

Перспективы использования многолетних трав в конструкции зонированных буферных полос для минимизации загрязнения водных экосистем азотом

А.А. БУТЬКО, О.И. РОДЬКИН, В.А. ПАШИНСКИЙ

В статье представлены результаты оценки фитоэкстракционной способности многолетних трав в конструкции буферных полос для минимизации загрязнения водных экосистем азотом. Объектом исследования являются 28 видов монокультур многолетних трав, включенных в Государственный реестр сортов Республики Беларусь в 1998–2024 гг. Результаты исследований позволили полнить иерархический кластерный анализ отдельных видов трав, объединяющих их по уровню биологического выноса азота с надземной фитомассой. Предложен метод балльной оценки фитоэкстракционной способности отдельных видов трав, а также их влияния на потенциал снижения критической нагрузки на водный объект по эвтрофикации.

Ключевые слова: буферная полоса, фитоэкстракция, многолетние травы, азот, кластеризация, балльная оценка, эвтрофикация.

The article presents the results of assessing the phytoextraction capacity of perennial grasses in the design of buffer strips to minimize nitrogen pollution of aquatic ecosystems. The object of the study is 28 species of monocultures of perennial grasses included in the State Register of Varieties of the Republic of Belarus in 1998–2024. The research results made it possible to complete a hierarchical cluster analysis of individual grass species, combining them by the level of biological nitrogen removal with aboveground phytomass. A method for scoring the phytoextraction capacity of individual grass species, as well as their impact on the potential for reducing the critical load on a water body for eutrophication, is proposed.

Keywords: buffer strip, phytoextraction, perennial grasses, nitrogen, clustering, point assessment, eutrophication.

Введение. Актуальность проблемы охраны водных ресурсов в сельском хозяйстве усиливается в современных условиях и в большей степени проявляется при попадании загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты от рассредоточенных источников [1]. Сельскохозяйственные земли являются главным рассредоточенным (диффузным) источником загрязнения поверхностных водных объектов. Поступление загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты в результате внесения и смыва удобрений и химических средств защиты растений ухудшает экологическое состояние поверхностных водных объектов и приводит к заморным явлениям [1].

Одним из ключевых методов по смягчению негативного воздействия химизации сельского хозяйства на деградацию водных экосистем является конструирование и управление прибрежными буферными полосами [2]–[5].

Буферная полоса представляет собой сложную экосистему почвы, растений и микроорганизмов, которая выполняет экологическую функцию, включая синергетические эффекты физических, химических и биохимических реакций естественных экосистем [6].

В основном перехват азота в буферных полосах осуществляется путем седиментации, инфильтрации [7], адсорбции почвой и растениями [8], микробной фиксации [9], а также денитрификации [10]. Однако одним из наиболее существенных механизмов перехвата является поглощение растениями [11]–[12].

Традиционно прибрежные буферные полосы состоят из различных типов растительности, включая отдельные виды или комбинацию деревьев, кустарников, трав и разнотравья [13], которые в значительной мере способны эффективно снижать диффузное загрязнение водных объектов азотом [14]. Многочисленные исследования показали, что эффективность перехвата азота травянистой растительностью составляет от 4 до 70 %, в то время как в комбинированных буферных полосах, состоящих из древесной и травянистой растительности, она достигает 95–98 %. В структуре буферных полос рекомендуется использовать три отдельные зоны растительности [16]:

– зона 1: неуправляемая полоса из постоянно произрастающей местной древесной и кустарниковой растительности, непосредственно прилегающая к водному объекту для укрепления береговой линии и стабилизации температуры воды;

– зона 2: управляемая полоса из древесной и/или кустарниковой растительности, предназначенной для снижения твердого стока, очистки поверхностных и грунтовых вод от питательных элементов и загрязняющих веществ;

– зона 3: управляемая полоса из травянистой растительности, предназначенная для очистки поверхностных вод от питательных элементов и загрязняющих веществ (пестицидов), снижения твердого стока, а также замедления сконцентрированного поверхностного стока и его распределения по более широкому фронту буферной полосы.

Обеспечение экологической и экономической жизнеспособности прибрежных буферных полос диктует необходимость изучения фитоэкстракционной способности многолетних трав входящих в структуру буферных полос, а также их влияния на снижение уровня эвтрофикации водных объектов.

