слоев данных с нанесением сельскохозяйственных угодий;
- шаг 3 – нанесение водотоков;
- шаг 4 – построение буферных зон вдоль водотоков на заданной дистанции (500 м, 2000 м, 5000 м);
- шаг 5 – расчет площади угодий, попадающих в пределы каждой из указанных зон, с использованием инструментов пространственного анализа.



а)



б)



в)

Рис. 4. Космические снимки сельскохозяйственных предприятий, расположенных на рассматриваемой территории:

а) ОАО «Агрокомплекс им. В. М. Зайцева»; б) ЗАО «Пряжинское»; в) ЗАО «Эссойла»

Fig. 4. Space images of the agricultural enterprises located on the territory:

а) OJSC "Agrocomplex named after V. M. Zaitsev"; б) CJSC "Pryazhinskoye"; в) CJSC "Essoila"

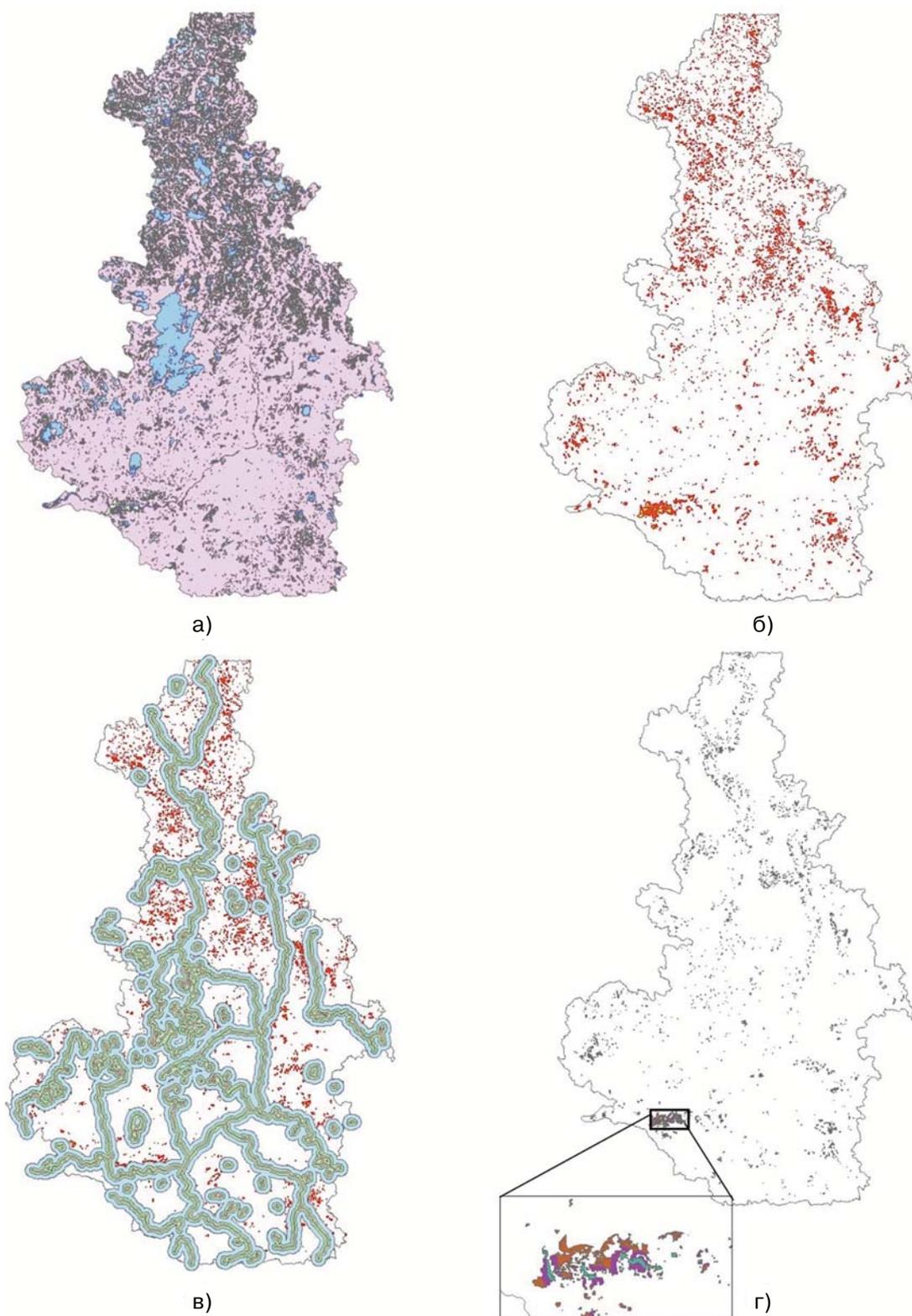


Рис. 5. Иллюстрация алгоритма выполнения пространственного анализа на примере водосбора реки Водла:

