

Научная статья
УДК 631.4
DOI 10.46845/1997-3071-2025-77-11-25

**Изученность миграции минерального азота в системе «почва – вода»
в условиях осушенных агроландшафтов Калининградской области
(аналитический обзор)**

Ольга Алексеевна Анциферова¹, Анна Андреевна Басаргина^{1,2}

¹Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

²Центр Агрохимической службы «Калининградский», Калининград, Россия

¹olga.antsiferova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>

Аннотация. Статья посвящена анализу научных публикаций по проблеме накопления и выноса со стоком минерального азота (нитратный, аммонийный, нитритный) в условиях самого западного региона России. Приведены этапы развития исследований за последние 76 лет (1949 – 2025 гг.). Установлено, что интерес к проблеме обусловлен прикладными задачами в области агрохимии, агроэкологии, геоэкологии, гидрологии. Большинство глубоких исследований с масштабным охватом территории и комплексным подходом было выполнено в конце XX в. в связи с активным развитием экологического направления в науке. Приоритет системного подхода в организации региональных работ принадлежит Центру агрохимической службы «Калининградский». Это позволило определить уровень потерь нитратного азота, который значительно выше, чем в других регионах зоны дерново-подзолистых почв европейской части России. Причинами являются гумидный климат территории и осушительные мелиорации для улучшения водно-воздушного режима переувлажненных почв. В начале XXI в. усилилась актуальность и востребованность информации по проблеме миграции минерального азота, которая связана с внедрением интенсивных агротехнологий и изменениями климата. Нехватка первичной информации о влиянии объемов удобрения на скорость выноса минерального азота в системе «почва – верховодка / грунтовые воды / дренажные воды – водоприемники» на различных видах сельскохозяйственных угодий может являться причиной погрешностей результатов моделирования. В настоящее время существует необходимость проведения системных фундаментальных и прикладных региональных исследований по агрогеохимии минерального азота в связи с его высокой мобильностью и физиологической ролью для живых компонентов экосистем.

Ключевые слова: аммонийный и нитратный азот, накопление и миграция, дренажный сток, дерново-подзолистые осушенные почвы.

Для цитирования: Анциферова О. А., Басаргина А. А. Изученность миграции минерального азота в системе «почва – вода» в условиях осушенных агроландшафтов Калининградской области (аналитический обзор) // Известия КГТУ. 2025. № 77. С. 11–25. DOI 10.46845/1997-3071-2025-77-11-25.

Original article

**Study of the migration of mineral nitrogen in the soil-water system
in the conditions of drained agricultural landscapes of the Kaliningrad region
(analytical review)**

Olga A. Antsiferova¹, Anna A. Basargina^{1,2}

¹Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

² Center of Agrochemical Service "Kaliningradsky", Kaliningrad, Russia

¹olga.antsiferova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5389-7243>

Abstract. The article is devoted to the analysis of scientific publications on the problem of accumulation and removal of mineral nitrogen (nitrate, ammonium, nitrite) in the conditions of the westernmost region of Russia. The article presents the stages of research development over the past 76 years (1949–2025). It has been found that interest in this issue is stipulated by the applied problems in the field of agrochemistry, agroecology, geoecology, and hydrology. Most of the in-depth research with a large-scale coverage of the territory and an integrated approach was carried out at the end of the twentieth century in connection with the active development of the environmental field in science. The priority of a systematic approach in the organization of regional work belongs to the Center of agrochemical service "Kaliningrad". This allowed us to determine the level of nitrate nitrogen losses, which is significantly higher than in other regions of the zone of sod-podzolic soils of the European part of Russia. The reasons are the humid climate of the territory and drainage reclamation to improve the water-air regime of waterlogged soils. At the beginning of the 21st century, the relevance and demand for information on the migration of mineral nitrogen increased due to the introduction of intensive agricultural technologies and climate change. The lack of primary information on the impact of fertilizer volumes and the intensity of mineral nitrogen removal in the "soil – perched water / groundwater / drainage waters – drainage channel" on various types of agricultural land may cause errors in the modeling results. Currently, there is a need for systematic fundamental and applied regional research on the agrogeochemistry of mineral nitrogen due to its high mobility and physiological role for living components of ecosystems.

Keywords: ammonium and nitrate nitrogen, accumulation and migration, drainage water runoff, sod-podzolic drained soils.

For citation: Antsiferova O. A., Basargina A. A. Study of the migration of mineral nitrogen in the soil-water system in the conditions of drained agricultural landscapes of the Kaliningrad region (analytical review). *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(77):11–25. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-77-11-25.

ВВЕДЕНИЕ

Азотные удобрения занимают лидирующее место в мире среди применяемых агрохимикатов под сельскохозяйственные культуры. При этом потери азота из удобрений в результате эмиссии в атмосферу, миграции с жидким и твердым стоком достигают 50 % [1]. Следствием этого является возникновение экологических рисков загрязнения поверхностных и грунтовых вод, продукции растение-

водства, развитие болезней и снижение качества продуктов питания [2, 3]. В связи с этим особую актуальность имеют результаты многолетнего мониторинга, которые позволяют выявить влияние различных форм и доз азотных удобрений, сельскохозяйственных культур и способов землепользования на скорость миграции минерального азота в системе «почва – вода» [4, 5]. При формировании базы данных об объемах потерь азота из почв важно учитывать географические аспекты на уровне природных зон, подзон, провинций и отдельных ландшафтов. Этим объясняется актуальность региональных исследований.

Цель работы – оценка современного состояния проблемы миграции минерального азота в условиях осушенных почв агроландшафтов Калининградской области и его влияние на уровень загрязнения поверхностных и грунтовых вод.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являются почвы и природные воды в агроландшафтах Калининградской области. Предмет исследования – степень отражения в научных публикациях качественных и количественных региональных аспектов накопления и миграции минеральных форм азота в агроэкосистемах.