Материалы и методы исследований. При кластеризации многолетних трав с целью изучения их фитоэкстракционной способности в отношении азота использованы сведения хозяйственно-биологической характеристики сортов, включенных в Государственный реестр сортов Республики Беларусь в 1998–2024 гг. [17].

Многолетние травы представлены 28 видами в количестве 200 сортов из них: бекмания обыкновенная (*Beckmannia eruciformis* (L.) Host) – 1; галега восточная (*Galega orientalis* Lam.) – 3; двукосточник тростниковый (*Phalaris arundinacea* L.) – 1; донник белый (*Melilotus albus* Medik.) – 2; донник желтый (*Melilotus officinalis* Medik.) – 2; ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.) – 7; житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum* L.) – 1; клевер ползучий (*Trifolium repens* L.) – 15; клевер луговой (красный) (*Trifolium pratense* L.) – 23; кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss) – 1; лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.) – 1; люцерна желтая (*Medicago falcate* L.) – 1; люцерна изменчивая (*Medicago polymorpha* L.) – 7; люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) – 34; лядвенец рогатый (*Lotus corniculatus* L.) – 3; мятлик луговой (*Poa pratensis* L.) – 4; овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.) – 15; овсяница тростниковая (*Festuca arundinacea* Schreb.) – 13; овсяница красная (*Festuca rubra* L.) – 4; райграсс пастбищный (*Lolium perenne* L.) – 30; райграсс многоукосный (*Lolium multiflorum* L.) – 6; тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.) – 15; фестулолиум (*Festulolium*) – 7; чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.) – 2; эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria* (Kit.) DC.) – 3.

Иерархический кластерный анализ выполнен методом Уорда, расстояния между объектами Евклидово, классификационные признаки: среднее содержание азота в надземной фитомассе трав, их максимальная и среднегодовая биологическая продуктивность за период вегетации. Оценка потенциального снижения критической нагрузки на водный объект по эвтрофикации растительностью в составе буферных полос выполнена с использованием стехиометрического подхода, при котором устанавливается эквивалентность макропитательных веществ на основе их появления в фитомассе [18].

Статистический и графический анализ результатов исследований выполнен с использованием Statistica v.10.

Результаты и их обсуждение. Среднее содержание азота (рисунок 1) в биологической группе корневищных злаковых трав (*Beckmannia eruciformis* (L.) Host, *Bromus inermis* Leyss, *Phalaris arundinacea* L., *Poa pratensis* L.) составило 21,23 г/кг сух. вещ., варьируя в диапазоне от 19,48 г/кг (мятлик луговой) до 23,84 г/кг (бекмания обыкновенная).