а) анализ структуры землепользования; б) нанесение контуров сельскохозяйственных угодий; в) нанесение контуров водотоков и построение буферных зон; г) пространственный анализ расположения полей в пределах буферных зон

Fig. 5. Illustration of the spatial analysis based on the example of the Vodla River watershed:

a) analysis of the land use structure; б) contouring the agricultural land borders; в) contouring the watercourses and creating buffer zones borders; г) spatial analysis of the fields location within the buffer zones

Полученные доли расположения полей в границах зон по каждому муниципальному району используются для расчета средневзвешенного значения коэффициента K_2 для рассматриваемого водосбора.

С учетом отсутствия детальных сведений по каждому сельскохозяйственному предприятию значения остальных параметров расчетного метода оценивались на основе официальной статистической информации, размещенных в базе данных показателей муниципальных образований и справочных сведений на уровне муниципального района [Единый..., Почвоведение..., 1972; Гинзбург, 1981; Методические..., 2000]. Принятые значения коэффициентов для расчета приведены в табл. 3.

Далее выполнен расчет годового выноса азота и фосфора с сельскохозяйственных территорий и их поступления в первичную гидрографическую сеть водосбора Онежского озера, сформированного в результате сельскохозяйственной деятельности в 2010 и 2021 гг. с привязкой к основным речным подбассейнам. Результаты показаны на рис. 6 и 7.

Согласно проведенным расчетам суммарный вынос биогенных элементов с изучаемого водосбора и их поступление в первичную гидрографическую сеть в результате сельскохозяйственной деятельности составили: в 2010 г. –

125 тN/год и 3,9 тP/год, в 2021 г. – 89 тN/год и 2,9 тP/год. Основная нагрузка формируется на территории подбассейна реки Шуя и в подбассейне южных притоков (около 60 %), где расположены основные посевные площади. Суммарное поступление биогенных веществ в 2010 г. примерно на 29 % по азоту и 26 % по фосфору выше рассчитанного поступления в 2021 г. Подобная динамика характерна для всех бассейнов, за исключением территории бассейна западных притоков, где к 2021 г. поступление увеличилось на 27 % по азоту и 6 % по фосфору. В остальных подбассейнах сокращение поступления азота составило от 8 до 54 % по азоту и от 10 до 51 % по фосфору.

Таблица 3. Диапазон значений коэффициентов, использованных в расчете

Table 3. Range of coefficient values used in the calculation

Коэффициент Coefficient	Диапазон значений Values	
	Азот Nitrogen	Фосфор Phosphorous
K_1	0,0051	0,000476
K_2	0,10–0,60	0,20–0,60
K_3	1,00–1,81	1,00–3,94
K_4	1,00–1,80	1,00–2,00
K_5	0,40–1,00	0,20–0,85
K_6	0,25	0,10

