

ФИТОЦЕНОЗЫ ТРАВ ВНЕПОЙМЕННЫХ ЛУГОВ В КАЧЕСТВЕ ВЕГЕТАТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ АЗОТОМ: ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

О. И. РОДЬКИН¹⁾, А. А. БУТЬКО¹⁾

¹⁾Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова,
Белорусский государственный университет,
ул. Долгобродская, 23/1, 220070, г. Минск, Беларусь

В исследовании представлены результаты оценки фитоэкстракционной способности фитоценозов трав внепойменных лугов в конструкции буферных полос, используемых для минимизации загрязнения водных экосистем азотом. Научная новизна работы заключается в установлении фитоэкстракционной способности фитоценозов трав в отношении азота, а также их влияния на потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации. Естественные фитоценозы представлены 312 ассоциациями трав, произрастающих на пяти растительных формациях (луговых пустошей (ЛП), нормальных суходольных лугов (НСЛ), суходольных временно избыточно увлажняемых лугов (СВИУЛ), заболоченных лугов (ЗЛ), торфяных лугов (ТЛ)). Биологическое накопление элемента в надземной фитомассе растительных ассоциаций варьирует от $50,3 \pm 17,1$ кг/га (СВИУЛ) до $56,4 \pm 23,9$ кг/га (НСЛ). Ценозы трав луговых пустошей обладают минимальным уровнем накопления азота, который составляет $5,2 \pm 2,5$ кг/га. Среди растительных формаций (НСЛ, СВИУЛ, ЗЛ, ТЛ) значимых отличий в уровнях аккумуляции азота не отмечено. Внутри растительных формаций НСЛ и ЗЛ выявлены значимые отличия в уровнях биологического накопления элемента ценозами трав. В растительных формациях НСЛ, СВИУЛ, ЗЛ, ТЛ аккумуляционная способность азота фитоценозами естественных лугов уступает аккумуляционной способности ивы белой на 43,2–49,6 %; в формации ЛП – 94,8 %. В двух ассоциациях трав значение фитоэкстракционной способности значительно превышает аккумуляционную способность ивы; в четырех ассоциациях трав значения аккумуляционной способности сопоставимы. Фитоценозы луговых пустошей обладают минимальным удельным потенциалом снижения критической нагрузки по эвтрофикации ($0,012 \cdot 10^{-2}$ – $0,033 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$). Другие растительные формации обладают более существенным удельным потенциалом, который в среднем составляет $0,187 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$, варьируя от $0,053 \cdot 10^{-2}$ до $0,528 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$. Результаты исследований могут быть востребованы при трансформации естественных ландшафтов, а также реализации конструкторских решений, связанных с проектированием искусственных ландшафтов, используемых для улучшения качества природных вод, а также максимизации будущих экосистемных услуг.

Ключевые слова: буферная полоса; фитоценозы трав водораздельных лугов; *Salix alba*; азот; продуктивность; фитоэкстракция; эвтрофикация.

Образец цитирования:

Родькин ОИ, Бутько АА. Фитоценозы трав внепойменных лугов в качестве вегетативных фильтров для минимизации загрязнения водных объектов азотом: потенциал использования. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2026;2:43–53.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-2-43-53>

For citation:

Rodzkin AI, Butsko AA. Phytocenoses of grasses of non-flood-plain meadows as vegetative filters for minimizing nitrogen pollution of water bodies: potential use. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2026;2:43–53. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2026-2-43-53>

Авторы:

Олег Иванович Родькин – доктор биологических наук, профессор; директор.
Андрей Анатольевич Бутько – кандидат биологических наук, доцент кафедры энергоэффективных технологий.

Authors:

Aleh I. Rodzkin, doctor science (biology), full professor; director.
aleh.rodzkin@rambler.ru
Andrei A. Butsko, PhD (biology), associate professor at the department of energy efficient technologies.
butko_andrei@mail.ru

PHYTOCENOSSES OF GRASSES OF NON-FLOODPLAIN MEADOWS AS VEGETATIVE FILTERS FOR MINIMIZING NITROGEN POLLUTION OF WATER BODIES: POTENTIAL USE

A. I. RODZKIN^a, A. A. BUTSKO^a

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus
Corresponding author: A. A. Butsko (butko_andrei@mail.ru)

This article presents the results of an assessment of the phytoextraction capacity of grass communities in non-floodplain meadows within the design of buffer strips used to minimize nitrogen pollution of aquatic ecosystems. The scientific novelty of this study lies in establishing the phytoextraction capacity of grass communities for nitrogen, as well as their impact on the potential for reducing the critical load of eutrophication. Natural phytocenoses are represented by 312 grass associations growing in five plant formations (meadow heathlands (MH), normal dry meadows (NDM), dry temporarily excessively wet meadows (DTEWM), swampy meadows (SM), and peat meadows (PM)). Biological accumulation of the element in the aboveground phytomass of plant associations varies from 50.3 ± 17.1 kg/ha (DTEWM) to 56.4 ± 23.9 kg/ha (NDM). Meadow heathland grass communities have a minimum nitrogen accumulation level of 5.2 ± 2.5 kg/ha. No significant differences in nitrogen accumulation levels were found among the plant communities (NDM, TRIWM, SM, and PM). Within the NDM and SM plant communities, significant differences in the levels of biological accumulation of the element were found among the grass communities. In the plant formations NDM, TRIWM, SM, PM, the nitrogen accumulation capacity of natural meadow phytocenoses is inferior to the accumulation capacity of white willow by 43.2–49.6 %; in the MH formation – 94.8 %. In two grass associations, the phytoextraction capacity significantly exceeds the accumulating capacity of willow. The four grass associations have comparable accumulation capacity values. Meadow heathland phytocenoses have the lowest specific potential for reducing the critical load for eutrophication ($0.012 \cdot 10^{-2}$ – $0.033 \cdot 10^{-2}$ eq. kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{m}^2$). Other plant formations have a more significant specific potential, averaging $0.187 \cdot 10^{-2}$ eq. kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{m}^2$, ranging from $0.053 \cdot 10^{-2}$ to $0.528 \cdot 10^{-2}$ eq. kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{m}^2$. The research results may be useful in transforming natural landscapes, as well as implementing design solutions related to the design of artificial landscapes used to improve the quality of natural waters and maximize future ecosystem services.

Keywords: buffer strip; phytocenoses of grasses of watershed meadows; *Salix alba*; nitrogen; productivity; phytoextraction; eutrophication.