Основным методом исследования явился ретроспективный анализ научных публикаций на основе исторических этапов развития агропочвоведения, агрохимии и агроэкологии в Калининградской области в период с середины XX в. до первой четверти XXI в.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общие закономерности накопления и миграции аммонийного и нитратного азота в почвах агроэкосистем Нечерноземья

Основная часть азота в почвах связана с органическим веществом, и только небольшая часть представлена минеральными соединениями (аммонийной, нитратной и нитритной формами). Накопление минерального азота в почвах агроэкосистем происходит под влиянием природных микробиологических процессов (нитрификация, аммонификация, азотфиксация) на фоне разных видов антропогенного воздействия (прямое внесение азотсодержащих минеральных и органических удобрений, выпас скота, влияние животноводческих и птицеводческих комплексов). Многочисленными исследованиями в XX в. было установлено, что содержание минерального азота возрастает в ряду «лес – луг – пашня», при этом отмечается высокое накопление минерального азота в условиях черного пара: на севере нечерноземной зоны европейской территории России 60–85 кг/га, на юге – 150–250, в Белорусском Полесье – 200–300 [6]. Обобщение исследований по влиянию сельскохозяйственных культур на содержание минерального азота в удобряемых почвах показывает, что наибольшие количества накапливаются под овощными и пропашными культурами, меньше их под зерновыми, а наименьшие запасы характерны при выращивании многолетних злаковых трав. Эти же закономерности действуют на интенсивность и объемы вымывания нитратного азота из почв.

Установлено, что аммонийный азот находится преимущественно в обменно-поглощенном состоянии и слабо подвержен вымыванию. Напротив, нитратный азот не поглощается почвой и активно мигрирует по профилю.

Гранулометрический состав оказывает сильное влияние на степень вымывания азота из почвы и удобрений. На легких почвах (песчаных, супесчаных) миграция идет интенсивно, в 1,5–5 и более раз быстрее, чем на суглинистых и глинистых [6–8].

Основное количество азота из почвы вымывается в осенне-зимний и ранневесенний периоды, в весенне-летний вымывается только 15–25 % от общего количества потерянного азота [8]. Глубина проникновения нитратного азота 1 – 4 м. В речных водах максимальное количество минерального азота появляется в период половодья, а в некоторых регионах Нечерноземья еще и при осенних дождях [6, 9]. В реки нитраты поступают не только с грунтовым стоком, но и с эрозионными потоками (твердый и жидкий сток). По разным оценкам эрозионные потери в нечерноземной зоне варьируют от 0,5 до 100,8 кг/га азота в год, наиболее часто для Центрального Нечерноземья и Беларуси приводится интервал 0,5 – 14,0 кг/га, при этом 90–97 % приходится на твердый сток. Потери минерального азота от эрозии в сложных условиях рельефа возрастают в ряду «многолетние травы – озимые зерновые – яровые зерновые по зяби – пропашные по зяби» [6, с. 81–84].

*Исторические этапы изучения минерального азота и его миграции
в почвах агроландшафтов Калининградской области (1949 – 2020 гг.)*

Первые сведения о количестве минеральных форм азота в почвах и дренажных водах содержатся в трудах агрохимического отряда (руководитель И. Г. Важенин) Государственной комплексной экспедиции Академии наук СССР (1949–1953 гг.) (табл.). В статье К. В. Веригиной содержится обзор проблематики в работах отечественных и зарубежных ученых за первую половину XX в., предваряющий сведения о первых результатах авторских экспериментов [10]. В работе приводятся сведения о сезонном изменении состава дренажных вод (1949, 1951 гг.), постановке полевых экспериментов (1951 г.) с анализом агрохимических свойств почв, водной вытяжки из почв и ионного состава коллекторных вод с опытных участков. Экспериментальные площадки закладывались в двух почвенно-геоморфологических районах – Лава-Прегольская низменности с суглинистыми дерново-подзолистыми почвами на озерно-ледниковых карбонатных глинах и оконечности Вармийской холмисто-моренной равнины с дерново-подзолистыми легкосуглинистыми почвами на моренных неоднородных отложениях.

В 60-е годы XX в. некоторых вопросов превращения соединений минерального азота касался в своей работе Н. С. Докучаев в связи с изучением окислительно-восстановительных условий польдерных земель в дельтовой низменности р. Неман [11]. После открытия в 1965 г. Калининградской областной станции химизации (ныне Центр агрохимической службы «Калининградский» – ЦАС) началось проведение систематического агрохимического обследования и постановка полевых опытов с удобрениями. Источником информации о содержании минерального азота в почвах являлись результаты ранневесенней диагностики азотного питания озимых зерновых культур [12]. Этот вид производственного полевого

обследования проводился в связи с применением азотных подкормок, начиная с 70-х годов XX в. [13, с. 27].

Обобщенные данные были опубликованы в 1999 г. [14]. Помимо этого, под руководством В. И. Панасина выполнены полевые научные исследования, посвященные изучению миграции нитратного азота с дренажным стоком в условиях овощного севооборота с орошением в Гурьевском районе в 1981–1985 гг. [15]. В продолжение темы агрогеохимических путей миграции нитратного азота в системе «почва – вода» изучался химический состав речных вод Преголи и Гурьевки, а также других малых рек и открытых водных источников (ручьев, водохранилищ, прудов, магистральных дренажных каналов, заливов) [16–18].

Стимулом к такому широкомасштабному обследованию послужила активно развивавшаяся с конца 80-х годов XX в. экологическая проблематика, одним из направлений которой явилась оценка потенциальной угрозы от агрохимикатов и сельского хозяйства в целом [19, 20].

