

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БОТАНИКИ ИМЕНИ
В.Ф. КУПРЕВИЧА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права
УДК 581.4 : 582.095

БУТЬКО
Андрей Анатольевич

**ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
НАСАЖДЕНИЙ ИВЫ БЕЛОЙ (*SALIX ALBA* L.) В КАЧЕСТВЕ
ПРИРОДНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ БИОГЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

по специальности 03.02.08 – экология

Минск, 2023

Работа выполнена в учреждении образования «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета

Научный руководитель: **Родькин Олег Иванович,**
доктор биологических наук, доцент, директор
УО «Международный государственный
экологический институт имени А.Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета

Официальные оппоненты: **Прохоров Валерий Николаевич,**
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор
биологических наук, профессор, главный
научный сотрудник лаборатории роста и развития
растений государственного научного учреждения
«Институт экспериментальной ботаники имени
В. Ф. Купревича Национальной академии наук
Беларуси»

Яковлев Александр Павлович,
кандидат биологических наук, доцент,
заведующий лабораторией экологической
физиологии растений государственного научного
учреждения «Центральный ботанический сад
Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая организация: УО «Белорусский государственный
технологический университет»

Защита состоится « 9 » января 2024 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.38.01 в государственном научном учреждении «Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 27. E-mail: nan.botany@yandex.by. Телефон: (017) 378-14-69. Факс: (017) 322-18-53.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Якуба Коласа Национальной академии наук Беларуси.

Автореферат разослан « 5 » декабря 2023 г.

Ученый секретарь совета по защите
диссертаций, кандидат биологических
наук, доцент

Е. Я. Куликова

ВВЕДЕНИЕ

Результаты многолетних наблюдений в Республике Беларусь свидетельствуют о том, что основными веществами, избыточные концентрации которых чаще других фиксировались в воде поверхностных водных объектов, являются соединения биогенных элементов. Значительное количество этих соединений поступает в водные объекты вследствие диффузного загрязнения с поверхностным стоком с промышленных площадок, урбанизированных и сельскохозяйственных территорий (Сост. прир. среды Беларуси ..., 2020; Экол. доклад ..., 2021).

Основным источником диффузного загрязнения поверхностных вод и поступления биогенных соединений азота и фосфора является сельское хозяйство. Это связано с масштабным использованием неорганических и органических удобрений (Нац. стат. комитет Респ. Беларусь, 2022), что приводит к избыточному содержанию азота и фосфора в природных водах и эвтрофикации поверхностных водных объектов. Поступление загрязняющих веществ в поверхностные водные объекты в результате внесения и смыва удобрений и химических средств защиты растений может достигать более 50 % от их общей массы, что приводит к нарушению баланса водных экосистем (Нац. Стратег. упр. вод. рес. ..., 2021).

За последние десятилетия наблюдается значительный рост количества исследований направленных на предотвращение эвтрофикации водных экосистем на основе использования вегетативных фильтров (J. Turunen [et al.], 2019). Конструирование и управление вегетативными фильтрами является одним из ключевых методов по смягчению негативного воздействия химизации сельского хозяйства на окружающую среду (E. Marshall, 2002), что достигается путем сокращения поступления биогенных элементов с обрабатываемых сельскохозяйственных угодий в поверхностные воды (M. Borin [et al.], 2010; J-M. Dorioz [et al.], 2006).

В этой связи использование фитоэкстракционной способности растений быстрорастущей ивы в отношении биогенных элементов для создания вегетативных фильтров на территории водосборов является актуальной научной и практической задачей, решению которой посвящена диссертационная работа.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Исследования, результаты которых вошли в диссертационную работу, выполнялись в рамках следующих научных программ и заданий учреждения образования «Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова»:

1. ГПНИ «Научные основы комплексного использования, сохранения и воспроизводства природно-ресурсного потенциала и повышения качества окружающей среды» (Природно-ресурсный потенциал»), задание «Разработать модели поступления биогенных элементов в водные объекты с диффузными стоками в зависимости от конкретных видов хозяйственной деятельности на территории водных бассейнов», (2011–2013 гг., № госрегистрации 20115200);

2. ГПНИ «Химические технологии и материалы, природно-ресурсный потенциал», задание «Разработать методику использования фильтров на основе однолетних и многолетних видов растений для управления диффузными стоками» (2014–2015 гг., № госрегистрации 20142545).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденным указом Президента Республики Беларусь № 156 от 07.05.2020 г., пункту 3 «Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование».

Цель и задачи, объект и предмет исследования. Цель работы – научное обоснование использования растений ивы белой в качестве экологичных природных фильтров для минимизации загрязнения водных экосистем биогенными элементами на основе оптимизации условий их аккумуляции в фитомассе насаждений.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1) исследовать динамику морфометрических и биопродукционных характеристик структурных компонентов надземной фитомассы ивы в сезонном и многолетнем циклах исследований с определением уровней аккумуляции соединений азота и фосфора;

2) в условиях вегетационного опыта в растениях ивы белой установить зависимость обозначенных выше показателей от уровня минерального питания;

3) усовершенствовать имитационную почвенно-гидрологическую модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool) продуцирования надземной фитомассы и аккумуляции соединений азота и фосфора в насаждениях ивы в зависимости от гидротермического режима вегетационного периода;

4) научно обосновать экономическое и экологическое значение создания энергетических плантаций ивы в качестве вегетативных фильтров для минимизации загрязнения водных объектов соединениями азота и фосфора.

Объект исследования – растения ивы белой (*Salix alba* L.), сорт Волмянка.

Предмет исследования – морфометрические параметры и продукционные характеристики растений ивы, а также уровни аккумуляции в них соединений азота и фосфора в зависимости от эдафического и метеорологических факторов.

Научная новизна. Предложен апробированный в исследованиях оригинальный методический прием для оценки сезонной динамики общих

запасов надземной фитомассы в насаждениях ивы с использованием эмпирических коэффициентов взаимосвязи между морфометрическими и биопродукционными характеристиками растений.

Впервые на протяжении вегетационного периода экспериментально обоснована зависимость уровней накопления азота и фосфора в надземной фитомассе ивы от содержания в почве минерального азота и подвижных соединений фосфора.