Введение

Водные ресурсы являются национальным достоянием во всех странах мира и относятся к ключевым показателям устойчивого развития общества в социальных, экономических и экологических аспектах. Анализ многолетних рядов данных мониторинга поверхностных вод свидетельствуют о том, что приоритетными веществами, избыточные концентрации которых чаще других фиксировались в воде поверхностных водных объектов Республики Беларусь, являются биогенные элементы (соединения азота, фосфора) [1]. Значительное количество загрязняющих веществ поступает в водные объекты вследствие диффузного загрязнения со сточными, тальными и дождевыми водами с сельскохозяйственных территорий [2]. Это связано с расширением использования неорганических азотных и фосфорных удобрений, что приводит к избыточному содержанию азота и фосфора в природных водах и эвтрофикации поверхностных водных объектов [3; 4].

Своеобразие процесса антропогенного эвтрофирования предъявляют особые требования к выбору путей и методов контроля¹, а также защиты водных экосистем [5]. Конструирование и управление вегетативными фильтрами является одним из ключевых методов по смягчению негативного воздействия химизации сельского хозяйства на окружающую среду [6], что достигается путем накопления биогенных элементов с территории сельскохозяйственных угодий в фитоценозах и сокращения их поступления в водные объекты [7; 8]. Вегетативные фильтры создаются из уже существующей естественной растительности либо из искусственных насаждений [9].

Известно, что потенциал управления водными ресурсами в снижении концентрации питательных веществ в поверхностном стоке может варьироваться в зависимости от типа растительности и их характеристик [10]. Обобщенные результаты обзора литературы свидетельствуют о том, что эффективность поглощения азота в комбинированных вегетативных фильтрах из древесной и травянистой растительности варьирует от 75 до 95 %; травянистой растительности от 4 до 70 % [11].

Сведения об эффективности поглощения питательных веществ различными типами растительности достаточно противоречивы. Проведенными исследованиями [12; 13] установлено как минимальное и (или)

¹РД 52.24.620-2000. Методические указания. Охрана природы. Гидросфера. Организация и функционирование подсистемы мониторинга антропогенного эвтрофирования пресноводных экосистем. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. 39 с.

нулевое, так и значимые различия влияния типа растительности на эффективность удаления питательных веществ [14], причем последние указывают на значительную эффективность травянистой растительности. Достоверно известно, что фиторемедиационная эффективность вегетативных фильтров определяется основными факторами: биологической продуктивностью растений и их аккумулирующей способностью в отношении загрязнителя [15–17].

Цель исследования – изучение аккумулирующей способности естественных фитоценозов трав водораздельных лугов в отношении азота, а также их потенциального влияния на снижение уровня эвтрофикации.

Материалы и методы исследований

Естественные фитоценозы представлены 312 ассоциациями трав, произрастающих на 5 растительных формациях. Растительная формация луговых пустошей представлена 4 фитоценозами: нормальных суходольных лугов – 41 фитоценоз, суходольных временно избыточно увлажняемых лугов – 120, заболоченных лугов – 110, торфяных лугов – 37 [18].

Аккумуляция азота фитоценозами рассчитана по показателям биологической продуктивности надземной фитомассы растений за период вегетации и содержания в них сырого протеина:

$$N_{ак} = БП \cdot (СП/6,25),$$

где $N_{ак}$ – аккумуляция азота фитоценозом, кг/га; БП – биологическая продуктивность надземной фитомассы, ц/га; СП – массовая доля сырого протеина в сухом веществе, %; 6,25 – коэффициент пересчета общего содержания азота на сырой протеин.

В основе определения массовой доли сырого протеина в сухом веществе лежит титриметрический метод определения азота по Кьельдалю². Сведения об аккумулирующей способности ивы белой (*Salix alba* L.) получены на основании данных вегетационного и полевого опытов проведенных в 2008–2025 гг. [19; 20].

Потенциальное снижение критической нагрузки на водный объект по эвтрофикации растительностью определено на основании стехиометрического подхода, при котором устанавливается эквивалентность макропитательных веществ на основе их появления в фитомассе [21].

Статистический и графический анализ результатов исследований выполнен с использованием *Statistica v.10*. Дисперсионный анализ (ANOVA) осуществлен методом апостериорного сравнения средних неравных выборок (Unequal N HSD) при уровне значимости 0,05. Проверка гипотезы о нормальности распределения методом Шапиро – Уилка.

Результаты исследования и их обсуждение

Содержание азота в надземной фитомассе трав луговых пустошей составляет $7,58 \pm 1,62$ г/кг (рис. 1).

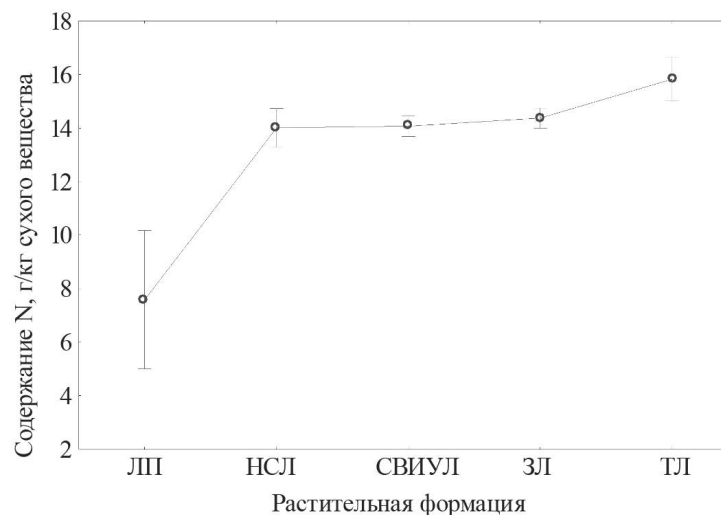


Рис. 1. Содержание азота в фитоценозах растительных формаций: ЛП – луговые пустоши, НСЛ – нормальные суходольные луга, СВИУЛ – судольные временно избыточно увлажняемые луга, ЗЛ – заболоченные луга, ТЛ – торфяные луга

Fig. 1. Nitrogen content in phytocenoses of plant formations: MP – meadow wastelands, NDM – normal dry meadows, DMTEM – dry meadows with temporary excessive moisture, SM – swampy meadows, PM – peat meadows

²ГОСТ 13496.4–2019. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. Введ. РБ 10.04.2020. Москва: Стандартинформ, 2019. 24 с.