В начале XXI в. количество исследований по проблематике геохимической миграции минерального азота в почвах незначительно. В рамках проведения полевых опытов в ЦАС «Калининградский» публикуются отдельные итоги, касающиеся аспектов взаимосвязей в системе «удобрение – почва – урожай» [21]. В то же время возникает попытка поднять проблему агрогеохимического эффекта поверхностного накопления форм нитратов в зависимости от режима влажности [22, 23]. На этом фоне активно публикуются данные, содержащие информацию о количестве биогенных веществ (в том числе азота) в водах рек, заливов и моделировании объемов выноса с сельскохозяйственных угодий [24–29].

В итоге к началу 2025 г. публикаций, которые непосредственно связаны с проблемой накопления и миграции минерального азота в системе «почва – вода», насчитывается менее десяти. Все работы имеют прикладной характер, фундаментальных нет. Абсолютное большинство исследований выполнено региональными учеными. Наиболее комплексный подход, включающий данные по почвам, дренажному стоку и водам, просматривается в публикациях специалистов ЦАС «Калининградский», при этом накоплен массив многолетних данных, выполненных по единой государственной методике.

Распределение работ по временным рамкам отражено в таблице. На региональном уровне выражен переход от узкоприкладных агрохимических исследований к более широкой экологической проблематике, начиная с конца 80-х годов XX в. В то же время ввиду разрозненности научных коллективов и несогласованности тематики научных работ до настоящего времени отсутствует перспективное развитие данного направления исследований, которое будет отражать переход на новый исторический этап в XXI в. Соглашаясь с уровнем современного развития науки, оно должно совмещать агрохимическую и экологическую составляющие и ориентироваться не только на констатацию фактов, составление моделей, но и на решение проблем снижения потерь минерального азота.

Таблица. Этапы изучения вопросов накопления и миграции минерального азота в системе «почва – вода» (середина XX – первая четверть XXI в.)

Table. Stages of studying the issues of accumulation and migration of mineral nitrogen in the soil – water system (mid-20th – first quarter of the 21st century)

Годы	Направление	Основная задача	Исполнители
1949 – 1952	Агрохимические исследования в рамках Государственной комплексной академической экспедиции	Получение рекогносцировочных сведений о влиянии осушения на выщелачивание химических элементов (в том числе минерального азота) с удобряемой пашни	Отдельные ученые ведущих научных центров страны (К. В. Веригина)
1975 – настоящее время	Агрохимические работы: а) в рамках государственного сплошного / выборочного обследования; б) на опытных участках	Получение сведений о накоплении минерального азота в режиме многолетних данных с детализацией вопросов влияния свойств почв, удобрений и агротехнологий	ФГБУ «Центр агрохимической службы «Калининградский» (В. И. Панасин, В. В. Долинина, В. Д. Слобожанинова, А. В. Чашкина)
1981 – 1995	Гидрохимические исследования миграции элементов из агроэкосистем в рамках сплошного / выборочного обследования	Эколого-токсикологическая оценка и выявление сельскохозяйственных источников загрязнения поверхностных вод	ФГБУ «Центр агрохимической службы «Калининградский» (В. И. Панасин, В. В. Широков, Л. В. Мизина)
60-е годы XX в. – настоящее время	Почвенно-гидрологические исследования в агроландшафтах	Оценка влияния гидрологического режима осушенных почв на миграцию минерального азота	Отдельные региональные ученые в составе областной опытно-мелиоративной станции (В. В. Докучаев), кафедр университетов (О. А. Анциферова)
XXI в.	Гидрохимические исследования и моделирование миграции элементов	Эколого-токсикологическая оценка водоемов	Отдельные региональные ученые в составе кафедр университетов (Т. А. Берникова, Н. А. Цупикова, Н. Н. Нагорнова, С. И. Зотов, Ю. А. Спирин и др.)

Региональные особенности накопления и выноса минерального азота
по итогам публикаций

В накоплении минерального азота $N-(NO_3^- + NH_4^+)$ в условиях региона подтверждаются закономерности роста количества в зависимости от увеличения содержания гумуса и утяжеления гранулометрического состава. Обработка данных В. И. Панасина, В. Д. Слобожаниновой, В. В. Долининой [14] показала наличие линейной зависимости с высокими коэффициентами детерминации (рис. 1.). Такие взаимосвязи во многом обязаны закрепленному в обменно-поглощенном состоянии иону аммония. В то же время реакция среды играет большую роль и при оптимальном для большинства сельскохозяйственных культур pH_{KCl} , в интервале 5,6 – 6,0 наблюдается максимальное накопление минерального азота. Десятилетние результаты диагностики (1988 – 1998 гг.) обнаружили, что при уровне применяемых в тот период схем удобрения обеспеченность минеральным азотом возрастала в ряду предшественников «озимые зерновые – бобовые – яровые зерновые – многолетние травы – однолетние силосные – луга и пастбища – пропашные», при этом сохранялись закономерности влияния содержания гумуса и гранулометрического состава [4]. На осушенной аллювиально-болотной почве под черным паром может накапливаться до 300 кг/га минерального азота [11]. Известкование кислой почвы с оптимальной нормой осушения способствует накоплению нитратов, а избыточно увлажненной – подавлению нитрификации.