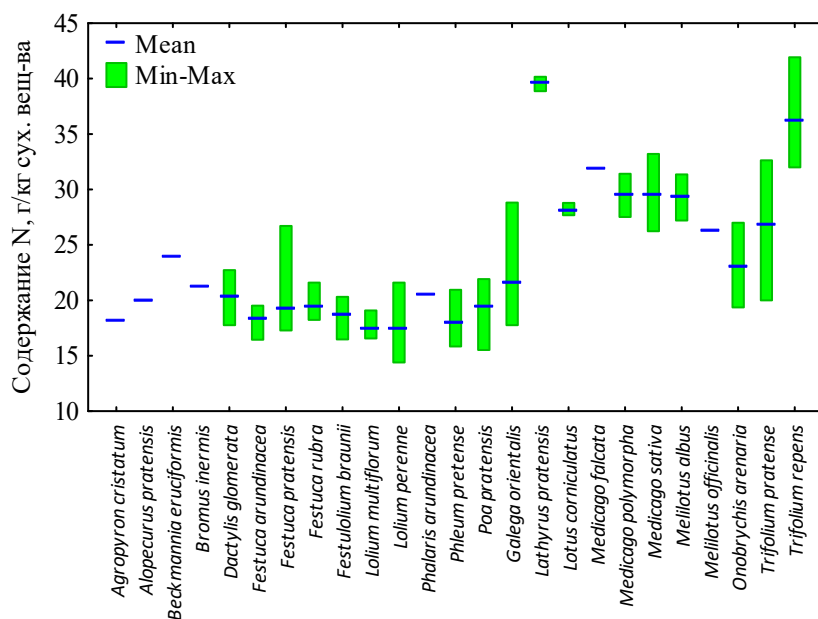


Рисунок 1 – Содержание азота в надземной фитомассе трав

В группе рыхлокустовых злаковых трав (*Agropyron cristatum* L., *Alopecurus pratensis* L., *Dactylis glomerata* L., *Festuca arundinacea* Schreb., *Festuca pratensis* Huds., *Festuca rubra* L., *Lolium perenne* L., *Lolium multiflorum* L., *Festulolium*, *Phleum pretense* L.) среднее содержание азота – 18,68 г/кг; максимальное количество – 20,04 г/кг (ежа сборная), минимальное – 17,34–17,44 г/кг (райграс пастбищный и райграс многоукосный).

В группе стержнекорневых бобовых трав среднее содержание азота существенно выше – 29,22 г/кг; максимальной количество выявлено в фитомассе чины луговой (39,51 г/кг), минимальное – галега восточная (21,50 г/кг). Значительным уровнем содержания азота обладает клевер ползучий (36,19 г/кг), люцерна (30,32 г/кг) и донник белый (29,28 г/кг).

Среднегодовая биологическая продуктивность надземной фитомассы (рисунок 2) корневищных злаковых трав составила 91,6 ц/га сухого вещества; рыхлокустовых злаковых трав – 88,7 ц/га; бобовых трав – 94,7 ц/га.

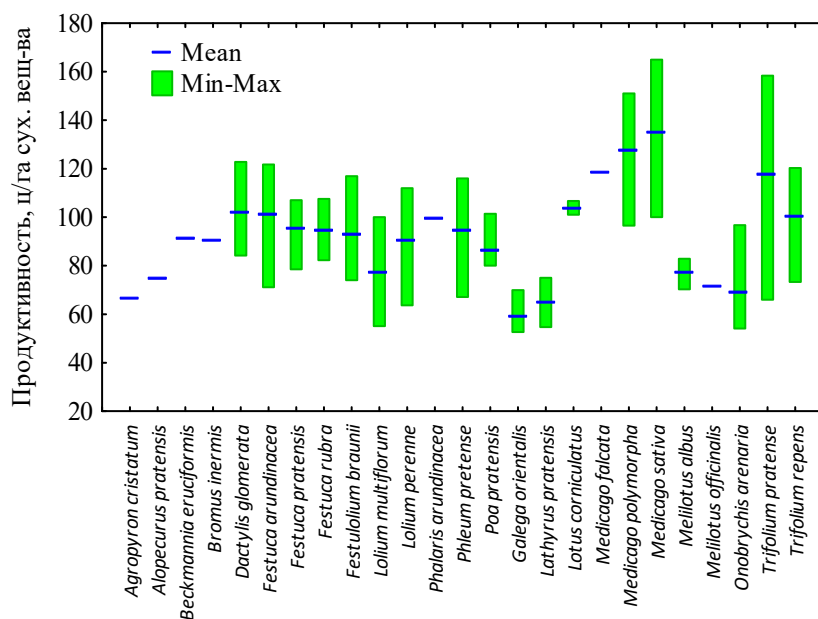


Рисунок 2 – Биологическая продуктивность надземной фитомассы трав

Максимальной продуктивностью среди корневищных злаковых трав обладают двукосточник тростниковый (98,9 ц/га); рыхлокустовых злаковых трав – ежа сборная (101,4 ц/га) и овсяница тростниковая (100,7 ц/га); бобовых трав – люцерна посевная (134,5 г/кг). Минимальной продуктивностью среди выше обозначенных групп трав обладают мятлик луговой (86,1 ц/га), лисохвост луговой (66,3 ц/га) и галега восточная (59,1 г/кг).

В группе рыхлокустовых злаковых трав в относительно близком диапазоне 92,47–95,44 ц/га располагаются значения продуктивности овсяницы луговой, овсяницы красной, фестулолиума и тимофеевки луговой; среди бобовых трав – люцерна желтая, люцерна изменчивая, лядвенец рогатый и клевер луговой в диапазоне 117,7–127,4 ц/га.