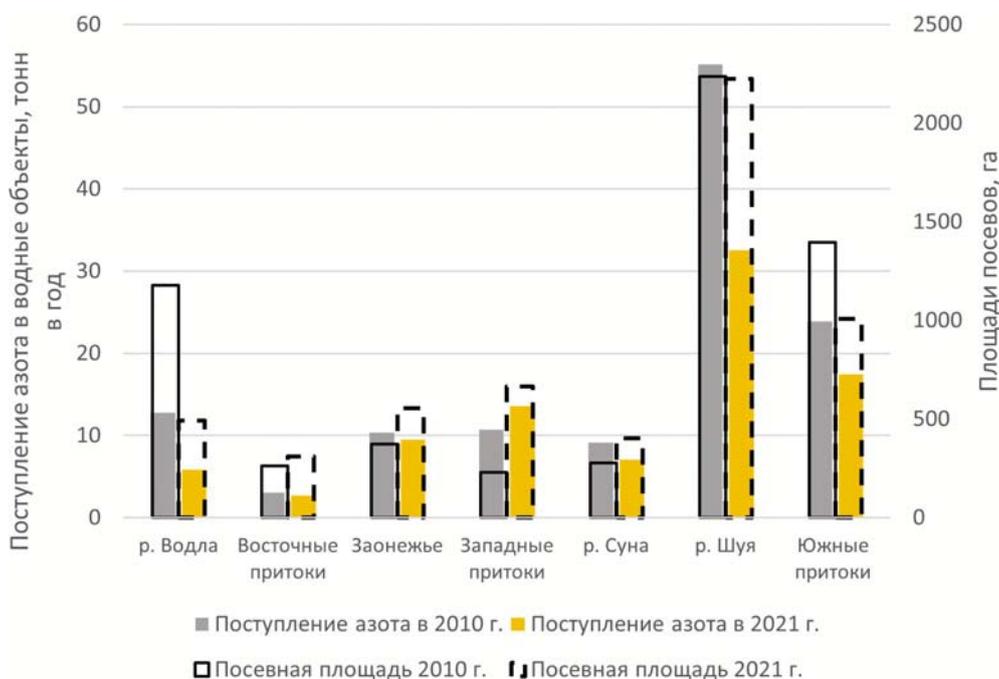


Рис. 6. Вынос азота в первичную гидрографическую сеть подбассейнов в результате сельскохозяйственной деятельности в 2010 и 2021 гг.

Fig. 6. Nitrogen input to the primary hydrographic network of the sub-basins from agricultural activities in 2010 and 2021

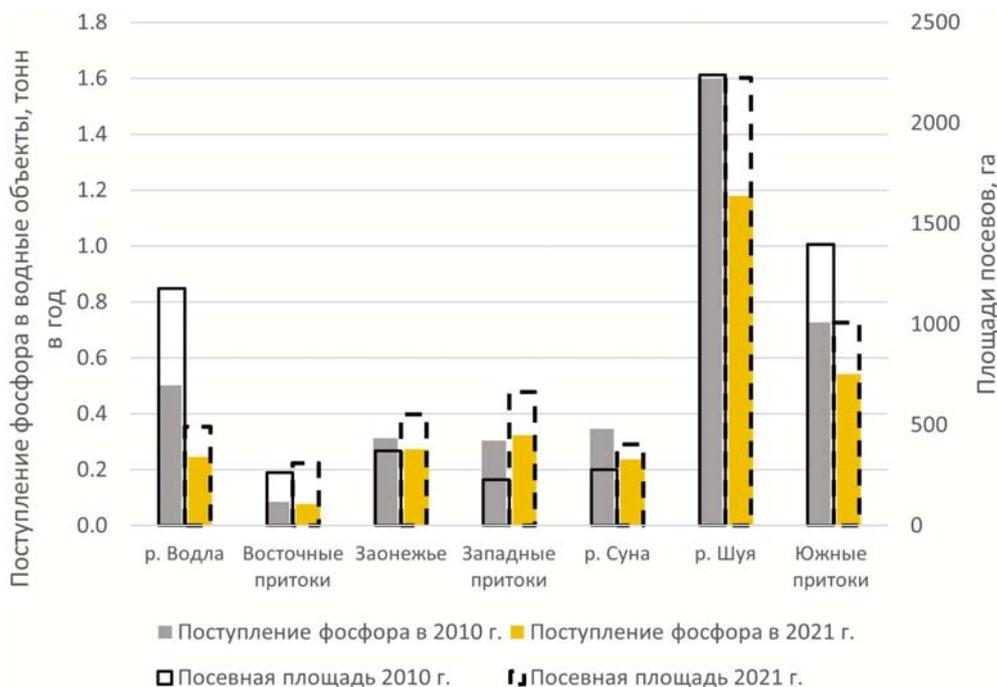


Рис. 7. Вынос фосфора в первичную гидрографическую сеть подбассейнов в результате сельскохозяйственной деятельности в 2010 и 2021 гг.

Fig. 7. Phosphorous input to the primary hydrographic network of the sub-basins from agricultural activities in 2010 and 2021

Согласно расчетам, максимальное снижение (более 50 %) наблюдается в бассейне реки Водлы, что может быть связано с существенным сокращением посевных площадей к 2021 г. Диапазон изменения удельного поступления азота между выделенными подбассейнами в 2010 и 2021 гг. составляет от 8,72 до 46,71 кг/га в год, фосфора – от 0,25 до 1,33 кг/га в год, что сопоставимо с данными, полученными в аналогичных исследованиях в странах региона Балтийского моря [Jakobsson, 2012; HELCOM..., 2018; Jansson et al., 2019; Sandström et al., 2019].