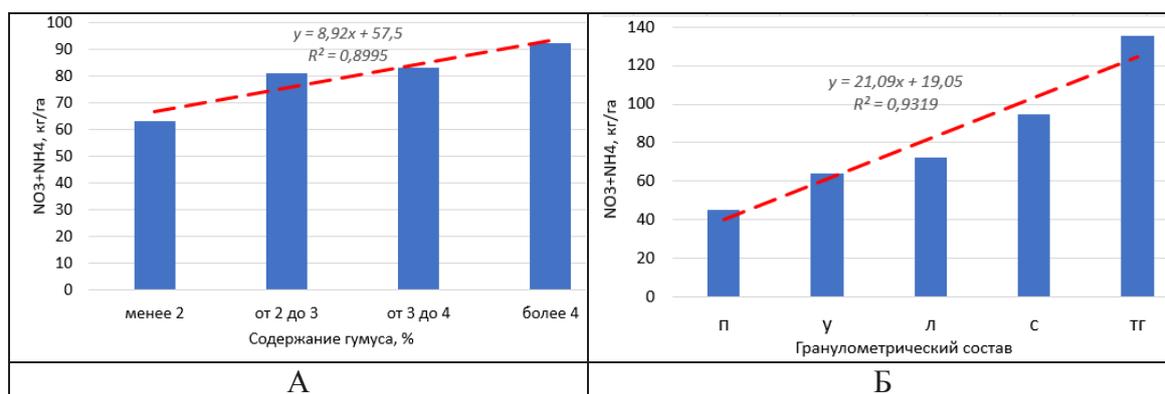


Рис. 1. Накопление минерального азота в дерново-подзолистых почвах в зависимости от содержания гумуса (А) и гранулометрического состава (Б)

Fig. 1. Accumulation of mineral nitrogen in sod-podzolic soils depending on humus content (A) and granulometric composition (B)

В исследованиях К. В. Веригиной на дерново-подзолистых почвах показано, что при внесении аммонийной селитры и обильном поливе нитраты мигрируют на всю глубину промачивания в течение 48 ч [10]. Концентрация их в дренажных водах увеличивалась с 2 до 57–66 мг/л, при этом от внесенного количества удобрений вымывалось в нитратной форме 0,02–0,04 %, в аммонийной – 0,03 %. Таким образом, было подтверждено, что на осушаемых почвах при дождях в вегетационный период возможны потери минерального азота с дренажным стоком.

Нами проведена дополнительная обработка данных ЦАС (В. И. Панасин, В. В. Широков, Л. В. Мизина) 1981–1985 гг., полученных при изучении дерново-подзолистых оглеенных почв под овощным севооборотом в Гурьевском рай-

оне [15]. В результате совместного мониторинга интенсивности дренажного стока и объемов выносимого нитратного азота выражена сильная взаимосвязь этих показателей (коэффициент корреляции по итогам среднесезонных данных 0,97). Основная ценность результатов мониторинга состоит в установлении сезонных закономерностей выноса нитратов (рис. 2), благодаря чему при развертывании исследований в XXI в. появляется возможность сравнения временных рядов на фоне изменяющегося климата. Пик стока приходится на зимние месяцы, за год выносятся от N_{21} до N_{71} кг/га. Нижняя граница этих значений входит в интервал, полученный учеными для дерново-подзолистых почв Центрального Нечерноземья и Беларуси, который приводится в сводном обзоре В. Г. Сычева с соавторами [6, с. 133–134]. Однако средние значения и тем более верхняя граница констатируют очень высокие объемы вымывания нитратов вследствие региональной специфики. Она заключается в географическом положении Калининградской области, которая относится к самой западной прибалтийской провинции зоны дерново-подзолистых почв и, соответственно, характеризуется максимальным количеством осадков. Второй особенностью является повсеместное осушение почв, что увеличивает вынос с дренажным стоком нитратов по сравнению с неосушенными агроландшафтами. Несмотря на то, что в работе не приведены схемы удобрения овощных культур и дозы азотных удобрений, отмечается, что потери могут составлять до половины азота, внесенного с удобрениями [15]. Это подчеркивает агрохимическую и агроэкологическую актуальность мониторинга минерального азота и в настоящий период, когда ориентация на получение высоких урожаев ведущих культур (озимой пшеницы и рапса) основана на интенсивном азотном удобрении в дозах равных или выше N_{200} кг/га [30].

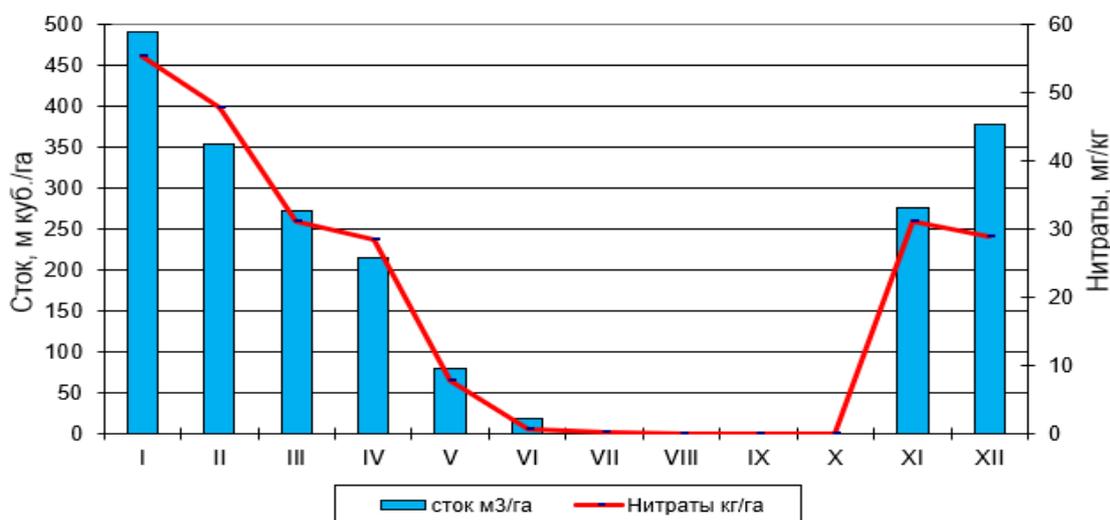


Рис. 2. Динамика выноса нитратного азота в зависимости от интенсивности дренажного стока

Fig. 2. Dynamics of nitrate nitrogen removal depending on the intensity of drainage runoff

Широкомасштабное обследование поверхностных вод, выполненное в ЦАС в конце XX в., позволило оценить не только загрязненность по нитрат-иону, но и фоновые природные значения, которые составляют 2,0–2,2 мг/л [17].