Результаты иерархического кластерного анализа трав (рисунок 3) позволили выделить четыре кластера:

1 кластер – житняк гребенчатый, лисохвост луговой, кострец безостый, двукосточник тростниковый, донник белый, эспарцет песчаный;

2 кластер – галега восточная, чина луговая, донник желтый;

3 кластер – бекмания обыкновенная, ежа сборная, овсяница тростниковая, овсяница луговая, овсяница красная, фестулолиум, райграсс многоукосный, райграсс пастбищный, тимофеевка луговая, мятлик луговой, лядвенец рогатый, клевер ползучий;

4 кластер – люцерна желтая, люцерна изменчивая, люцерна посевная, клевер луговой.

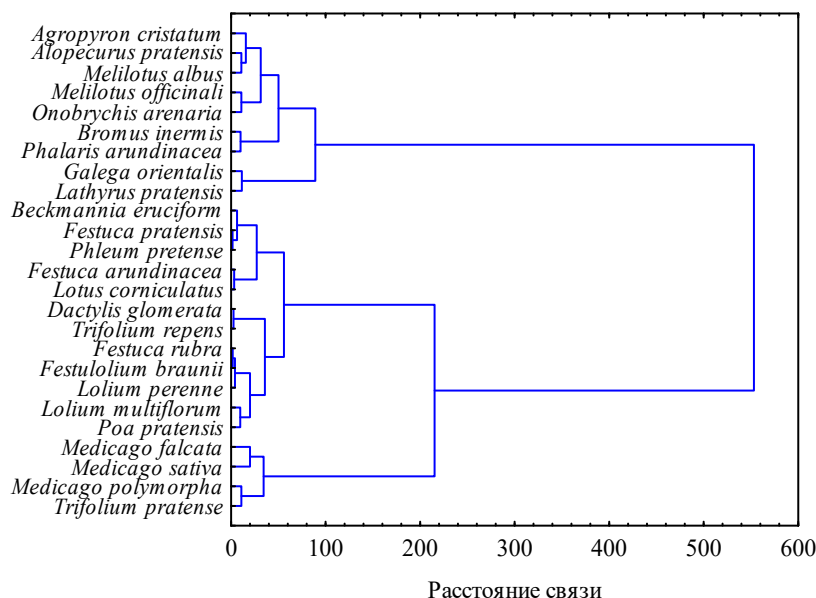


Рисунок 3 – Дендограмма кластеров многолетних трав

В первом кластере биологический вынос азота с надземной фитомассой трав за период вегетации в среднем составил 174,0 кг/га, максимальное – 224,3 кг/га (донник белый); во втором кластере – 189,9 кг/га, максимальное 256,2 кг/га (чина луговая); в третьем кластере – 202,2 кг/га, максимальное 361,8 кг/га (клевер ползучий); в четвертом кластере – 366,2 кг/га максимальное 397,2 кг/га (люцерна посевная).

Для определения бальной оценки фитоэкстракционной способности трав, используемых в структуре буферных полос, нами предложена формула:

$$B = \sqrt[3]{p \cdot c_N},$$

где B – оценка в баллах; p – среднегодовая биологическая продуктивность надземной фитомассы трав, ц/га сух. вещ.; c_N – содержание азота в надземной фитомассе трав, г/кг сух. вещ. Для перевода в 100 шкалу за 100 баллов принято максимальное произведение p , c_N , которое было получено для люцерны посевной.

Оценочные баллы искусственно созданных ценозов трав: люцерна посевная (100) > люцерна изменчивая (98) > люцерна желтая (98) > клевер ползучий (97) > клевер луговой (93) > лядвенец рогатый (90) > чина луговая (86) > донник белый (83) > бекмания обыкновенная (82) > ежа сборная (81) > двукисточник тростниковый (80) > кострец безостый (78) > донник желтый (78) > овсяница тростниковая (77) > овсяница луговая (77) > овсяница красная (77) > фестулолиум (76) > тимофеевка луговая (75) > мятлик луговой (75) > эспарцет песчаный (73) > райграс пастбищный (73) > житняк гребенчатый (70) > райграс многоукосный (69) > лисохвост луговой (69) > галега восточная (68).