Выводы

Разработанная методика сбора информации о деятельности сельскохозяйственных объектов позволяет определить поголовье животных, птицы, выход навоза и количество навозохранилищ на анализируемом предприятии, дозы внесения органических удобрений и обеспечивает возможность выполнять расчеты выноса биогенных элементов и формирования биогенной нагрузки на первичные звенья гидрографической сети с использованием метода расчета нагрузки ИАЭП. Применение указанной методики сбора данных на водосборе Онежского озера и его

подбассейнах позволило рассчитать диффузный вынос азота и фосфора от сельскохозяйственной деятельности с территории изучаемого объекта. В 2021 г. средние потери биогенных веществ в водные объекты составили 20 и 0,65 кг/га в год для азота и фосфора соответственно. Полученные результаты сопоставимы с данными аналогичных исследований в странах региона Балтийского моря, что позволяет предположить адекватность результатов расчетов, выполненных по методу ИАЭП с применением созданной методики определения параметров. Дальнейшее совершенствование методики заключается в накоплении и использовании дешифровочных признаков производственных зданий и навозохранилищ и уточнении параметров миграции биогенных веществ в водные объекты.

Литература

- Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера / Ред. Н. А. Петровой. Л.: Наука, 1982. 304 с.
 Брюханов А. Ю., Кондратьев С. А., Обломкова Н. С., Огуздин А. С., Субботин И. А. Методика определения биогенной нагрузки сельскохозяйственного производства на водные объекты // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 89. С. 175–183.

Гинзбург К. Е. Фосфор основных типов почв СССР. М.: Наука, 1981. 235 с.

Единый государственный реестр почвенных ресурсов России [Электронная база данных]. URL: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1DB.html> (дата обращения: 14.04.2023).

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натурных наблюдений // Труды Карельского научно-го центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Методические указания по расчету поступления биогенных элементов в водоемы от рассредоточенных нагрузок и установлению водоохранных мероприятий. Утверждены НТС Госагропрома РСФСР 17.02.88. Всесоюзное проектно-изыскательское и научно-исследовательское объединение «Союзвод-проект», 1988.

Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. М.: Изд-во ЦИНАО, 2000. 42 с.

Почвоведение / Ред. А. С. Фатьянова, С. Н. Тайчинова. М.: Колос, 1972. 480 с.

Справочник агрохимика / Ред. Д. А. Кореньков. М.: Россельхозиздат, 1976. 350 с.

Amberger A., Schweiger P. Wanderung der Pflanzennährstoffe in Boden und deren Bedeutung in einer umweltbewussten Landwirtschaft // Die Bodenkultur. 1973. No. 24. P. 221–237.

Applied methodology for the PLC-6 assessment / Ed. L. M. Svendsen, DCE Aarhus University, PLC-6 project manager. Finland, HELCOM, 2019. 59 p.

Barrows H. L., Kilmer V. J. Plant nutrient losses from soil by water erosion // *Advances in Agronomy*. 1963. No. 15. P. 303–316.

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V., Subbotin I. A., Lukin S. M. Environmental assessment of live-563 stock farms in the context of BAT system introduction in Russia // *J. Environ. Manag.* 2019. Vol. 246. P. 283–288. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.105

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V. Assessment of nitrogen flows at farm and regional level when developing the manure management system for large-scale livestock enterprises in North-West Russia // *Sustainability*. 2021. Vol. 13(12). Art. 6614. doi: 10.3390/su13126614

HELCOM, 2018. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea // *Baltic Sea Environment Proceedings* No. 153 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP153.pdf> (дата обращения: 04.12.2023).

Jakobsson C. (ed.). Sustainable agriculture. 1st ed. Uppsala: Baltic University Press; 2012. 505 p. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:di-va-173215> (дата обращения: 04.12.2023).

Jansson T., Andersen H. E., Hasler B., Höglind L., Gustafsson B. G. Can investments in manure tech-

nology reduce nutrient leakage to the Baltic Sea? // *Ambio*. 2019. Vol. 48(11). P. 1264–1277. doi: 10.1007/s13280-019-01251-5

Johnes P. J., Heathwaite A. L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments // *Hydrol. Proc.* 1997. Vol. 11, iss. 3. P. 269–286. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<269::AID-HYP442>3.0.CO;2-K

Sandström S., Futter M., Kyllmar K., Bishop K., O’Connell D., Djodjic F. Particulate phosphorus and suspended solids losses from small agricultural catchments: Links to stream and catchment characteristics // *Sci. Total Environ.* 2019. Vol. 711. Art. 134616. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134616

Shalavina E. V., Uvarov R. A., Vasilev E. V. Calculation methods of total nitrogen and total phosphorus distribution in pig manure fractions // *Eng. Technol. Syst.* 2022. Vol. 32, no. 1. P. 54–70. doi: 10.15507/2658-4123.032.202201.054-070

References

Amberger A., Schweiger P. Wanderung der Pflanzennährstoffe in Boden und deren Bedeutung in einer umweltbewussten Landwirtschaft. *Die Bodenkultur*. 1973;24:221–237.

Barrows H. L., Kilmer V. J. Plant nutrient losses from soil by water erosion. *Advances in Agronomy*. 1963;15:303–316.