На основе определения размеров биологического выноса азота и фосфора на разных стадиях сезонного цикла развития растений ивы усовершенствована имитационная почвенно-гидрологическая модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), позволяющая оптимизировать сроки заготовки надземной фитомассы для использования в качестве возобновляемого энергетического ресурса.

Научно обоснована возможность моделирования продуктивности насаждений ивы с точностью от 72 до 97 % в соответствии с феноритмикой сезонного развития, морфометрическими и физиологическими характеристиками растений, а также гидротермическим режимом сезона. Впервые показано, что основными лимитирующими факторами для реализации продукционного процесса в насаждениях ивы являются температура воздуха, запасы продуктивной влаги и обеспеченность азотом при средних коэффициентах водного, температурного и азотного стрессов соответственно 0,397; 0,109 и 0,101.

Впервые представлено технико-экономическое обоснование целесообразности использования насаждений ивы белой в качестве экологических природных фильтров для минимизации поступления в водные экосистемы с сельскохозяйственных угодий загрязняющих соединений азота и фосфора.

Положения, выносимые на защиту.

1. Использование растений ивы белой в качестве природного экологичного фильтра для минимизации поступления соединений азота и фосфора с сельскохозяйственных угодий в водные экосистемы способствует увеличению на 22,5 % средней многолетней продуктивности насаждений за счет активизации накопления в надземной фитомассе на 30,8 % общего азота и на 26,3 % фосфора по сравнению с контролем, что подтверждается установленной на основе моделирования высокой силой связи ($R^2 = 0,932$) между расчетными и фактическими продукционными параметрами.

2. Сезонная динамика накопления азота в наземной фитомассе ивы описывается сигмоидальной функцией с максимумом (3,29 %) в начале и минимумом (0,72 %) в конце вегетационного периода, что обусловлено высокой качественной силой связи ($R^2 = 0,778$) между содержанием элемента в надземной фитомассе и запасами минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве. Сезонная динамика накопления фосфора в наземной фитомассе ивы описывается двумя

последовательными экспоненциальными функциями соответственно с максимумом (0,72 %) в начале и минимумом (0,52 %) в конце вегетационного периода, что обусловлено дифференцированной качественной силой связи между содержанием элемента в надземной фитомассе и запасами подвижного фосфора (P_2O_5) в почве – умеренной ($R^2 = 0,403$) при его количестве в диапазоне 200–600 мг/кг и высокой ($R^2 = 0,928$) при его количестве от 600 до 900 мг/кг.

3. Адаптированная к условиям Беларуси имитационная почвенно-гидрологическая модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool) позволяет прогнозировать общие запасы надземной фитомассы в насаждениях ивы белой в зависимости от феноритмики сезонного развития, морфометрических и физиологических характеристик растений, а также от гидротермического режима вегетационного периода, что подтверждается высокой силой связи ($R^2 = 0,925$) между расчетными и фактическими продукционными показателями при средней абсолютной ошибке прогноза 15,5 %.

4. Моделирование действительно возможной аккумуляции азота и фосфора в надземной фитомассе ивы позволяет с высокой степенью точности и достоверности прогнозировать многолетнюю динамику накопления данных элементов в насаждениях ивы белой, что подтверждается сопоставимостью расчетных с использованием модели и фактических их запасов при среднем модуле отклонений для азота 13,3 кг/га, для фосфора – 4,4 кг/га.

Личный вклад соискателя ученой степени. Диссертационная работа выполнена лично автором и является законченным научным трудом. Выбор направления и объекта исследований, постановка задач, теоретическое обсуждение и оформление результатов в научных публикациях осуществлены при консультативной помощи научного руководителя доктора биологических наук О.И. Родькина. Анализ научной литературы, планирование и проведение полевых и лабораторных экспериментов, графическая и статистическая обработка, обобщение и интерпретационный анализ полученных результатов проведены автором самостоятельно. Автор выражает благодарность заместителю директора по научной работе УО «МГЭИ им. А.Д. Сахарова» БГУ, канд. техн. наук М. Г. Герменчук за содействие в предоставлении метеорологических данных и административную помощь, заведующему лабораторией биогеохимии и агроэкологии государственного научного учреждения «Институт природопользования НАН Беларуси», канд. техн. наук В.А. Раковичу за содействие и консультативную помощь в выполнении вегетационного опыта.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные положения, методика и научные результаты диссертационного исследования представлены и обсуждены на научном собрании УО «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» БГУ (2021 г.) и 17 республиканских и зарубежных

международных конференциях: VIII-я международная научно-практическая конференция «Управление информационными ресурсами» (Минск, 2011); 14-ый международный симпозиум в рамках Белорусского промышленного форума (Минск, 2011); III-я международная научно-практическая конференция, посвященная 80-летию образования ИрГСХА (Иркутск, 2014); Международная научно-техническая конференция «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: Промышленная экология» (Минск, 2015); XIX environmental eco-conference «Environmental protection of urban and suburban settlements» (Novi Sad, Serbia, 2015); Республиканская научно-техническая конференция «Радиация, экология и техносфера = Radiation environment and man – risk faktor» (Гомель, 2015); III-й Белорусско-Китайский инновационный форум «Технологии. Оборудование. Качество» (Минск, 2016); XIII-я Международная научно-техническая конференция «Наука, образование, производство в решении экологических проблем» (Уфа, 2017); XII-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы экологии» (Гродно, 2017); XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVIII, XXI-я Международная научно-техническая конференция «Сахаровские чтения. Экологические проблемы 21 века» (Минск, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2018, 2021); V-я Международная научно-практическая конференция «Экологическая безопасность в техносферном пространстве» (Екатеринбург, 2022); Международная научно-техническая конференция «Новые горизонты низкоуглеродного развития в мире и Узбекистане» (Ташкент, 2022).

Опубликование результатов диссертации. По результатам диссертационных исследований опубликовано 29 научных работ. Из них: 7 статей, отвечающих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 4 – в научных рецензируемых журналах, 7 – в материалах конференций, 11 – в тезисах конференций. Общее количество авторских листов 7,9 (лично соискателя – 6,76 авторских листов), из них на статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК приходится 3,32 листа (лично соискателя – 3,05 авторских листа).