Среди ценозов максимальным содержанием азота обладает булавоносец седоватый (9,06 г/кг) на дерново-слабоподзоленных песчаных почвах, минимальным – булавоносец седоватый+овсяница полеская (5,54 г/кг) на дерново-слабоподзоленных оглеенных внизу песчаных почвах.

Содержание азота в надземной фитомассе трав суходольных избыточно увлажняемых лугов в среднем составляет $14,07 \pm 2,13$ г/кг (рис. 1). В ценозе черноголовка + манжетка + василек луговой + иван-да-марья на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых почвах, отмечено максимальное содержание азота (18,21 г/кг). Среди других ассоциаций повышенным содержанием элемента обладают разнотравье + люцерна серповидная (17,41 г/кг) и щучка дернистая + овсяница красная + разнотравье + мышиный горошек + клевер луговой (17,95 г/кг) на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых почвах; полевица Сырейщикова + овсяница луговая + разнотравье (17,41 г/кг) на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, песчаных и рыхлосупесчаных почвах; гребенник обыкновенный + овсяница луговая + душистый колосок + щавель кислый + лютик едкий (17,38 г/кг) на дерново-глееватых связносупесчаных почвах. В ассоциации лютик ползучий + клевер луговой + щучка дернистая + тимopheевка луговая + овсяница красная на дерново (перегнойно)-глееватых с намытым верхом суглинистых почвах содержание элемента достигает минимального значения (7,39 г/кг). Пониженным содержанием азота обладают ценозы на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, супесчаных почвах – щучка дернистая + душистый колосок+овсяница красная + василек луговой + погребок большой (9,34 г/кг); на дерново-глееватых связносупесчаных почвах – лютики + погребок большой+тимopheевка луговая + щучка дернистая (9,60 г/кг).

Дисперсионный анализ свидетельствует о значимых отличиях в уровнях содержания азота между ценозами трав произрастающих на дерново (перегнойно)-глееватых карбонатных супесчаных, рыхлосупесчаных почвах и фитоценозами на дерново-перегнойно-карбонатных глееватых суглинистых почвах, в которых средний уровень содержания элемента составил $13,43 \pm 0,82$ и $15,98 \pm 1,13$ г/кг соответственно. На других почвах колебания уровня азота в ценозах относительно среднего значения не превышает 5 %.

Содержание азота в надземной фитомассе трав заболоченных лугов в среднем составляет $14,37 \pm 1,95$ г/кг (рис. 1). На дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых почвах, отмечено максимальное содержание азота 18,72 г/кг (хвощ луговой + таволга вязолистная + осока обыкновенная); суглинистых и супесчаных почвах 18,27–18,67 г/кг (подмаренник настоящий + василек луговой, осока обыкновенная, вахта+клевер гибридный). Минимальным содержанием обладает лапчатка прямая+молиния голубая (5,71 г/кг) на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, рыхлосупесчаных и песчаных почвах. Среди других ценозов пониженное содержание элемента выявлено на торфянисто-глееватых почвах низинного типа в ассоциациях сабельник болотный + осока просьяная + осока обыкновенная (6,34 г/кг), болотное разнотравье + осока пузырчатая + осока сжатая и вейник незамечаемый + полевица собачья + осока сжатая (6,66 г/кг).

В фитоценозах на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, рыхлосупесчаных и песчаных почвах средний уровень азота ниже на 5,3 % по отношению к среднему уровню в растительной формации. На других почвах (дерново-карбонатных, дерново (перегнойно)-глееватых выщелочных, дерново-подзолисто-глееватых, торфянисто глееватых) колебания уровня не превышают 5 %.

Содержание азота в надземной фитомассе трав торфяных лугов в среднем составляет $15,83 \pm 2,46$ г/кг (рис. 1). В ценозах на торфяно-болотных почвах низинного типа на древесных торфах отмечено наибольшее содержание азота. В ассоциациях хвощ болотный + осока просьяная + осока желтая и вахта + таволга вязолистная + осока острая + острая просьяная содержание элемента достигает максимального значения (19,82–20,48 г/кг). На торфяно-болотных почвах с намытым верхом содержание азота в ценозах минимальное (7,54–8,22 г/кг): мелкие осоки + овсяница красная + хвощ + лютики, лютики + клевер шведский + щучка дернистая, лисохвост луговой + овсяница луговая + клевер гибридный + вахта + горец почечуйный.

Между ценозами на торфяно-болотных почвах низинного типа на древесных торфах, тростниковых торфах и древесных торфах с намытым верхом выявлены значимые отличия, в которых содержания элемента составил $18,52 \pm 2,15$, $13,64 \pm 0,92$ и $12,70 \pm 0,57$ г/кг соответственно.

Колебание уровня азота среди ассоциаций на торфяно-глееватых почвах на черноольховых и осоковых торфах не превышает 5 %. В других ассоциациях колебание уровня варьирует от 7,5 % на торфяно-болотных почвах на черноольховых торфах до 19,8 % на древесных торфах с намытым верхом.

Среднегодовая биологическая продуктивность фитоценозов луговых пустошей составляет $6,7 \pm 2,0$ ц/га сухого вещества, варьируя от 4,7 до 8,7 ц/га (рис. 2).

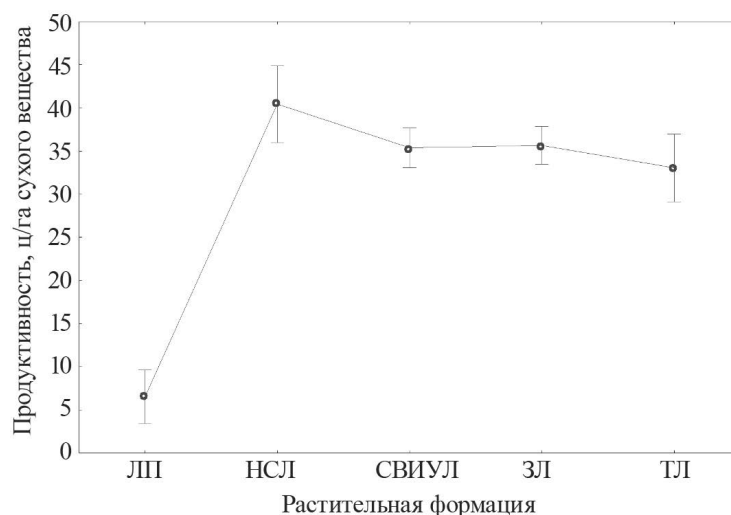


Рис. 2. Биологическая продуктивность фитоценозов растительных формаций: ЛП – луговые пустоши, НСЛ – нормальные суходольные луга, СВИУЛ – суходольные временно избыточно увлажняемые луга, ЗЛ – заболоченные луга, ТЛ – торфяные луга

Fig. 2. Biological productivity of phytocenoses of plant formations: MP – meadow wastelands, NDM – normal dry meadows, DMTEM – dry meadows with temporary excessive moisture, SM – swampy meadows, PM – peat meadows

Ценозы на дерново-слабоподзоленных песчаных почвах обладают наибольшей продуктивностью, которая в среднем составляет 8,2 ц/га (булавоносец седоватый). Минимальной продуктивностью обладают ассоциации на дерново-слабоподзоленных оглеенных внизу песчаных почвах – булавоносец седоватый + овсяница полеская, тонконог сизый + булавоносец седоватый (4,1–5,1 ц/га).