По данным В. И. Панасина и Л. Ф. Мизиной, основными сельскохозяйственными источниками загрязнения прудов, озер и рек являются животноводческие комплексы, дренажные воды с полей овощных севооборотов, склады минеральных удобрений. Динамика нитратов в реках области зависит от участка русла и особенностей антропогенной нагрузки на водосборы. Содержание нитратов, как правило, увеличивается от истока к устью [16–18]. Указывается, что на водосборе р. Преголи выше Калининграда вклад пахотных угодий в поступление общего азота в речные воды составляет 71 % [24].

В работах, посвященных оценке загрязненности малых водотоков Калининградской области, также отмечается зависимость биогенной нагрузки от модуля стока и фаз водного режима [25, 29]. В исследовании Н. Н. Нагорновой, Т. А. Берниковой, Н. А. Цупиковой показано, что примерная нагрузка на Балтийское море от 10 малых рек западной части Калининградской области (включая российскую часть Вислинского и Куршского заливов) составляет 660 т/год минерального азота, в том числе аммонийного – 300, нитритного – 10, нитратного – 350 [25]. В то же время данные Ю. А. Горбуновой, полученные с помощью моделей, дают величину нагрузки на Вислинский (Калининградский) залив только от реки Преголи выше Калининграда в 2300 т/год общего азота [24]. Приводимые в этой работе данные других исследователей, полученные аналогичным образом за 1990–2000 гг., еще выше. Выясняется большой разброс в оценках биогенной нагрузки от минерального азота на реки, заливы и море. Результаты моделирования с использованием весьма общих литературных данных могут рассматриваться как первый шаг к пространственным оценкам, дающим пока ориентировочные значения с высокой долей погрешности.

Таким образом, к настоящему времени существует дефицит научной информации по влиянию уровня современных агротехнологий на накопление, распределение, миграцию форм минерального азота в системе «почва – вода». Отсутствуют сравнительные исследования в разных ландшафтных условиях региона, оценка вида землепользования и значения способа мелиорации (осушение закрытым, открытым, польдерным способом, осушение с орошением). Также остается неясным влияние вида, формы, дозы азотных удобрений на возможные потери действующего вещества. Этот вопрос первостепенный при оценке агроэкономического аспекта эффективности удобрений. Единичные публикации по отрицательному агроэкологическому влиянию поверхностного применения гранулированных удобрений на участках переувлажненных почв [22, 23] не могут дать ответа на вопрос о степени преимущества замены этого способа на некорневые подкормки. Также остается совершенно не изученным вопрос об эрозионных потерях минерального азота с учетом геоморфологической сложности и разнообразия агроландшафтов на фоне участвовавших экстремальных погодных условий при изменяющихся климатических показателях. Отсутствуют исследования, связанные с влиянием дальности «растекания» повышенных концентраций нитратов в грунтовом потоке по отношению к смежным с агроэкосистемами лесным и болотным угодьям. Весьма перспективным является решение вопроса определения предельной емкости/нагрузки водных объектов в отношении биогенов вообще и азота в частности. Это открывает широкие возможности не только прикладных, но и фундаментальных исследований в области сопряженной эволюции наземных и водных экосистем под влиянием агрогенной нагрузки.

ВЫВОДЫ

1. Исторические этапы развития исследований накопления и миграции минерального азота в агроэкосистемах Калининградской области имеют два направления – агрохимическое и гидрохимическое. Исследования комплексного характера, сочетающие эти направления на базе мониторинговых данных, предприняты в 80–90-х годах XX в. в ЦАС «Калининградский». В настоящее время актуальность таких исследований обусловлена интенсификацией агротехнологий на фоне тренда к изменению климатических показателей.

2. В первой четверти XXI в. ощущается недостаток научных данных о поведении минерального азота в агроландшафтах. Прикладные региональные агрохимические публикации нацелены на изучение влияния азотных удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур без рассмотрения вопросов потерь при миграции с эрозионным и дренажным стоком. В то же время данные гидрохимических исследований касаются в основном комплексной оценки загрязненности малых рек при полном отсутствии или поверхностном касании вопросов агрогеохимии минеральных форм азота.

3. Перспектива развития тематики накопления, распределения и миграции минерального азота в почвах агроэкосистем должна основываться на результатах экспериментальных исследований в ландшафтах с применением цифровых технологий геопространственного моделирования, выявлении и мониторинге зон повышенной аккумуляции и миграции для составления объективных прогнозов объемов выноса, нагрузки на водные экосистемы и разработки приемов снижения потерь азота.