Результаты исследований используются в деятельности Логойской районной инспекции природных ресурсов и охраны окружающей среды (акт внедрения № 5 от 13.01.2014 г.), филиала «Ресурсный центр ЭкоТехноПарк – Волма» УО «Республиканский институт профессионального образования» (акт внедрения № 8 от 16.05.2016 г.), РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов» (акт внедрения № 9 от 08.12.2015 г.), ООО «Ляховичская вербочка» (акт внедрения № 10 от 24.09.2022 г.) и в учебный процесс УО «МГЭИ им. А.Д. Сахарова» БГУ, кафедра энергоэффективных технологий (протокол № 5 от 30.12.2021; протокол № 7 от 28.01.2021 г.); кафедра экологического мониторинга и менеджмента (протокол

№ 1 от 30.08.2022 г.). Получено уведомление о регистрации изобретения ВУ 23977 «Способ биологической очистки вод в аграрных ландшафтах».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа включает введение, общую характеристику работы, аналитический обзор литературы, описания объекта и методов исследований, 4 главы, отражающие результаты исследований, заключение, список литературы, содержащий 340 источников (из них 29 – собственные публикации, 86 – русскоязычные, 225 – на иностранных языках), приложения. Текст диссертации изложен на 200 страницах (основной текст – 134, таблицы и рисунки – 31, приложения – 35 страниц). Всего в диссертации 39 рисунков, 24 таблицы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В обзоре литературы представлен анализ применения методов фиторемедиации нарушенных природных территорий, одним из которых является использование вегетативных фильтров для контроля степени диффузного загрязнения водных объектов. Показано, что эффективность этих мероприятий в значительной мере определяется фенологией сезонного развития, морфометрическими и физиологическими характеристиками растений, а также зависит от региональных климатических особенностей и комплексного воздействия эдафического и метеорологических факторов (A. Salido, 2003; B. Tangahu, 2011). Использование растений ивы в качестве вегетативного фильтра признано весьма эффективным экологическим приемом для снижения загрязнения водных объектов за счет поглощения растениями избытка загрязняющих веществ, выступающих в качестве элементов минерального питания (Z. Fischerová, 2006; J. Jensen, 2009; E. Kiedrzyńska, 2008).

Объекты и методы исследования. Исследования выполнены в 2011–2021 гг. на примере высокопродуктивного сорта *Волмянка* ивы белой (*Salix alba* L.), характеризующегося высокими темпами роста, и внесенного по хозяйственно-биологическим показателям в Государственный реестр сортов и древесно-кустарниковых пород Республики Беларусь.

Конструирование и оценка эффективности вегетативного фильтра с использованием насаждений ивы выполнены в 2011–2016 гг. на базе УНК «Волма» Дзержинского р-на Минской обл. в нижней части водосбора проточного пруда «Волма», общая площадь водосбора которого составляет 0,72 км², а водного зеркала – 10650 м². В нем предварительно определен уровень загрязнения соединениями азота и фосфора, поступающими с расположенных рядом сельскохозяйственных угодий. Для проведения экспериментальных исследований были сформированы посадки ивы на участке протяженностью 25 м и шириной 11 м, на котором заложены 4 опытные делянки площадью 50 м² при количестве высаженных растений примерно 19000 шт. на 1 га. При этом поверхностный сток,

проходящий через вегетативный фильтр, формировался на территории сельскохозяйственных угодий на площади 1,32 га. Полевые наблюдения за динамикой морфометрических и биопродукционных параметров растений ивы в этих посадках осуществляли с использованием модельных деревьев по общепринятым методикам (Карманова, 1976; Доспехов, 1985).

Контрольный участок, расположенный в верхней части территории водосбора пруда, по своему местоположению соответствовал условиям, исключающим поступление поверхностного стока с территории сельхозугодий.

Исследование сезонной динамики накопления азота и фосфора в растениях ивы осуществляли в 2021 г. в условиях вегетационного опыта на опытно-экспериментальной площадке Института природопользования НАН Беларуси. Одревесневшие стеблевые черенки ивы высаживали в вегетационные сосуды объемом 2,6 л, заполненные субстратом из смеси песка и торфа в соотношении 1:1. В качестве удобрения использовали комплексное минеральное удобрение Kristalon 18-18-18 Special.

Схема опыта включала 4 варианта: контроль (без внесения удобрений); вариант N₅₀P₅₀ (доза внесения 1,5 г д. в. на сосуд); вариант N₁₀₀P₁₀₀ (доза внесения 3,0 г д. в.); вариант N₁₅₀P₁₅₀ (доза внесения 4,5 г д. в.). Повторность опыта 4-кратная, размещение вегетационных сосудов рендомизированное.

Агрофизические и агрохимические характеристики почвы под экспериментальными посадками ивы определяли по общепринятым методам: гранулометрический состав – ареометрическим и пипеточным методами (ГОСТ 12536-79); влажность – весовым методом (ГОСТ 28268-89); плотность – методом режущего кольца (ГОСТ 5180-84); гидролитическую кислотность – по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91); содержание гумуса – по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91); содержание минеральных элементов: нитратного азота – колориметрическим методом с дисульфобензеновой кислотой; аммиачного азота – колориметрически с использованием реактива Несслера (А. Фролова, 1965); подвижных соединений фосфора – колориметрически по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91); суммы поглощенных оснований – по методу Каппена-Гильковица (ГОСТ 27821-88).

Содержание нитратов в пробах воды определяли потенциометрическим методом (РД 52.24.367-2010), аммонийного азота и ортофосфатов – колориметрическим методом (ГОСТ 4192-82, ГОСТ 18309-72).

В надземной фитомассе опытных растений в вегетационном опыте и экспериментальных посадках определяли массовую долю общего азота методом Кьельдаля (ГОСТ 26715-85), а общего фосфора – фотометрическим методом (ГОСТ 26717-85). Теплотехнические показатели опытных растений, в том числе: влажность определяли весовым методом (ГОСТ 16483.7-71); зольность – методом

медленного озоления (ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97)); определение высшей и вычисление низшей теплоты сгорания – калориметрическим методом с использованием калориметра бомбового Phywe System (ГОСТ 147-95 (ИСО 1928-76)).