Среднегодовая биологическая продуктивность фитоценозов нормальных суходольных лугов составляет $39,7 \pm 14,0$ ц/га сухого вещества, варьируя от 14,6 до 62,9 ц/га (рис. 2). Максимальной продуктивностью (61,5–62,9 ц/га) обладают ассоциации на дерново палево-подзолистых глееватых суглинистых почвах (манжетка пастушья + василек луговой + душистый колосок + овсяница луговая); дерново палево-подзолистых временно увлажняемых суглинистых и связносупесчаных почвах (клевер ползучий (белый)), легкосуглинистых и связносупесчаных почвах (ежа сборная + тимopheевка луговая + душистый колосок + подорожник ланцетолистный + кульбаба осенняя + василек луговой). Минимальной продуктивностью обладают ценозы на дерново палево-подзолистых временно увлажняемых супесчаных и песчаных почвах 14,6 ц/га (манжетка пастушья + бедренец камнеломка + трясунка + белоус), суглинистых и связносупесчаных почвах 16,9 ц/га (василек луговой + черноголовка + белоус); на дерново палево-подзолистых оглеенных легкосуглинистых и связносупесчаных почвах 19,6 ц/га (полевица обыкновенная + василек луговой + погребок большой + овсяница красная + белоус; на дерново палево-подзолистых глееватых суглинистых почвах 24,9 ц/га (подорожник ланцетолистный + погребок большой + трясунка + душистый колосок + овсяница луговая). На дерново палево-подзолистых временно увлажняемых суглинистых и связносупесчаных почвах продуцирование фитомассы выше на 51,3 % чем на супесчаных и песчаных почвах.

Колебание уровня средней продуктивности среди ассоциаций на дерново палево-подзолистых глееватых суглинистых почвах, легкосуглинистых, суглинистых, связносупесчаных почвах и временно увлажняемых суглинистых и связносупесчаных почвах не превышает 4,8 %.

Среднегодовая биологическая продуктивность фитоценозов суходольных избыточно увлажняемых лугов составляет $35,4 \pm 12,8$ ц/га сухого вещества, варьируя от 15,3 до 73,5 ц/га (см. рис. 2). Ценозы на дерново (перегнойно)-глееватых с намытым верхом суглинистых почвах и дерново (перегнойно)-глееватых карбонатных суглинистых и супесчаных почвах обладают наибольшей продуктивностью, которая в среднем составляет $44,5 \pm 13,7$ и $43,8 \pm 13,4$ ц/га. На данных почвах наибольшей продуктивностью обладают клевер луговой + полевица обыкновенная (69,7 ц/га) и разнотравье + овсяница луговая + ежа сборная + мышиный горошек + люцерна серповидная (66,7 ц/га).

Значительной продуктивностью обладают ассоциации на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, песчаных и рыхлосупесчаных почвах (разнотравье + клевер луговой + щучка дернистая + овсяница луговая (71,9 ц/га)), супесчаных (клевер луговой + горец шерстистый + погребок большой + тимopheевка луговая + овсяница луговая (73,5 ц/га)), суглинистых и глинистых (райграсс высокий + люцерна серповидная (71,4 ц/га)). На супесчаных почвах средняя продуктивность ценозов

достигает максимального уровня ($37,4 \pm 14,6$ ц/га), который выше чем на суглинистых и глинистых почвах на 6,4 %; песчаных и рыхлосупесчаных на 17,9 %.

Минимальная продуктивность наблюдается в ценозах на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых почвах 15,3 ц/га (черноголовка + манжетка + василек луговой + иван-да-марья); песчаных и рыхлосупесчаных почвах 18,2 ц/га (бхарник шерстистый + щучка дернистая+осокапросяная+осокаобыкновенная+разнотравье(подорожникланцетолистный+подорожник большой); на дерново-подзолисто-глееватых суглинистых и связносупесчаных почвах 17,5 ц/га (разнотравье + трехзубка + белоус), супесчаных и песчаных почвах 17,5 ц/га (бухарник + овсяница луговая + разнотравье (василек луговой + подорожник ланцетолистный)).

В уровнях продуцирования фитомассы выявлены значимые отличия между ценозами на дерново-подзолисто-глееватых супесчаных и песчаных почвах, в которых показатель продуктивности $27,2 \pm 1,7$ ц/га, и ценозами на дерново-глееватых связносупесчаных почвах, дерново (перегнойно)-глееватых с намытым верхом суглинистых почвах со средним показателем $44,0 \pm 11,5$ ц/га. В других ценозах внутри растительной формации значимых отличий не выявлено.

На заболоченных лугах средняя продуктивность ценозов соответствует продуктивности полученной на суходольных избыточно увлажняемых лугах, показатель которой составляет $35,4 \pm 12,4$ ц/га сухого вещества, варьируя от 15,3 до 68,7 ц/га (рис. 2). Наименьшей продуктивностью обладают ценозы на дерново-перегнойно-глеевых, иногда выщелочных, рыхлосупесчаных и песчаных почвах ($23,9 \pm 9,3$ ц/га) и торфянисто-глеевых почвах низинного типа на осоково-гипновых торфах ($24,6 \pm 3,0$ ц/га). Минимальная продуктивность в ассоциациях на рыхлосупесчаных и песчаных почвах 12,4 ц/га (лютик прищинец + подмаренник болотный + осока обыкновенная); на осоково-гипновых торфах 21,1 ц/га (разнотравье + осока просяная + о. обыкновенная). Показатель максимальной продуктивности составляет 28,4 ц/га (калужница + вейник незамечаемый) и 41,1 ц/га (погремок большой+хвощ болотный). Среди ценозов значительным уровнем продуктивности на торфянисто-глеевых почвах обладает осока острая (66,2 ц/га); на дерново-перегнойно-глеевых, иногда выщелочных, суглинистых и супесчаных почвах лисохвост луговой + овсяница луговая + клевер гибридный + вахта + горец почечуйный (68,7 ц/га).