Биологический вынос азота для люцерны посевной варьирует, в среднем составляет 248,6 кг/га (максимальное – 323,5 кг/га (сорт Нутрикс)); люцерна изменчивая – 233,7 (264,9 (сорт СВ3211)); люцерна желтая – 234,8 (сорт Вера); клевер ползучий – 225,6 (265,9 (сорт Тасман)); клевер луговой – 196,9 (256,6 (сорт Атлантис)); лядвенец рогатый – 182,0 (192,1 (сорт Изис)); чина луговая – 159,7 (182,2 (сорт Журавушка)); донник белый – 141,0 (162,5 (сорт Полешук)); бекмания обыкновенная – 135,7 (сорт Жодинская); ежа сборная – 129,5 (174,4 (сорт Горизонт)); двукисточник тростниковый – 126,6 (сорт Изумруд); кострец безостый – 119,3 (сорт Выдатны); донник желтый – 116,5 (сорт Мядовы); овсяница тростниковая – 115,8 (138,7 (сорт Кора)); овсяница луговая – 113,3 (128,9 (сорт Кайда ДС)); овсяница красная – 113,3 (161,0 (сорт Космонаут)); овсяница красная – 113,3 (122,7 (сорт Кондор, Гондолин)); фестулолиум – 106,8 (136,8 (сорт Лофа)); тимофеевка луговая – 106,3 (128,7 (сорт Промессе)); мятлик луговой – 103,5 (112,8 (сорт Лато)); эспарцет песчаный – 101,8 (163,1 (сорт Зидди)); райграс пастбищный – 97,9 (134,3 (сорт Эксплоужен)); житняк гребенчатый – 85,1 (сорт Маларыцкі); райграс многоукосный – 82,8 (107,4 (сорт Хантер)); лисохвост луговой – 82,9 (сорт Криничный); галега восточная – 81,8 (125,9 кг/га (сорт БГСХА-2)).

Необходимо отметить, что отдельные сорта злаковых трав превосходят либо сопоставимы с уровнем биологического выноса азота бобовыми травами, например, сорт Горизонт (*Dactylis glomerata*) соответствует сорту Галакси, Фравер, Мадалина (*Medicago sativa*), ГПТТ-ранний, ТОС – 870, Ранний 2 (*Trifolium pratense*), Изумруд, Раковский (*Lotus corniculatus*), Журавушка (*Lathyrus pratensis*), а сорт Космонаут (*Festuca pratensis*) превосходит сорт Мерея, Долина, Устойливы, Янтарный, Гармония (*Trifolium pratense*), Купава (*Lathyrus pratensis*), БГСХА-2 (*Galega orientalis*), Коптевский (*Melilotus albus*), Мядовы (*Melilotus officinalis*). При этом необходимо учитывать при сопоставлении отдельных сортов злаковых трав, среди которых также отсутствуют статистически значимые отличия в биологическом выносе азота. В качестве примера к таким сортам можно отнести сорт Сигма, Гондолин, Кондор (*Festuca rubra*), Фиола, Космолит, Балтас, Шветра (*Festuca pratensis*), Каролина, Таямница, Липальма Ростук (*Festuca arundinacea*), Каратос, Сторм (*Lolium perenne*), Престо, Барфлео, Радде, Аскел (*Phleum pratense*), Лифема, Галубоўскі (*Festulolium braunii*), Трерано, Револин (*Dactylis glomerata*), Выдатны (*Bromus inermis*), Лато (*Poa pratensis*), в которых диапазон выноса азота варьирует в диапазоне 111,1–122,8 кг/га.

Используя выше представленные результаты фитоэкстракционной способности трав в отношении азота, а также стехиометрический подход, установлены показатели удельного потенциала снижения критической нагрузки на водные объекты по эвтрофикации (таблица 1).