Все определения и измерения осуществляли не менее чем в 4-кратной повторности. Математическая и статистическая обработка экспериментальных данных выполнена с использованием MS Excel 2010, OriginPro v. 2018, Statistica v.10.

Продукционные характеристики растений ивы и аккумуляция азота и фосфора в надземной фитомассе

Морфометрические и продукционные характеристики растений ивы за два последовательных трехлетних периода роста, выбранных в качестве оптимальных для заготовки надземной фитомассы, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Морфометрические и продукционные параметры растений ивы в экспериментальных посадках в трехлетних периодах наблюдений

Пара-метр	Первый трехлетний период			Второй трехлетний период		
	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Контрольный участок						
1	3,1 ± 0,3	3,1 ± 0,3	3,1 ± 0,3	3,3 ± 0,2	3,3 ± 0,2	3,3 ± 0,3
2	11,5 ± 1,5	16,4 ± 1,8	21,1 ± 1,5	12,2 ± 1,5	14,5 ± 1,5	18,4 ± 2,3
3	132,4 ± 13,5	177,2 ± 24,6	223,4 ± 21,6	117,3 ± 23,2	147,2 ± 14,6	211,6 ± 30,5
4	5256 ± 279	10006 ± 386	14183 ± 404	4883 ± 263	8622 ± 296	13816 ± 436
Экспериментальный участок						
1	3,1 ± 0,3	3,1 ± 0,3	3,1 ± 0,3	3,4 ± 0,2	3,4 ± 0,3	3,4 ± 0,3
2	13,2 ± 1,2	20,1 ± 1,4	26,4 ± 1,8	14,0 ± 1,5	23,5 ± 2,0	28,9 ± 2,3
3	152,5 ± 15,9	222,0 ± 33,1	334,3 ± 28,9	166,9 ± 19,1	263,5 ± 29,2	345,7 ± 37,7
4	7078 ± 319	12330 ± 410	17023 ± 497	5814 ± 336	13472 ± 424	19264 ± 564

Примечание: 1 – количество стеблей, шт./растение; 2 – средний диаметр стебля, мм; 3 – средняя высота растения, см; 4 – продуктивность растений, кг/га абс. сух. вещества

При усреднении приведенных показателей в трехлетних циклах исследований оказалось, что общие запасы абсолютно сухой надземной фитомассы в первом периоде в контроле и на экспериментальном участке в конце 1-го года составляли соответственно 5,07 и 6,45 т/га, 2-го – 9,31 и 12,9 т/га, 3-го – 14,0–18,14 т/га. Усредненные показатели высоты растений в первом периоде в контроле и на экспериментальном участке в конце 1-го года составляли соответственно 124,9 и 152,5 см, 2-го – 162,2 и 242,8 см, 3-го – 217,5 и 340,0 см, тогда как диаметр стебля в контроле и на экспериментальном участке в конце 1-го года составляли соответственно 11,9 и 13,6 мм, 2-го –

15,5 и 21,8 мм, 3-го – 19,8 и 27,7 мм. Заметим, что среднее за год увеличение диаметра стебля за два трехлетних периода в контроле и на экспериментальном участке составило 6,6 и 9,2 мм при увеличении высоты растений более чем на 87 и 125 см и отсутствии изменений в количестве сформированных стеблей. Установлено, что приведенные показатели в экспериментальных посадках ивы заметно превышали таковые в контроле. Представление о степени данного превышения можно судить по данным таблицы 2.

Таблица 2 – Относительные различия с контролем морфометрических и продукционных параметров растений ивы в экспериментальных посадках, %

Параметр	Первый трехлетний период			Второй трехлетний период		
	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Количество стеблей	–	–	–	–	–	–
Средний диаметр стебля	+14,8	+22,6	+25,1	+14,8	+62,1	+57,1
Средняя высота растения	+15,2	+25,4	+49,6	+42,3	+79,0	+63,4
Продуктивность растений	+34,7	+23,2	+20,0	+19,1	+56,3	+39,4

Примечание: прочерк означает отсутствие статистически значимый различий с контролем при $p \leq 0,05$

Как видим, наиболее выразительными выявленные различия оказались во втором трехлетнем цикле наблюдений, что объясняется возможным кумулятивным эффектом в накоплении дополнительно поступающих с аграрными стоками ряда химических элементов, в том числе азота и фосфора, стимулирующих продуцирование органического вещества в надземных органах растений, что позитивно сказывалось и на их морфометрических параметрах. Данный эффект подтверждает высокую результативность насаждений ивы, как природного экологичного фильтра в защите водоемов от поступающих с сельскохозяйственных угодий диффузных загрязнителей.

В пользу данного утверждения свидетельствуют и результаты выполненного в 2011–2013 гг. сравнительного исследования параметров накопления азота и фосфора в надземной фитомассе ивы на экспериментальном участке и в контроле (рисунок 1).

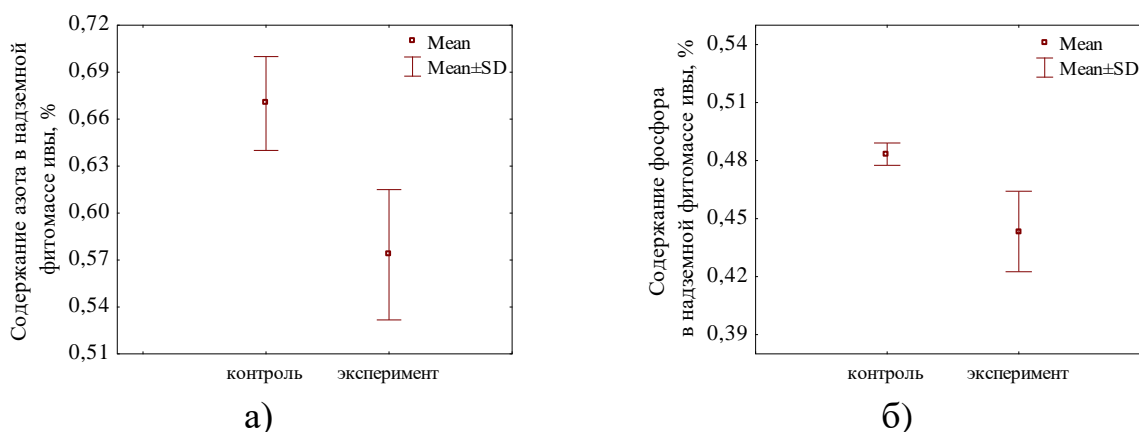


Рисунок 1 – Содержание а) азота ($N_{\text{общ}}$) и б) фосфора (P_2O_5) в надземной фитомассе ивы на экспериментальном участке и в контроле