Список источников

1. Кудеяров В. Н. Эмиссия закиси азота из почв в условиях применения удобрений (аналитический обзор) // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1192–1205. DOI: 10.31857/S0032180X2010010X.
2. Башкин В. Н. Экологические риски применения азотных удобрений // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19. № 2. С. 40–53. DOI: 10.32686/1812-5220-2022-19-2-40-53
3. Ortmeyer F., Hansen B. & Banning A. Groundwater nitrate problem and countermeasures in strongly affected EU countries – a comparison between Germany, Denmark and Ireland. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie. 2023. V. 28. P. 3–22. DOI: 10.1007/s00767-022-00530-5.
4. Bauwe A. and Lennartz B. Insights gained from two decades of intensive monitoring: hydrology and nitrate export in a tile-drained agricultural catchment. Front. Water. 2024. V. 6:1369552. DOI: 10.3389/frwa.2024.1369552.
5. Пироговская Г. В. Выщелачивание азота из пахотных почв Беларуси (по данным лизиметрических исследований (1981–2012 гг.)) // Агрохимия. 2016. № 3. С. 39–50.
6. Роль азота в интенсификации продукционного процесса сельскохозяйственных культур. Т. 2. Экологические аспекты роли азота в продукционном процессе / В. Г. Сычев, О. А. Соколов, А. А. Завалин, Н. Я. Шмырева. М.: ВНИИА, 2012. 272 с.

7. Безлюдный Н. Н., Денисов Т. Н., Петрович А. К. Миграция азота в профиле дерново-подзолистых почв БССР // *Агрохимия*. 1982. № 6. С. 12–17.
8. Варюшкина Н. М., Кирпанева Л. И. Трансформация азота удобрений при ежегодном их внесении в дерново-подзолистые почвы // *Почвоведение*. 1984. № 10. С. 116–120.
9. Соколов О. А., Семенов В. М., Агаев В. А. Нитраты в окружающей среде. Пушкино: ОНТИ, 1990. 316.
10. Веригина К. В. Влияние дренажа на вымывание питательных веществ из почвы // *Почвы Калининградской области*. Москва: Изд-во АН СССР. 1961. С. 146–158.
11. Докучаев Н. С. Исследование окислительно-восстановительных условий почв полейдеров Калининградской области в связи с их осушением и окультуриванием: автореф. дис... канд. сельхоз. наук: 532. Ленинград, 1968. 24 с.
12. Методические указания по комплексной диагностике азотного питания озимых зерновых культур. М.: Колос, 1984. 47 с.
13. Химизация земледелия Калининградской области за 40 лет (1966–2005) / В. И. Панасин [и др.]. Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2007. 140 с.
14. Панасин В. И., Слобожанинова В. Д., Долинина В. В. Запасы минерального азота в почвах Калининградской области в зависимости от их агрохимических и агрофизических свойств // *Вопросы сельского хозяйства: сборник научных трудов КГТУ*. Калининград. КГТУ, 1999. С. 132–138.
15. Определение потерь нитратов с дренажными водами. Информационный листок № 24-87 / В. И. Панасин, В. В. Широков, Л. В. Мизина. Калининград: ЦНТИ, 1987. 4 с.
16. Панасин В. И., Мизина Л. Ф. Экологическое состояние бассейна реки Преголи // *Теоретические и прикладные аспекты экологии и биологии: сборник научных трудов КГУ*. Калининград, КГУ. 2001. С. 3–13.
17. Панасин В. И., Мизина Л. Ф. Содержание нитратов в поверхностных водах Калининградской области // *Актуальные проблемы сельского хозяйства. Сборник научных трудов КГТУ*. Калининград: Изд-во КГТУ, 2002. С. 45–50.
18. Панасин В. И., Мизина Л. Ф., Рымаренко Д. А. Гидрохимический состав реки Гурьевки // *Сборник научных трудов КГУ*. Калининград, 2004. С. 72–76.
19. Панасин В. И. Беседа о нитратах. Калининград, 1992. 24 с.
20. Панасин В. И., Мизина Л. Ф., Рыжова Е. П. Токсикологическая обстановка на территории Калининградской области. Калининград, 1995. 33 с.
21. Динамика минерального азота под озимой пшеницей на фоне разных предшественников / Г. В. Горшнина, С. И. Новикова, О. М., Бедарева, Т. Н. Троян // *Проблемы региональной экологии*. 2020. № 2. С. 52–54. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-12052.
22. Анциферова О. А. Условия возникновения поверхностного накопления нитратов в осушаемых пахотных почвах // *Высокопродуктивное и экологически чистое агрохозяйство на мелиорированных землях: труды Международной научно-практической конференции, г. Тверь, 30 сентября 2019 г. Тверь, 2019. С. 134–140.*
23. Анциферова О. А. Влияние режима влажности на миграцию нитратов в осушенных почвах Самбийской равнины // *Плодородие почв России. Состояние, тенденции и прогноз: сборник трудов Международной научной конференции ВНИИ агрохимии, Москва, 26–27 ноября 2019 г. Москва, 2019. С. 21–26.*

24. Горбунова Ю. А. Поступление биогенных веществ с водосборного бассейна реки Преголи в Вислинский залив // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 1. С. 87–93.
25. Нагорнова Н. Н., Берникова Т. А., Цупикова Н. А. Гидрогеохимическая характеристика малых рек Калининградской области // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2011. Вып. 7. С. 160–166.
26. Домнин Д. А., Чубаренко Б. В. Оценка выноса биогенных веществ с малых водосборных бассейнов Калининградского / Вислинского залива посредством численного моделирования // Известия КГТУ. 2017. № 46. С. 13–23.
27. Содержание минеральных форм биогенных элементов в Куршском заливе в 2018 году / А. В. Сташко, В. В. Шендерюк, А. В. Касьян, С. В. Александров, Л. Л. Виноградова // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 111–121.
28. Оценка экологического состояния реки Гурьевки на основе гидрохимических данных и показателей фитопланктона / О. С. Бугранова, П. П. Буйняченко, Т. А. Берникова, С. А. Уманский // Известия КГТУ». 2019. № 55. С. 59–73.
29. Спирин Ю. А., Зотов С. И. Водотоки польдеров: методы исследований и геоэкологическая оценка. Калининград: НИЦ ИНФРА-М., 2023. 217 с.
30. Удобрение, технологии и урожай. Справочник агронома по химизации земледелия / В. И. Панасин [и др.]. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта. 2018. 315 с.