Таблица 1 – Удельный потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации монокультурами трав, экв. кг $\text{PO}_4^{3-}/\text{м}^2$

Вид трав	n	\bar{X}	σ	Me	Min	Max	c_v
Бекмания обыкновенная	1	0,00575	–	–	–	–	–
Галега восточная	3	0,00347	0,00162	0,00257	0,00250	0,00533	46,6
Двукисточник тростниковый	1	0,00536	–	–	–	–	–
Донник белый	2	0,00598	0,00129	0,00598	0,00506	0,00689	21,6
Донник желтый	1	0,00494	–	–	–	–	–
Ежа сборная	7	0,00549	0,00094	0,00549	0,00441	0,00739	17,2
Житняк гребенчатый	1	0,00361	–	–	–	–	–
Клевер луговой	23	0,00834	0,00186	0,00911	0,00455	1,087	22,3

Окончание таблицы 1

Клевер ползучий	15	0,00956	0,00109	0,00970	0,00677	1,127	11,3
Кострец безостый	1	0,00506	–	–	–	–	–
Лисохвост луговой	1	0,00351	–	–	–	–	–
Люцерна желтая	1	0,00995	–	–	–	–	–
Люцерна изменчивая	7	0,00990	0,00127	0,00998	0,00782	0,01123	12,8
Люцерна посевная	34	0,01054	0,00161	0,01105	0,00737	0,01379	15,3
Лядвенец рогатый	3	0,00771	0,00038	0,00759	0,00740	0,00814	4,9
Мятлик луговой	4	0,00439	0,00027	0,00430	0,00417	0,00478	6,1
Овсяница тростниковая	13	0,00491	0,00087	0,00494	0,00339	0,00588	17,7
Овсяница луговая	15	0,00480	0,00066	0,00454	0,00413	0,00682	13,8
Овсяница красная	4	0,00481	0,00051	0,00495	0,00412	0,00520	10,7
Райграс многоукосный	6	0,00351	0,00088	0,00356	0,00245	0,00455	25,2
Райграс пастбищный	30	0,00415	0,00078	0,00402	0,00290	0,00569	18,9
Тимофеевка луговая	15	0,00451	0,00090	0,00487	0,00299	0,00596	20,0
Фестулолиум	7	0,00453	0,00069	0,00440	0,00374	0,00580	15,2
Чина луговая	2	0,00677	0,00134	0,00677	0,00582	0,00772	19,9
Эспарцет песчаный	3	0,00432	0,00226	0,00321	0,00283	0,00691	52,3

Примечание: n – количество сортов, \bar{X} – среднее арифметическое, σ – среднее квадратическое отклонение, Me – медиана; Min – минимальное, Max – максимальное, c_v – коэффициент вариации.

Средний удельный потенциал снижения критической нагрузки по эвтрофикации травами, входящими в состав первого кластера, составил $0,00472 \cdot \text{экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$; второго кластера – $0,00481 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$, третьего кластера – $0,00523 \cdot \text{экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$; четвертого кластера – $0,00968 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$.

Среди бобовых трав значительным потенциалом снижения критической нагрузки обладают люцерна ($0,00737$ – $0,01379 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$) и клевер ползучий ($0,00677$ – $0,01127 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$). Наиболее перспективными в использовании являются сорта люцерны посевной – Нутрикс, Паола, СВ4412У, ЛС 02АР и клевера ползучего – Тасман, Лифлекс, Судувяй, Лирепа.

Наиболее перспективными злаковыми травами являются ежа сборная – сорт Горизонт, Интенсив, Пасадо ($0,00617 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$); овсяница тростниковая – сорт Кора, Эсселла, Баролекс ($0,00577 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$); овсяница луговая – сорт Космонавт, Кайта ДС, Шветра, Балтас ($0,00559 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$); райграс пастбищный – сорт Эксплоужен, Овамбо 1, Валерио, Елена ($0,00558 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$); тимофеевка луговая – сорт Промессе, Виннетоу, Динамит ($0,00555 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$); фестулолиум – сорт Лофа, Галубоўскі ($0,00532 \text{ экв. кг } PO_4^{3-}/m^2$).

Вывод. Обобщая выше представленные результаты исследований констатируем, что фитоэкстракционная способность бобовых трав в отношении азота в среднем на 37,9 % выше по отношению к злаковым травам. Среди бобовых трав наиболее значимым биологическим накоплением азота обладают люцерна, клевер, лядвенец рогатый; среди злаковых трав – бекмания обыкновенная, двухкосточник тростниковый и ежа сборная. Необходимо отметить, что отдельные сорта злаковых трав превосходят либо сопоставимы с уровнем биологического выноса азота бобовыми травами.