Так, если в первом случае содержание азота в этот период варьировалось в диапазоне 0,64–0,70 % абсолютно сухого вещества, а содержание фосфора в диапазоне 0,48–0,49%, то на контрольном участке данные показатели были заметно ниже и изменялись в диапазонах 0,54–0,62 и 0,42–0,46 % соответственно. При этом на фоне более высокого прироста надземной фитомассы растений на экспериментальном участке по сравнению с контролем биологический вынос обоих питательных элементов также оказался выше при относительных размерах данного превышения в годы исследований по азоту от 27,8 до 33,8 %, а по фосфору от 21,1 до 29,3 %.

Как было показано выше, базовый период заготовки надземной фитомассы ивы составляет 3 года, тогда как подземная сфера (корни) сохраняется в течение полного цикла функционирования вегетативного фильтра (20–25 лет). Вместе с тем, поскольку основную долю отделяемой надземной фитомассы составляют стебли растений, то моделирование их продуктивности позволит прогнозировать размеры аккумуляции азота и фосфора в течение вегетационного периода. По результатам корреляционного анализа экспериментальных данных установлена высокая степень взаимосвязи диаметра стебля и его массы ($R^2 = 0,853$), для установления которой использована экспоненциальная функция (Exponential):

$$m_s = y_0 + A_1 e^{R_0 x}, \quad (1)$$

где m_s – масса стебля, г; y_0 , A_1 , R_0 – эмпирические коэффициенты смещения кривой (–18,173), ее начального значения (38,028) и постоянной скорости роста (0,093); x – диаметр стебля, мм.

По результатам исследования сезонной динамики морфометрических параметров надземных и подземных органов и относительной доли их фитомассы в формировании продуктивности растений предложен метод расчета общей продуктивности насаждений ивы:

$$M_{\bar{o}} = M_{n.\bar{o}} + M_{n.\bar{b}} \quad (2)$$

где $M_{n.\bar{o}}$ $M_{n.\bar{b}}$ – подземная и надземная фитомасса растения, т/га:

$$M_{n.\bar{o}} = M_{n.\bar{b}} \cdot \left(\frac{f_{st} + f_f}{f_r} \right), \quad (3)$$

$$M_{n.\bar{b}} = a \cdot \left(m_s + \frac{m_s}{\frac{f_{st}}{f_f}} \right) \cdot n_p \cdot n_{st} \cdot k_s \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

где $a = 0,780$ – эмпирический коэффициент регрессии; m_s – масса стебля, г; f_{st} , f_f , f_r – относительная доля стеблей, листьев и корней в общей фитомассе в сезонном цикле развития растений; n_p – количество растений, шт./га; n_{st} – количество стеблей, шт./растение; k_s – коэффициент приживаемости растения [14, 15, 18].

Сезонная динамика накопления азота и фосфора в фитомассе ивы белой

Исследование данного вопроса осуществляли в условиях вегетационного опыта, результаты которого показали последовательное снижение содержания азота в фитомассе ивы от $3,29 \pm 0,04$ % в начале вегетационного периода до $2,18 \pm 0,03$ % в середине и $0,72 \pm 0,01$ % в конце сезона. На наш взгляд, это объясняется разбавлением его общих запасов в результате интенсивного формирования надземной фитомассы. Заметим, что высокое содержание в ней элемента в начале сезона коррелировало с повышенным его содержанием в субстрате (рисунок 2).

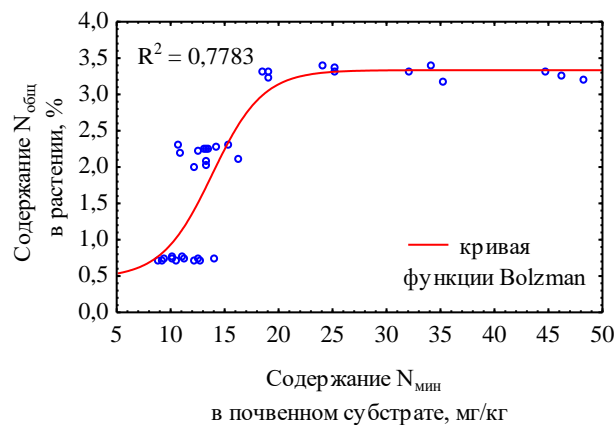


Рисунок 2 – Содержание азота ($N_{общ}$) в надземной фитомассе ивы в зависимости от содержания минерального азота ($N_{мин}$) в субстрате

Для расчета общего содержания азота в надземной фитомассе ивы в зависимости его содержания в субстрате использована сигмоидальная функция (Bolzman):

$$f_{(N)} = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A_2, \quad (5)$$

где $f_{(N)}$ – содержание общего азота в надземной фитомассе ивы, %; A_1 , A_2 , x_0 , dx – эмпирические коэффициенты кривой начального (0,470) и конечного (3,334) значения, центра (13,861) и постоянной времени (2,343); x – содержание минерального азота в субстрате, мг/кг;

Выявлена высокая сила связи ($R^2 = 0,778$) при ошибке разности средних значений 0,450; $\chi^2 = 0,277 < \chi^2_{кр} = 48,6$ между содержанием минерального азота в субстрате и накоплением элемента в фитомассе ивы.

Аналогичный характер сезонной динамики накопления в надземной фитомассе ивы выявлен и для соединений фосфора (P_2O_5), для которых показано постепенное снижение содержания от $0,72 \pm 0,02$ % в начале вегетационного периода до $0,63 \pm 0,02$ % в середине и $0,52 \pm 0,01$ % конце сезона (рисунок 3).