References

1. Kudeyarov V. N. Emissiya zakisi azota iz pochv v usloviyakh primeneniya udobreniy (analiticheskiy obzor) [Emission of nitrous oxide from soils under conditions of application of fertilizers (analytical review)]. *Pochvovedeniye*, 2020, no. 10, pp. 1192–1205. DOI: 10.31857/S0032180X2010010X.
2. Bashkin V. N. Ekologicheskiye riski primeneniya azotnykh udobreniy [Environmental risks of using nitrogen fertilizers]. *Problemy analiza riska*. 2022, vol. 19, no. 2, pp. 40–53. DOI: 10.32686/1812-5220-2022-19-2-40-53.
3. Ortmeyer F., Hansen B. & Banning A. Groundwater nitrate problem and countermeasures in strongly affected EU countries – a comparison between Germany, Denmark and Ireland. *Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*. 2023. V. 28. P. 3–22. DOI: 10.1007/s00767-022-00530-5.
4. Bauwe A. and Lennartz B. Insights gained from two decades of intensive monitoring: hydrology and nitrate export in a tile-drained agricultural catchment. *Front. Water*. 2024. V. 6:1369552. DOI: 10.3389/frwa.2024.1369552.
5. Pirogovskaya G. V. Vyshchelashchivanie azota iz pakhotnykh pochv Belarusi (po dannym lizimetricheskikh issledovaniy (1981–2012 gg.)) [Nitrogen leaching from arable soils of Belarus (according to lysimetric studies (1981–2012))]. *Agrokimiya*, 2016, no. 3, pp. 39–50.
6. Sychev V. G., Sokolov O. A., Zavalin A. A., Shmyreva N. Ya. *Rol' azota v intensivatsii produktsionnogo protsessa sel'skokhozyaystvennykh kul'tur. T. 2. Ekologicheskiye aspekty roli azota v produktsionnom protsesse* [The role of nitrogen in the intensification of the production process of agricultural crops. Vol. 2. Ecological aspects of the role of nitrogen in the production process]. Moscow, VNIIA, 2012, 272 p.

7. Bezlyudnyy N. N., Denisov T. N., Petrovich A. K. Migratsiya azota v profile dernovo-podzolistykh pochv BSSR [Nitrogen migration in the profile of sod-podzolic soils of the BSSR]. *Agrokimiya*, 1982, no. 6, pp. 12–17.
8. Varyushkina N. M., Kirpaneva L. I. Transformatsiya azota udobreniy pri ezhagodnom ikh vnesenii v dernovo-podzolistye pochvy [Transformation of nitrogen from fertilizers during their annual application to sod-podzolic soils]. *Pochvovedeniye*, 1984, no. 10, pp. 116–120.
9. Sokolov O. A., Semenov V. M., Agaev V. A. *Nitraty v okruzhayushchey srede* [Nitrates in the environment]. Pushchino, ONTI, 1990, 316 p.
10. Verigina K. V. Vliyaniye drenazha na vymyvanie pitatel'nykh veshchestv iz pochvy [Effect of drainage on the leaching of nutrients from the soil]. *Pochvy Kaliningradskoy oblasti*. Moscow, AN SSSR, 1961, pp. 146–158.
11. Dokuchaev N. S. *Issledovaniye okislitel'no-vosstanovitel'nykh usloviy pochvy pol'derov Kaliningradskoy oblasti v svyazi s ikh osusheniyem i okul'turivaniem*. Avtoref. diss. kand. sel'khoz. nauk [Study of oxidation-reduction conditions of soils of polders of the Kaliningrad region in connection with their drainage and cultivation. Abstract of dis. cand. of agricultural sci.]. Leningrad, 1968, 24 p.
12. Methodical instructions for complex diagnostics of nitrogen nutrition of winter grain crops. Moscow, Kolos Publ., 1984. 47 p. (In Russian).
13. Panasin V. I. et al. *Khimizatsiya zemledeliya Kaliningradskoy oblasti za 40 let (1966–2005)* [Chemicalization of agriculture in the Kaliningrad region over 40 years (1966–2005)]. Kaliningrad, FGOU VPO "KGTU", 2007, 140 p.
14. Panasin V. I., Slobozhaninova V. D., Dolinina V. V. Zapasy mineral'nogo azota v pochvakh Kaliningradskoy oblasti v zavisimosti ot ikh agrokhimicheskikh i agrofizicheskikh svoystv [Reserves of mineral nitrogen in soils of the Kaliningrad region depending on their agrochemical and agrophysical properties]. *Voprosy sel'skogo khozyaystva. Sbornik nauchnykh trudov KGTU* [Problems of agriculture. Collection of scientific papers of KSTU]. Kaliningrad, KGTU, 1999, pp. 132–138.
15. Panasin V. I., Shirokov V. V., Mizin L. V. *Opredeleeniye poter' nitratov s drenazhnymi vodami*. *Informatsionnyy listok № 24-87* [Determination of nitrate losses with drainage water. Information leaflet No. 24–87]. Kaliningrad, CNTI, 1987, 4 p.
16. Panasin V. I., Mizina L. F. *Ekologicheskoe sostoyanie basseyna reki Pregoli* [Ecological state of the Pregolya River basin]. *Teoreticheskie i prikladnye aspekty ekologii i biologii*. *Sbornik nauchnykh trudov KGU* [Theoretical and applied aspects of ecology and biology. Collection of scientific papers of KSU]. Kaliningrad, KGU, 2001, pp. 3–13.
17. Panasin V. I., Mizina L. F. *Soderzhaniye nitratov v poverkhnostnykh vodakh Kaliningradskoy oblasti* [Nitrate content in surface waters of the Kaliningrad region]. *Aktual'nyye problemy sel'skogo khozyaystva. Sbornik nauchnykh trudov KGTU* [Actual problems of agriculture. Collection of scientific papers of KSTU]. Kaliningrad. KSTU Publ., 2002, pp. 45–50.
18. Panasin V. I., Mizina L. F., Rymarenko D. A. *Gidrokhimicheskiy sostav reki Gur'yevki* [Hydrochemical composition of the Guryevka River]. *Sbornik nauchnykh trudov KGU* [Collection of scientific papers of KSU]. Kaliningrad, 2004, pp. 72–76.
19. Panasin V. I. *Beseda o nitratakh* [Conversation about nitrates]. Kaliningrad, 1992, 24 p.