Колебание уровня продуцирования фитомассы среди ассоциаций на дерново карбонато-глеевых почвах, дерново подзолисто-глеевых почвах, дерново-перегнойно-глеевых, иногда выщелочных почвах, а также торфянисто-глеевых почвах не превышает 4,5 %.

На торфяных лугах продуктивность ценозов составляет $32,9 \pm 12,1$ ц/га сухого вещества, варьируя от 16,6 до 68,8 ц/га (рис. 2). В ассоциациях на торфяно-болотных почвах низинного типа на древесных торфах с намытым верхом показатели продуктивности максимальны и составляют от 39,0 (мелкие осоки + овсяница красная + хвощ + лютики) до 68,8 ц/га (лисохвост луговой + овсяница луговая+клевер гибридный + вахта + горец почечуйный). Минимальная продуктивность наблюдается в ценозах на торфяно-глеевых почвах низинного типа на осоковых торфах 16,7 ц/га (осока острая), черноольховых торфах 18,8 ц/га (пушица многоколосковая + осока сероватая; торфяно-болотных почвах низинного типа на древесных торфах 20,3 ц/га (хвощ болотный + осока желтая + осока обыкновенная), тростниковых торфах 22,3 ц/га (лапчатка прямая + гравилат речной + таволга вязолистная, ситник развесистый), на гипновых торфах 24,3 ц/га (таволга вязолистная + осока дернистая).

Между ценозами на торфяно-глеевых и торфяно-болотных почвах низинного типа значимых отличий в уровнях продуцирования фитомассы не выявлено, при этом колебание среднего уровня варьирует от 6,4 (торфяно-болотные почвы низинного типа на древесных торфах) до 60 % (торфяно-болотные почвы низинного типа на древесных торфах с намытым верхом).

Биологическая аккумуляция азота в ценозах луговых пустошей в среднем составляет $5,2 \pm 2,5$ кг/га, варьируя от 2,8 кг/га (булавоносец седоватый + овсяница полесская) до 7,9 кг/га (булавоносец седоватый).

Аккумуляция азота ценозами нормальных суходольных лугов в среднем составляет $56,4 \pm 23,9$ кг/га. Минимальным уровнем выноса элемента (18,8–19,2 кг/га) обладают ассоциации василек луговой + черноголовка + белоус, манжетка пастушья + бедренец камнеломка + трясунка + белоус; максимальным уровнем – разнотравье (манжетка пастушья + василек луговой) + душистый колосок + овсяница луговая (97,7 кг/га), клевер красный + полевица обыкновенная (100,6 кг/га).

Между ценозами на дерново палево-подзолистых временно увлажняемых супесчаных и песчаных почвах и ценозами на глееватых суглинистых почвах установлены значимые отличия в уровнях биологического выноса азота с надземной фитомассой растений (табл. 1). На супесчаных и песчаных почвах вынос элемента в среднем составляет $26,8 \pm 6,2$ кг/га, а на глееватых суглинистых почвах $73,1 \pm 21,9$ кг/га.

Биологическая аккумуляция азота ценозами суходольных временно избыточно увлажняемых лугов в среднем составляет $50,2 \pm 20,7$ кг/га. Минимальный уровень выноса элемента сопоставим со значениями в ценозах на нормальных суходольных лугах, который составил 18,8–19,4 кг/га (василек луговой + черноголовка + белоус, разнотравье + трехзубка + белоус). Максимальным уровнем выноса азота отмечены

ассоциации, в состав которых входит люцерна серповидная (люцерна серповидная + разнотравье + ежа сборная + трясунка ($103,8 \pm 22,7$ кг/га), разнотравье + овсяница луговая + ежа сборная + мышиный горошек + люцерна серповидная ($105,4$ кг/га), райграс высокий + люцерна серповидная ($124,5$ кг/га).

Необходимо отметить, что ценозы на дерново (перегнойно)-глееватых карбонатных суглинистых, супесчаных и с намытым верхом суглинистых почвах обладают наибольшим показателем биологического выноса азота ($63,5 \pm 22,7$ кг/га); минимальным – ценозы на дерново-подзолисто-глееватых суглинистых, связносупесчаных, супесчаных, песчаных почвах ($39,7 \pm 16,7$ кг/га). Влияние типов почв и их механического состава на уровень биологического выноса азота внутри растительной формации не выявлено (табл. 1).

Таблица 1

Результаты дисперсионного анализа влияния почв внепойменных лугов
на биологический вынос азота растительными формациями

Table 1

Results of dispersion analysis of the influence of soils of non-floodplain meadows
on the biological removal of nitrogen by plant formations

	ЛП		НСЛ		СВИУЛ		ЗЛ		ТЛ	
	Тип почвы	Механическое состояние почвы	Тип почвы	Механическое состояние почвы	Тип почвы	Механическое состояние почвы	Тип почвы	Механическое состояние почвы	Тип почвы	Механическое состояние почвы
D. f.	–	–	1	2	1	4	3	5	1	–
SS	–	–	57,5	3560,6	607,5	2823,0	209,9	4981,1	338,8	–
MS	–	–	57,5	1780,3	607,5	705,7	70,0	996,2	338,8	–
F	–	–	0,133	4,129	1,560	1,812	0,231	3,798	1,002	–
P-value	–	–	0,717	0,024	0,214	0,132	0,875	0,003	0,324	–
η_p^2	–	–	0,004	0,187	0,014	0,062	0,007	0,156	0,028	–
Obs. power	–	–	0,065	0,693	0,236	0,536	0,092	0,927	0,164	–

Примечание. D. f. – степень свободы, SS – сумма квадратов, MS – сумма квадратов внутри групп, F – критерий Фишера, P-value – p-уровень, η_p^2 – частичный эта-квадрат, Obs. power – наблюдаемая мощность.

Биологическая аккумуляция азота ценозами заболоченных лугов в среднем составляет $50,3 \pm 17,1$ кг/га. По отношению к ценозам на нормальных суходольных и суходольных временно избыточно увлажняемых лугах минимальный и максимальный уровень выноса азота несколько уступают (лапчатка прямая + молиния голубая ($12,4$ кг/га), подорожник + лапчатка прямая + овсяница красная ($17,3$ кг/га); лисохвост луговой + овсяница луговая + клевер гибридный + вахта + горец почечуйный ($90,4$ кг/га), осока острая ($91,7$ кг/га), сабельник болотный + осока пузырчатая ($101,4$ кг/га)).