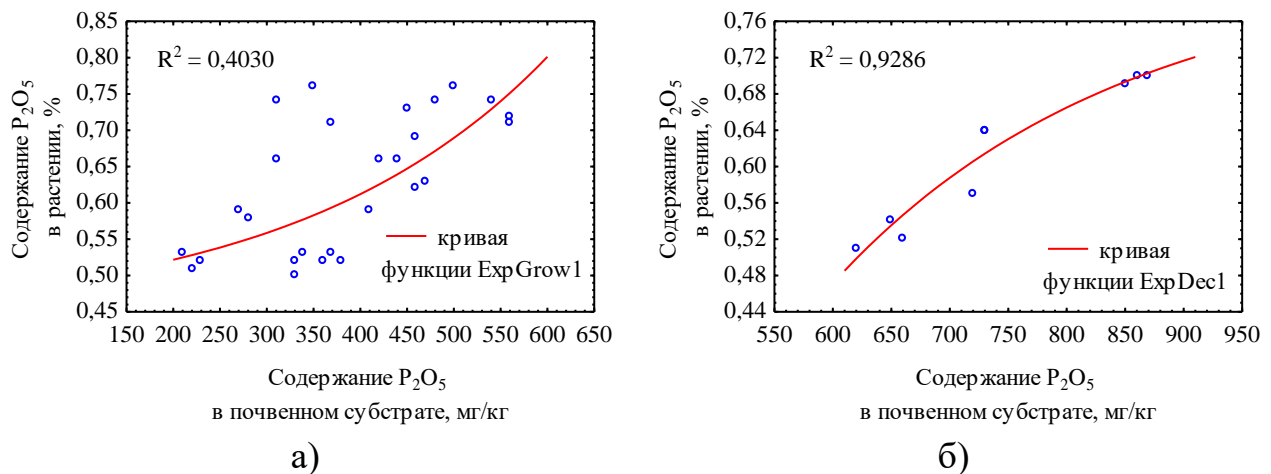


Рисунок 3 – Содержание общего фосфора в надземной фитомассе ивы в зависимости от содержания подвижных соединений фосфора в субстрате: а) 200–600 мг/кг; б) 600–900 мг/кг

Для расчета содержания фосфора в надземной фитомассе ивы в зависимости от содержания подвижных соединений фосфора (P_2O_5) в субстрате от 200 до 600 мг/кг использована экспоненциальная функция (ExpGrow1):

$$f_{(P_2O_5)} = y_0 + A_1 e^{(x-x_0)/t_1}, \quad (6)$$

где $f_{(P_2O_5)}$ – содержание общего фосфора в надземной фитомассе ивы (P_2O_5), %; y_0 , A_1 , t_1 , x_0 – эмпирические коэффициенты кривой смещения (0,439), амплитуды (0,010), постоянной рассеивания (270,740) и центра (–364,013); x – содержание подвижных соединений фосфора в субстрате (P_2O_5), мг/кг.

Для расчета содержания общего фосфора в надземной фитомассе ивы от содержания подвижных соединений фосфора (P_2O_5) в субстрате от 600 до 900 мг/кг использована экспоненциальная функция (ExpDec1):

$$f_{(P_2O_5)} = y_0 + A_1 e^{(x/t_1)}, \quad (7)$$

где $f_{(P_2O_5)}$ – содержание общего фосфора в надземной фитомассе ивы (P_2O_5), %; y_0 , A_1 , t_1 , x_0 – эмпирические коэффициенты кривой смещения (0,820), амплитуды (–3,980), постоянной рассеивания (246,231); x – содержание подвижных соединений фосфора в субстрате (P_2O_5), мг/кг.

При содержании в субстрате подвижных соединений фосфора (P_2O_5) от 200 до 600 мг/кг выявлена умеренная качественная сила связи ($R^2 = 0,403$) при ошибке разности средних значений 0,069; $\chi^2 = 0,006 < \chi^2_{кр} = 37,63$ с параметрами накопления элемента в надземной фитомассе ивы, тогда как при его содержании в диапазоне 600–900 мг/кг – высокая сила связи ($R^2 = 0,928$) при ошибке разности средних значений 0,064; $\chi^2 = 5,82 < \chi^2_{кр} = 15,5$.

Приведенные выше результаты исследований сезонной динамики накопления азота и фосфора в надземной фитомассе ивы белой использованы при моделировании потенциально и действительно возможной продуктивности ее насаждений. Напомним, что потенциально возможная продуктивность – это максимально возможная продуктивность, обеспеченная только поглощенной ФАР и эффективностью ее использования на синтез органического вещества, на фоне условно оптимальных значений остальных внешних факторов. Действительно возможная продуктивность – это продуктивность, теоретически обусловленная генетическим потенциалом вида и основным лимитирующим фактором (Тооминг, 1977).

Продуктивность надземной фитомассы опытных растений варьировалась в рамках эксперимента в интервале 20,4–23,4 г/сосуд при минимальном значении в контроле и максимальном и примерно одинаковом – на фоне $N_{100}P_{100}$ и $N_{150}P_{150}$. При этом установлено последовательное увеличение продукционных показателей по сравнению с контролем – на 9,4 % в варианте $N_{50}P_{50}$ и на 15,2 % в обоих вариантах с более высокими дозами удобрения. Как видим, оптимальный уровень обоих питательных элементов в плане повышения продукционных показателей растений ивы обеспечивал вариант опыта $N_{100}P_{100}$, тогда как дальнейшее увеличение их содержания в субстрате оказалось неэффективным [7].

На основании приведенных выше данных о запасах надземной фитомассы в экспериментальных насаждениях ивы и ориентируясь на результаты вегетационного опыта, были определены расчетные параметры накопления в ней азота и фосфора в начале, середине и конце вегетационного периода, использованные в дальнейшем при моделировании действительно возможной продуктивности ивы, с учетом лимитирующего влияния на нее не соответствующего физиологическим потребностям растений содержания в субстрате азота и фосфора, как основных элементов минерального питания [2, 12, 13, 16, 23].