20. Panasin V. I., Mizina L. F., Ryzhova E. P. *Toksikologicheskaya obstanovka na territorii Kaliningradskoy oblasti* [Toxicological situation in the Kaliningrad region]. Kaliningrad, 1995, 33 p.

21. Gorshinina G. V., Novikova S. I., Bedareva O. M., Troyan T. N. Dinamika mineral'nogo azota pod ozimoy pshenitsey na fone raznykh predshestvennikov [Dynamics of mineral nitrogen under winter wheat against the background of different predecessors]. *Problemy regional'noy ekologii*, 2020, no. 2, pp. 52–54. DOI: 10.24411/1728-323X-2020-12052.

22. Antsiferova O. A. Usloviya vzniknoveniya poverkhnostnogo nakopleniya nitratov v osushayemykh pakhotnykh pochvakh [Conditions for the occurrence of surface accumulation of nitrates in drained arable soils]. *Vysokoproduktivnoe i ekologicheski chistoe agrokhozyaystvo na meliorovannykh zemlyakh. Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, g. Tver', 30 sentyabrya 2019* [Proceedings of the International scientific and practical conference "Highly productive and environmentally friendly agricultural production on reclaimed lands", Tver, 30 September, 2019]. Tver', 2019, pp. 134–140.

23. Antsiferova O. A. Vliyanie rezhima vlazhnosti na migratsiyu nitratov v osushennykh pochvakh Sambiyskoy ravniny [Influence of moisture regime on nitrate migration in drained soils of the Sambian Plain]. *Plodorodiye pochv Rossii. Sostoyanie, tendentsii i prognoz. Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii VNII agrokhimii, 26–27 noyabrya 2019 g.* [Soil fertility in Russia. Status, trends and forecast. Collection of works of the International scientific conference at the All-Russian Research Institute of Agrochemistry, November 26–27, 2019]. Moscow, 2019, pp. 21–26.

24. Gorbunova Yu. A. Postupleniye biogenykh veshchestv s vodosbornogo basseyna reki Pregoli v Vislinskiy zaliv [Input of biogenic substances from the Pregolya River catchment basin to the Vistula Lagoon]. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta im. I. Kanta*, 2010, is. 1, pp. 87–93.

25. Nagornova N. N., Bernikova T. A., Tsupikova N. A. Gidrogeokhimi-cheskaya kharakteristika malykh rek Kaliningradskoy oblasti [Hydrogeochemical characteristics of small rivers in the Kaliningrad region]. *Vestnik Baltiyskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta*, 2011, is. 7, pp. 160–166.

26. Domnin D. A., Chubarenko B. V. Otsenka vynosa biogenykh veshchestv s malykh vodosbornykh basseynov Kaliningradskogo / Vislinskogo zaliva posredstvom chislennogo modelirovaniya [Assessment of the removal of nutrients from small catchment areas of the Kaliningrad / Vistula Lagoon using numerical modeling]. *Izvestiya KGTU*, 2017, no. 46, pp. 13–23.

27. Stashko A. V., Shenderyuk V. V., Kas'yan A. V., Aleksandrov S. V., Vinogradova L. L. Soderzhaniye mineral'nykh form biogenykh elementov v Kurshskom zalive v 2018 godu [Content of mineral forms of nutrients in the Curonian Lagoon in 2018]. *Izvestiya KGTU*, 2019, no. 55, pp. 111–121.

28. Bugranova O. S., Buynyachenko P. P., Bernikova T. A., Umanskiy S. A. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya reki Gur'evki na osnove gidrokhimicheskikh danykh i pokazateley fitoplanktona [Assessment of the ecological state of the Guryevka River based on hydrochemical data and phytoplankton indicators]. *Izvestiya KGTU*, 2019, no. 55, pp. 59–73.

29. Spirin Yu. A., Zotov S. I. *Vodotoki pol'derov: metody issledovaniy i geoekologicheskaya otsenka* [Polder watercourses: research methods and geoecological assessment]. Kaliningrad. NITS INFRA-M Publ., 2023, 217 p.

30. Panasin V. I. et al. *Udobreniye, tekhnologii i urozhay. Spravochnik agronoma po khimizatsii zemledeliya* [Fertilizer, technology and harvest. Agronomist's handbook on the chemicalization of agriculture]. Kaliningrad. Izd-vo BFU im. I. Kanta, 2018, 315 p.

Информация об авторах

О. А. Анциферова – доктор сельскохозяйственных наук, профессор
А. А. Басаргина – аспирант

Information about the author

O. A. Antsiferova – Doctor of Agricultural Sciences, Professor
A. A. Basargina – Post graduate student (PhD student)

Статья поступила в редакцию 25.01.2025; одобрена после рецензирования 30.01.2025; принята к публикации 13.02.2025.

The article was submitted 25.01.2025; approved after reviewing 30.01.2025; accepted for publication 13.02.2025.