Установлено, что в ценозах на дерново-перегнойно-глеевых, иногда выщелочных, суглинистых и супесчаных почвах уровень выноса элемента значительно превосходит уровень аккумуляции на рыхлосупесчаных и песчаных почвах (табл. 1), значения которых составляют $54,7 \pm 15,7$ и $31,6 \pm 19,1$ кг/га соответственно.

Биологическая аккумуляция азота ценозами торфяных лугов в среднем составляет $52,0 \pm 18,3$ кг/га. Минимальный уровень биологического выноса азота в ценозах торфяных лугов (пушица многоколосковая + осока сероватая, хвощ болотный + мелкие осоки (просяная и желтая), ситник скученный + ситник развесистый) в среднем на 37 % выше, чем в ценозах нормальных суходольных, суходольных временно избыточно увлажняемых и заболоченных лугов. В свою очередь показатель максимального выноса элемента ценозами (хвощ болотный + осока просяная + осока обыкновенная, осока острая, лисохвост луговой + овсяница луговая + клевер гибридный + вахта + горец почечуйный) уступает аналогичному показателю на 15 %. Влияние типов почв и их механического состава на уровень биологического выноса азота внутри растительной формации не выявлено (см. табл. 1).

Фитоценозы луговых пустошей обладают минимальным удельным потенциалом снижения критической нагрузки по эвтрофикации ($0,012 \cdot 10^{-2}$ – $0,033 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$), что, в первую очередь, обусловливается низкой биологической продуктивностью растительных ассоциаций. Другие растительные формации обладают более существенным удельным потенциалом, который в среднем составляет $0,187 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$ варьируя от $0,053 \cdot 10^{-2}$ до $0,528 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$ (табл. 2).

Таблица 2

Удельный потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации растительными формациями водораздельных лугов, экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$

Table 2

Specific potential for reducing the critical load of eutrophication by plant formations of watershed meadows, eq. kg $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$

Растительная формация	<i>n</i>	$\bar{X} \cdot 10^{-2}$	$\sigma \cdot 10^{-2}$	Min $\cdot 10^{-2}$	Max $\cdot 10^{-2}$
Луговые пустоши	4	0,022	0,011	0,012	0,033
Нормальные суходольные луга	41	0,239	0,101	0,080	0,426
Суходольные временно избыточно увлажняемые луга	120	0,212	0,087	0,080	0,528
Заболоченные луга	110	0,213	0,073	0,053	0,430
Торфяные луга	37	0,221	0,078	0,115	0,383

Примечание. *n* – количество фитоценозов, $\bar{X}$ – среднее арифметическое, σ – среднеквадратическое отклонение, Me – медиана; Min – минимальное, Max – максимальное.

Удельный потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации ивой белой в среднем составляет $0,421 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$ управляемой полосы, варьируя в диапазоне $0,292 \cdot 10^{-2}$ – $0,473 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$.

Среди фитоценозов трав превосходящим показателем среднего удельного потенциала ивы белой обладают клевер красный + полевица обыкновенная ($0,426 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново-палево-подзолистой суглинистой почве (НСЛ); разнотравье + овсяница луговая + ежа сборная + мышиный горошек + люцерна серповидная ($0,447 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$), люцерна серповидная + разнотравье + ежа сборная + трясунка ($0,440 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново (перегнойно)-глееватых карбонатных суглинистых и супесчаных почвах; райграс высокий + люцерна серповидная ($0,528 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых почвах; клевер луговой + полевица обыкновенная ($0,424 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново (перегнойно)-глееватых с намытым верхом суглинистых почвах (СВИУЛ); сабельник болотный+осока пузырчатая ($0,430 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на торфянисто-глеевых почвах низинного типа на черноольховых торфах (ЗЛ).

Значительным потенциалом обладают ассоциации:

– нормальных суходольных лугов: манжетка пастушья + василек луговой + душистый колосок + овсяница луговая, разнотравье + полевица обыкновенная, разнотравье + полевица обыкновенная + овсяница красная + овсяница луговая ($0,340 \cdot 10^{-2}$ – $0,417 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново-палево-подзолистой суглинистой почве; ежа сборная + тимopheевка луговая + душистый колосок + подорожник ланцетолистный + кульбаба осенняя + василек луговой ($0,400 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново-палево-подзолистой оглеенной легкосуглинистой и связносупесчаной почве; разнотравье + ежа сборная + овсяница луговая, звездчатка злачная + поповник обыкновенный + погребок большой + клевер луговой + трясунка, поповник обыкновенный + тысячелистник обыкновенный + тимopheевка луговая+щучка дернистая + овсяница луговая + овсяница красная, клевер ползучий+лютик едкий + тимopheевка луговая + овсяница луговая, клевер ползучий (белый), погребок большой + овсяница луговая + тимopheевка луговая ($0,309 \cdot 10^{-2}$ – $0,372 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново-палево-подзолистой временно увлажняемой суглинистой и связносупесчаной почве;

– суходольных временно избыточно увлажняемых лугов: клевер красный + овсяница луговая + овсяница красная + гусятная лапка + лютик едкий + раковые шейки ($0,293 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново-перегнойно-карбонатных глееватых суглинистых почвах; тимopheевка луговая + щучка дернистая + овсяница красная + овсяница луговая ($0,327 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$), клевер ползучий + щучка дернистая ($0,298 \cdot 10^{-2}$ экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$) на дерново-подзолисто-глееватых суглинистых и связносупесчаных почвах;

клевер ползучий + щучка дернистая клевер красный + овсяница луговая + овсяница красная + гусиная лапка + лютик едкий + раковые шейки ($0,293 \cdot 10^2$ – $0,298 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2), клевер луговой + горец шерстистый + погребок большой + тимopheевка луговая + овсяница луговая, погребок большой + овсяница луговая + тимopheевка луговая, разнотравье + люцерна серповидная, щучка дернистая + овсяница красная + разнотравье + мышиный горошек + клевер луговой ($0,356 \cdot 10^2$ – $0,382 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых супесчаных почвах; разнотравье + клевер луговой + щучка дернистая + овсяница луговая ($0,390 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, песчаных и рыхлосупесчаных почвах; трясунка + овсяница луговая + манжетка пастушья + василек, гребенник обыкновенный + овсяница луговая + душистый колосок + щавель кислый + лютик едкий, василек луговой + погребок большой + хвощ луговой + душистый колосок + тимopheевка луговая + овсяница луговая ($0,299 \cdot 10^2$ – $0,351 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на дерново-глееватых связносупесчаных почвах; мятлик луговой + клевер ползучий ($0,324 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на дерново (перегнойно)-глееватых с намытым верхом суглинистых почвах;