Моделирование продукционного процесса в насаждениях ивы белой с учетом аккумуляции азота и фосфора

В основу моделирования продукционного процесса в насаждениях ивы положены как результаты собственных экспериментальных исследований, так и сведения, позаимствованные из соответствующих литературных источников. В качестве базовой схемы принята модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool, 2009), адаптированная нами для растений ивы. Верификация модели, а также оценка действительно возможной продуктивности растений проведена на основе оригинальных экспериментальных данных, с учетом метеорологических условий сезонов 2011–2013 гг.

Сопоставление результатов моделирования действительно возможной продуктивности надземной фитомассы ивы с фактическими, полученными экспериментальным путем ее значениями за первые три года функционирования насаждения, представленные на рисунке 4, убедительно показали, что средняя абсолютная ошибка прогнозных результатов моделирования варьировалась трехлетнем цикле в интервале 2,8–15,9 %.

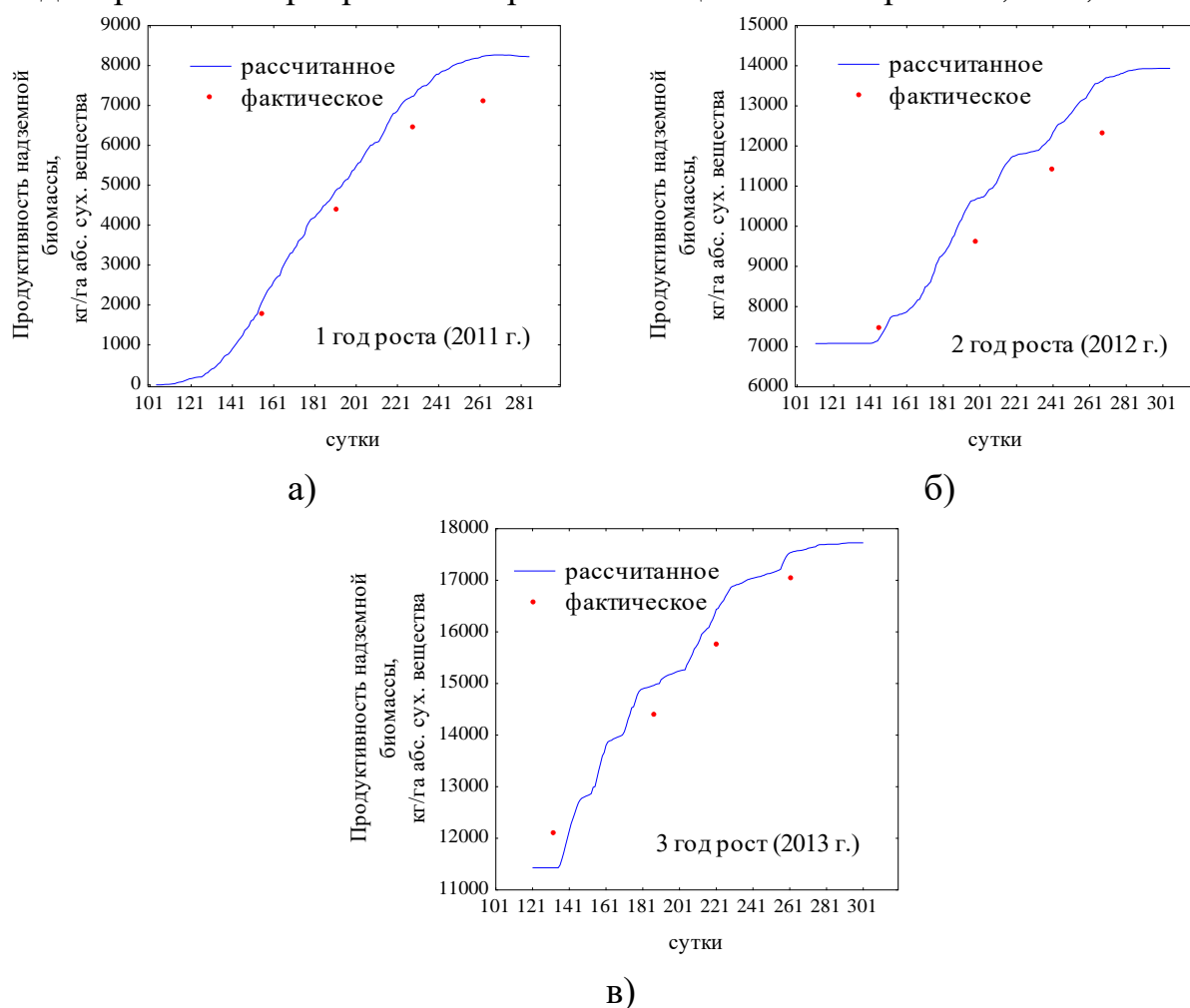


Рисунок 4 – Результаты рассчитанной на основе модели действительно возможной и фактической продуктивности надземной фитомассы ивы: а) 2011 г., б) 2012 г., в) 2013 г.

При этом между расчетными результатами моделирования продукционного процесса в надземной сфере насаждений ивы и фактически измеренными запасами фитомассы выявлена прямая корреляция с высокой силой связи ($R^2 = 0,925$); критерием $t = 2,14 < t_{кр} = 2,20$; p -уровнем 0,056 и квадратным корнем из среднеквадратической ошибки 31,3 кг/га при средней абсолютной ошибке прогноза 15,5 % [29].

Сопоставление результатов моделирования параметров накопления азота и фосфора в надземной фитомассе насаждений ивы в конце вегетационного периода в годы исследований с их фактическими значениями, полученными экспериментальным путем и представленными в таблице 3, выявило между ними заметное сходство, подтверждаемое незначительными расхождениями по среднему модулю отклонений по запасам азота в пределах 11,5, а фосфора – 3,8 кг/га при средней абсолютной ошибке результатов моделирования соответственно 15,7 и 17,7 %, что подтверждает хорошее качество прогноза содержания данных элементов.