Оценочные баллы искусственно созданных ценозов монокультур трав, а также значения их удельного потенциала снижения критической нагрузки по эвтрофикации могут быть востребованы при конструировании буферных полос.

Литература

1. Национальная стратегия управления водными ресурсами в условиях изменения климата на период до 2030 года : постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 22 фев. 2022 г. № 91 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 09.01.2025).

2. Бутько, А. А. Продукционные характеристики *Salix alba* и ее фитоэкстракционная способность в отношении азота и фосфора / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский // Веснік БрУ. Серыя 5, Біялогія. – 2023. – № 2. – С. 8–18.

3. Fate of nitrogen from agriculture in the southeastern Coastal Plain / R. K. Hubbard [et al.] // *J. of Soil a. Water Conservation*. – 2004. – Vol. 59, iss. 2. – P. 72–86
4. Nitrogen removal by riparian buffers along a European climatic gradient : Patterns and factors of variation / S. Sabater [et al.] // *Ecosystems*. – 2003. – Vol. 6. – P. 20–30.
5. Riparian forests mitigate harmful ecological effects of agricultural diffuse pollution in medium-sized streams / J. Turunen [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 649, iss. 1. – P. 495–503.
6. Mitsch, W. J. Nitrogen and phosphorus retention in wetlands-ecological approaches to solving excess nutrient problems / W. J. Mitsch, A. J. Horne, R. W. Nairn // *Ecol. Eng.* – 2000. – Vol. 14, iss. 3. – P. 1–7.
7. Denitrification controls in urban riparian soils : implications for reducing urban nonpoint source nitrogen pollution / Y. Li [et al.] // *Environmental Science a. Pollution Research*. – 2014. – Vol. 21, iss. 17. – P. 10174–10185.
8. Mander, Ü. Purification processes, ecological functions, planning and design of riparian buffer zones in agricultural watersheds / Ü. Mander, Y. Hayakawa, V. Kuusemets // *Ecol. Eng.* – 2005. – Vol. 5, iss. 5. – P. 421–432.
9. Hill, A. R. Nitrate removal in stream riparian zones / A. R. Hill // *J. of Environmental Quality*. – 1996. – Vol. 25, iss. 4. – P. 743–755.
10. Groffman, P. M. Nitrate dynamics in riparian forests : microbial studies / P. M. Groffman, A. J. Gold, R. C. Simmon // *J. of Environmental Quality*. – 1992. – Vol. 21, iss. 4. – P. 666– 671.
11. In-situ bioremediation is a viable option for denitrification of chalk groundwaters / J. A. Tompkins // *Quarterly J. of Engineering Geology a. Hydrogeology*. – 2001. – Vol. 34, iss. 1. – P. 111–125.
12. Water quality in the upper Han River basin, China : the impacts of land use/land cover in riparian buffer zone / S. Li [et al.] // *J. of Hazardous Materials*. – 2009. – Vol. 165, iss. 1–3. – P. 317–324.
13. Riparian forest buffers in agroecosystems – lessons learned from the Bear Creek Watershed, central Iowa, USA / Schultz [et al.] // *Agroforestry Systems*. – 2004. – Vol. 61, iss. 2. – P. 35–50.
14. Wu, J. Q. Removal of N, P from seepage and runoff by different vegetated and slope buffer strips./ J. Q. Wu, L. J. Xiong, C. Y. Sha // *Water Science a. Technology*. – 2020. – Vol. 82, iss. 2. – P. 351–363.
15. Riparian buffer zones : functions and recommended widths / E. Hawes, M. Smith. – Yale : Yale School of Forestry a. Environmental Studies, 2005. – 15 p.
16. Correll, D. L. Principles of planning and establishment of buffer zones / D. L. Correll // *Ecol. Eng.* – 2005. – Vol. 24, iss. 5. – P. 433–439.
18. Сорта, включенные в Государственный реестр – основа высоких урожаев // Государственное учреждение «Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений». – URL : <http://sorttest.by/descriptionVarieties.php/> (дата обращения: 15.01.2025).
19. Environmental life cycle assessment of products : guide and backgrounds (Part 1) / R. Heijungs, J. Guinée, G. Huppes [et al.]. – Leiden : Centrum voor Milieukunde, 1992. – P. 96.

«Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

Поступила в редакцию 28.11.2025