– заболоченных лугов: разнотравье (лютик едкий) + чина луговая ($0,363 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на дерново-карбонатно-глеевых суглинистых почвах; разнотравье (хвощ луговой + таволга вязолистная) + осока обыкновенная ($0,360 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на дерново (перегнойно)-глеевых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых почвах; подмаренник настоящий + василек луговой, хвощ топяной + осока острая, клевер луговой + чина луговая + василистник узколистый, тимopheевка луговая + василек луговой + таволга вязолистная + вербейник обыкновенный, таволга вязолистная + щучка дернистая + осока острая + о. обыкновенная, осока острая + таволга вязолистная + бодяк речной, овсяница красная + подмаренник настоящий + щавель кислый, осока обыкновенная, лютик прищинец + мятлик луговой, осока обыкновенная + полевица Сырейщикова + щучка дернистая, валериана пышная + таволга вязолистная + раковые шейки, погребок большой + лютик ползучий + овсяница красная + полевица гиганская + щучка дернистая, лисохвост луговой + овсяница луговая + клевер гибридный + вахта + горец почечуйный ($0,332 \cdot 10^2$ – $0,389 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на дерново (перегнойно)-глеевых, иногда выщелочных, суглинистых и супесчаных почвах; осока острая + хвощ топяной, осока острая ($0,292 \cdot 10^2$ – $0,383 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на торфянисто-глеевых почвах низинного типа на осоковых торфах;

– торфяных лугов: хвощ болотный + осока просяная + осока обыкновенная, вейник замечаемый + осока пузырчатая ($0,353 \cdot 10^2$ – $0,359 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на торфяно-глеевых почвах низинного типа на черноольховых торфах; таволга вязолистная ($0,300 \cdot 10^2$ – $0,325 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на торфяно-болотных почвах низинного типа на древесных торфах; лисохвост луговой + овсяница луговая + клевер гибридный + вахта + горец почечуйный ($0,325 \cdot 10^2$ экв. кг PO_4^{3-}/m^2) на торфяно-болотных почвах низинного типа на древесных торфах с намытым верхом.

Заключение

Обобщив выше представленные результаты исследований, констатируем, что среди фитоценозов трав водораздельных лугов значимые отличия в уровнях содержания азота выявлены в ценозах луговых пустошей и торфяных лугов. Биологическая продуктивность ценозов луговых пустошей существенно уступает по уровню продуцирования фитомассы.

В растительных формациях НСЛ, СВИУЛ, ЗЛ, ТЛ аккумулирующая способность азота фитоценозами естественных лугов уступает аккумулирующей способности ивы белой на 43,2–49,6 %; в формации ЛП – 94,8 %.

Сопоставимым с уровнем фитоэкстракционной способности ивы белой и ее удельным потенциалом снижения критической нагрузки по эвтрофикации обладают фитоценозы: клевер красный + полевица обыкновенная на дерново-палево-подзолистой суглинистой почве (НСЛ); разнотравье + овсяница луговая + ежа сборная + мышиный горошек + люцерна серповидная, люцерна серповидная + разнотравье + ежа сборная + трясунка на дерново (перегнойно)-глееватых карбонатных суглинистых и супесчаных почвах; райграс высокий + люцерна серповидная на дерново-перегнойно-глееватых, иногда выщелочных, суглинистых и глинистых почвах; клевер луговой + полевица обыкновенная на дерново (перегнойно)-глееватых с намытым верхом суглинистых почвах (СВИУЛ); сабельник болотный + осока пузырчатая на торфянисто-глеевых почвах низинного типа на черноольховых торфах (ЗЛ).

В других ассоциациях растительных формаций водораздельных лугов удельный потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации значительно уступает искусственным насаждениям ивы белой.

Представленные результаты исследований могут быть востребованы при трансформации естественных ландшафтов и при реализации конструкторских решений по проектированию искусственных

биоэнергетических ландшафтов, используемых для улучшения качества природных вод, а также максимизации будущих экосистемных услуг.

Библиографические ссылки

1. Мельник ЕА, редактор. *Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2024 год*. Минск: Белгидромет; 2024. 550 с.
2. Наumenко МА. *Эвтрофирование озер и водохранилищ: учебное пособие*. Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет; 2007. 99 с.
3. *К водной безопасности Беларуси: сводный отчет*. Париж: OECD Publ.; 2020. 93 с.
4. *Экологический доклад по стратегической экологической оценке по проекту «Стратегии в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года»*. Минск: Минприроды; 2021. 221 с.
5. Родькин ОИ, Бутько АА. Экологические аспекты контроля биогенных элементов и производства возобновляемой биомассы в сельскохозяйственных экосистемах. *Экологический вестник*. 2010;2:117–123.
6. Marshall E, Moonen A. Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2002;89(1/2):5–21.
7. Borin M, Passoni M, Thiene M, Tempesta T. Multiple functions of buffer strips in farming areas. *European Journal of Agronomy*. 2010;32(1):103–111.
8. Dorioz J-M, Wang D, Poulenard J, Trévisan D. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics – A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2006;117(1):4–21.
9. Hickey MBC, Doran B. A review of the efficiency of buffer strips for the maintenance and enhancement of riparian ecosystems. *Water Quality Research Journal of Canada*. 2004;39(3):311–317.
10. Kumwimba MN, Akter S, Li X, Dzakpasu M, Ifon BE, Manirakiza B, Muyembe DK, Zhang Y, Huang J, Guadie A. Nutrient and sediment retention by riparian vegetated buffer strips: Impacts of buffer length, vegetation type, and season. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2024;369(1):135–146.
11. Hawes E, Smith M. Riparian buffer zones: functions and recommended widths. Yale: Yale School of Forestry and Environmental Studies, 2005. 15 p.
12. Schmitt TJ, Dosskey MG, Hoagland KD. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants. *Journal of Environment Quality*. 1999;28(5):1479–1489.
13. Uusi-Kämpä J, Braskerud B, Jansson H, Syversen N, Uusitalo R. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *Journal of Environmental Quality*. 2000;29(1):151–158.
14. Cooper JR, Gilliam JW, Jacobs JC. Riparian areas as a control of nonpoint pollutants. *Watershed research perspectives*. 1986;60(1):166–191.
15. Vamerali T, Marchiol L, Bandiera M, Fellet G, Dickinson NM, Lucchini P, Mosca G, Zerbi G. Advances in agronomic management of phytoremediation: methods and results from a 10-year study of metal-polluted soils. *Italian Journal of Agronomy*. 2012;7(e42):323–330.
16. Mleczek M, Rutkowski P, Rissmann I, Kaczmarek Z, Golinski P, Szentner K, Strażyńska K, Stachowiak A. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*. 2010;34(9):1410–1418.
17. McGrath SP, Zhao FJ. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*. 2003;14(3):277–282.
18. Санько ПМ. *Естественные луга Беларуси, их характеристика и оценка*. Минск: Наука и техника; 1983. 247 с.
19. Бутько АА, Родькин ОИ, Пашинский ВА. Продукционные характеристики *Salix alba* и ее фитоэкстракционная способность в отношении азота и фосфора. *Вестник БрУ. Серия 5. Біялогія*. 2023;2:8–18.
20. Бутько АА, Родькин ОИ, Ракович ВА, Маркитантов НР. Оценка влияния уровня минерального питания на морфологические параметры и аккумуляцию биогенных элементов в биомассе быстрорастущей ивы. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2021. 4:54–64.
21. Heijungs R, Guinée J, Huppes G. Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds. Part 1. Leiden: Centrum voor Milieukunde; 1992. p. 96.