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V., Subbotin I. A., Lukin S. M. Environmental assessment of live-563 stock farms in the context of BAT system introduction in Russia. *J. Environ. Manag.* 2019;246:283–288. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.105

Briukhanov A. Yu., Vasilev E. V., Kozlova N. P., Shalavina E. V. Assessment of nitrogen flows at farm and regional level when developing the manure management system for large-scale livestock enterprises in North-West Russia. *Sustainability*. 2021;13(12):6614. doi: 10.3390/su13126614

Briukhanov A. Yu., Kondratyev S. A., Oblomkova N. S., Oguzdin A. S., Subbotin I. A. Methodology for determining the nutrient load of agricultural production on water bodies. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies and technical means of mechanized production of plant and animal products*. 2016;89:175–183. (In Russ.)

Fat’yanova A. S., Taichinova S. N. (eds.). Soil science. Moscow: Kolos; 1972. 480 p. (In Russ.)

Ginzburg K. E. Phosphorous in main soils types in the USSR. Moscow: Nauka; 1981. 235 p. (In Russ.)

Guidelines for calculating biogenic elements supply to reservoirs from dispersed loads and establishing water protection measures. Approved by the Science and Engineering Board of the State Agricultural Industry of the RSFSR on 17.02.88. All-Union Design, Survey and Research Association ‘Soyuzvodproekt’, 1988. (In Russ.)

Guidelines for determining the balance of nutrients: nitrogen, phosphorus, potassium, humus, calcium. Moscow: TsINAO; 2000. 40 p. (In Russ.)

HELCOM, 2018. Sources and pathways of nutrients to the Baltic Sea. *Baltic Sea Environment Proceedings No. 153*. URL: <https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP153.pdf> (accessed: 04.12.2023).

Jakobsson C. (ed.). Sustainable agriculture. 1st ed. Uppsala: Baltic University Press; 2012. 505 p. URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:di-va-173215> (accessed: 04.12.2023).

Jansson T., Andersen H. E., Hasler B., Höglind L., Gustafsson B. G. Can investments in manure technology reduce nutrient leakage to the Baltic Sea? *Ambio*. 2019;48(11):1264–1277. doi: 10.1007/s13280-019-01251-5

Johnes P. J., Heathwaite A. L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments. *Hydrological Processes*. 1997;11(3):269–286. doi: 10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<269::AID-HYP442>3.0.CO;2-K

Kondratyev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the watershed – watercourse – reservoir system. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2019. 246 p. (In Russ.)

Koren'kov D. A. (ed.). Agrochemistry handbook. Moscow: Rosselkhozizdat; 1976. 350 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Nutrient load on Lake Onego according to field data. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2016;5: 35–52. doi: 10.17076/lim303 (In Russ.)

Petrova N. A. (ed.). Anthropogenic eutrophication of Lake Ladoga. Leningrad: Nauka; 1982. 304 p. (In Russ.)

Sandström S., Futter M., Kyllmar K., Bishop K., O'Connell D., Djodjic F. Particulate phosphorus and suspended solids losses from small agricultural catchments: Links to stream and catchment characteristics. *Sci. Total Environ*. 2019;711:134616. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134616

Shalavina E. V., Uvarov R. A., Vasilev E. V. Calculation methods of total nitrogen and total phosphorus distribution in pig manure fractions. *Eng. Technol. Syst*. 2022;32(1):54–70. doi: 10.15507/2658-4123.032.202201.054-070

Svendson L. M. et al. (eds.). Applied methodology for the PLC-6 assessment. Finland, HELCOM; 2019. 59 p.

Unified State Register of Soil Resources of Russia. Electronic database. URL: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/1DB.html> (accessed: 14.04.2023). (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 20.12.2023; принята к публикации / accepted: 31.01.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Брюханов Александр Юрьевич

член-корр. РАН, д-р техн. наук, директор

e-mail: sznii@yandex.ru

Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, руководитель лаборатории математических методов моделирования

e-mail: 3718470@gmail.com

Филатов Николай Николаевич

чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук, профессор, главный научный сотрудник

e-mail: nfilatov@rambler.ru

Васильев Эдуард Вадимович

канд. техн. наук, руководитель отдела

e-mail: sznii6@yandex.ru

Обломкова Наталья Сергеевна

научный сотрудник

e-mail: oblomkovans@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Briukhanov, Aleksander

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Tech.), Director

Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory

Filatov, Nikolay

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Chief Researcher

Vasilev, Eduard

Cand. Sci. (Tech.), Head of Department

Oblomkova, Natalia

Researcher