References

1. Melnik EA, editor. *Natsional'naya sistema okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus': rezul'taty issledovaniya, 2024 god* [National environmental monitoring system in the Republic of Belarus: observation results, 2024]. Minsk: Belhydromet; 2024. 550 p. Russian.
2. Naumenko MA. *Evtrofirovaniye ozer i vodokhranilishch: uchebnoye posobiye* [Eutrophication of Lakes and Reservoirs]. Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University; 2007. 99 p. Russian.
3. *K vodnoy bezopasnosti Belarusi: svod. otchet*. [Towards Water Security in Belarus: A Summary Report]. Paris: OECD Publ.; 2020. 93 p. Russian.
4. *Ekologicheskiy doklad po strategicheskoy roli v proyekte «Strategii v oblasti okhrany okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus' na period do 2035 goda»* [Environmental report on the strategic environmental assessment of the project «Strategy for Environmental Protection of the Republic of Belarus for the period up to 2035»]. Minsk: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection; 2021. 221 p. Russian.
5. Rodzkin AI, Butsko AA. *Ekologicheskiye aspekty kontrolya biogennykh elementov i proizvodstva vobnovlyayemoy biomassy v sel'skokhozyaystvennykh ekosistemakh* [Ecological aspects of nutrient control and renewable biomass production in agricultural ecosystems]. *Ecological bulletin*. 2010;2:117–123. Russian.
6. Marshall E, Moonen A. Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2002;89(1/2):5–21.

7. Borin M, Passoni M, Thiene M, Tempesta T. Multiple functions of buffer strips in farming areas. *European Journal of Agronomy*. 2010;32(1):103–111.
8. Dorioz J-M, Wang D, Poulenard J, Trévisan D. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics – A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2006;117(1):4–21.
9. Hickey MBC, Doran B. A review of the efficiency of buffer strips for the maintenance and enhancement of riparian ecosystems. *Water Quality Research Journal of Canada*. 2004;39(3):311–317.
10. Kumwimba MN, Akter S, Li X, Dzakupasu M, Ifon BE, Manirakiza B, Muyembe DK, Zhang Y, Huang J, Guadie A. Nutrient and sediment retention by riparian vegetated buffer strips: Impacts of buffer length, vegetation type, and season. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2024;369(1):135–146.
11. Hawes E, Smith M. Riparian buffer zones: functions and recommended widths. Yale: Yale School of Forestry and Environmental Studies, 2005. 15 p.
12. Schmitt TJ, Dosskey MG, Hoagland KD. Filter strip performance and processes for different vegetation, widths, and contaminants. *Journal of Environment Quality*. 1999;28(5):1479–1489.
13. Uusi-Kämpä J, Braskerud B, Jansson H, Syversen N, Uusitalo R. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *Journal of Environmental Quality*. 2000;29(1):151–158.
14. Cooper JR, Gilliam JW, Jacobs JC. Riparian areas as a control of nonpoint pollutants. *Watershed research perspectives*. 1986;60(1):166–191.
15. Vamerali T, Marchiol L, Bandiera M, Fellet G, Dickinson NM, Lucchini P, Mosca G, Zerbi G. Advances in agronomic management of phytoremediation: methods and results from a 10-year study of metal-polluted soils. *Italian Journal of Agronomy*. 2012;7(e42):323–330.
16. Mleczek M, Rutkowski P, Rissmann I, Kaczmarek Z, Golinski P, Szentner K, Strażyńska K, Stachowiak A. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and Bioenergy*. 2010;34(9):1410–1418.
17. McGrath SP, Zhao FJ. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils. *Current Opinion in Biotechnology*. 2003;14(3):277–282.
18. Sanko PM. *Yestestvennyye luga Belarusi, ikh kharakteristiki i otsenka* [Natural meadows of Belarus their characteristics and assessment]. Minsk: Science and Technology; 1983. 247 p. Russian.
19. Butsko AA, Rodzkin AI, Pashynski VA. *Produksionnyye kharakteristiki Salix alba i yeye fitoekstraktsionnaya sposobnost' v ot-noshenii azota i fosfora* [Production characteristics of *Salix alba* and its phytoextraction ability in regard to nitrogen and phosphorus]. *Vesnik BrU. Series 5. Biology*. 2023;2:8–18. Russian.
20. Butsko A, Rodzkin A, Rakovich V, Markitantov N. *Otsenka vliianiia urovnia mineral'nogo pitaniia na morfologicheskie parametry i akumulatsiiu biogennykh elementov v biomasse bystrorastushchei ivy* [Assessment of the influence of the level of mineral nutrition on the morphological parameters and accumulation of biogenous elements in the biomass of the fast-growing willow]. *Journal of Belarusian State University. Ecology*. 2021;4:54–64. Russian.
21. Heijungs R, Guinée J, Huppes G. Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds. Part 1. Leiden: Centrum voor Milieukunde; 1992. p. 96.

Статья поступила в редколлегию 05.05.2026.
Received by editorial board 05.05.2026.