Таблица 3 – Параметры накопления азота и фосфора в надземной фитомассе насаждений ивы за первый трехлетний период роста

Показатели	Параметры накопления азота, кг/га			Параметры накопления фосфора, кг/га		
	1	2	3	1	2	3
Фактич. знач.	49,8 ± 0,48	82,2 ± 1,9	108,9 ± 1,7	15,1 ± 0,4	26,0 ± 1,2	35,7 ± 0,5
Рассчит. знач.	58,9	100,6	116	18,9	32,2	37,1

Учитывая значительное влияние комплекса метеорологических факторов на темпы продуцирования фитомассы и накопления в ней питательных веществ, при моделировании потенциальной и действительно возможной аккумуляции азота и фосфора надземной фитомассой ивы был использован его стохастический компонент имитации рядов метеорологических элементов (таблица 4) [1, 2, 7, 22, 23, 25, 27–29].

Таблица 4 – Потенциальная и действительно возможная аккумуляция азота и фосфора надземной фитомассой насаждений ивы

Значение	Аккумуляция азота, кг/га		Аккумуляция фосфора, кг/га	
	потенциально возможная	действительно возможная	потенциально возможная	действительно возможная
Среднее	111,0	67,2	35,0	21,3
Среднеквадр. отклон.	10,2	11,4	3,2	3,6
Минимальное	87,2	43,6	27,6	13,8
Максимальное	134,02	91,3	42,4	28,9
Доверительный интервал среднего	109,0–113,0	64,9–69,4	34,4–35,7	20,6–22,0

Технико-экономическое обоснование целесообразности создания энергетических плантаций ивы белой в качестве вегетативных фильтров

Технико-экономическое обоснование практической эффективности искусственных насаждений ивы базируется на разработанной нами технологической карте выращивания древесно-кустарниковых пород с коротким периодом роста, которая включает пять технологических этапов (основная обработка почвы, предпосадочная обработка и посадка, уход за насаждением, уборка фитомассы, ликвидация насаждения), а также 19 технологических операций.

По нашим расчетам, количество условного топлива, полученного из надземной фитомассы ивы при экспериментально установленной продуктивности насаждения за один трехлетний период может составить 8,3 т усл. топл./га, а за семь трехлетних периодов (срок эксплуатации) – 58,2 т усл. топл./га. В этом случае себестоимость производства щепы составит 8,8 долл. США/нас. м³, что эквивалентно 99,6 долл. США за т усл. топл. При планируемой рентабельности 20 % простой срок окупаемости требуемых инвестиций составит 5,3 года. Если отпускная цена производителя составит 12,3 долл. США/нас. м³, то среднегодовая чистая прибыль достигнет 136 долл. США/га, а внутренняя норма доходности 59,7 % с рентабельностью инвестиций 41%.

При сохранении паритета между расчетной стоимостью условного топлива 210 долл. США, рекомендованной Департаментом по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, и отпускной ценой производителя 15,1 долл. США/нас. м³, рентабельность инвестиций составит 169,6 %, а среднегодовая чистая прибыль – 327,1 долл. США [3–6, 8–10, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На протяжении 6-летнего периода наблюдений в экспериментальных посадках ивы в ложбине стока установлено значительное превышение основных морфометрических и биопродукционных параметров растений относительно таковых в верхней части водосбора, исключающей поступление загрязняющих веществ с территории сельхозугодий (контроль), при диапазонах варьирования относительных размеров данных различий по высоте растений, диаметру стеблей и запасам надземной фитомассы 15,2–79,0 %, 14,8–62,1 % 19,1–56,3 % соответственно, что подтверждает высокую результативность насаждений ивы, как природного экологического фильтра в защите водоемов от поступающих диффузных загрязнителей. При этом

фактическая продуктивность надземной биомассы в экспериментальных посадках на третий год выращивания составила 1188,6 г/растение, прирост биомассы за трехлетний период 17,7 т/га. Предложен апробированный в исследованиях оригинальный методический прием для оценки сезонной динамики общих запасов надземной фитомассы в насаждениях ивы с использованием эмпирических коэффициентов взаимосвязи между морфометрическими и биопродукционными характеристиками, с учетом долевого участия отдельных органов растений [4, 18, 25, 27, 29].

2. Показано, что на фоне более высокого прироста надземной фитомассы ивы на экспериментальном участке по сравнению с контролем, биологический вынос биогенных элементов также оказался выше при относительных размерах данного превышения в годы исследований по азоту от 27,8 до 33,8 %, а по фосфору от 21,1 до 29,3 %. Впервые на протяжении вегетационного опыта экспериментально обоснована высокая сила связи ($R^2 = 0,778$) между содержанием минерального азота в субстрате и накоплением элемента в надземной фитомассе, а в отношении фосфора выявлена умеренная качественная сила связи ($R^2 = 0,403$) при содержании его подвижных соединений в субстрате от 200 до 600 мг/кг и высокая ($R^2 = 0,928$) при их содержании в диапазоне 600–900 мг/кг. При этом взаимозависимость между содержанием минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве и его накоплением в надземной фитомассе в течение сезона описывается сигмоидальной функцией – Boltzman, тогда как аналогичная взаимосвязь по содержанию фосфора описывается экспоненциальными функциями – ExpGrow1 и ExpDec1 [7].

3. На основе адаптированной для растений ивы белой модели SWAT (Soil and Water Assessment Tool, 2009) определена расчетным способом действительно возможная продуктивность растений, базирующаяся на оригинальных экспериментальных данных, с учетом влияния метеорологических факторов, со средней абсолютной ошибкой прогнозных результатов в трехлетнем цикле 15,5 %. При этом между расчетными результатами моделирования продукционного процесса и фактическими запасами фитомассы выявлена прямая корреляция с высокой силой связи ($R^2 = 0,925$). Установлено, что основными лимитирующими факторами для реализации продукционного процесса в насаждениях ивы являются температура воздуха, запасы продуктивной влаги и обеспеченность азотом при средних коэффициентах водного, температурного и азотного стрессов соответственно 0,397; 0,109 и 0,101 [2, 3, 11, 12, 16, 18, 23, 25, 27–29].

4. Выявлено заметное сходство между расчетными результатами моделирования содержания азота и фосфора в надземной фитомассе насаждений ивы с их фактическими значениями, полученными

экспериментальным путем, подтверждаемое незначительными расхождениями по среднему модулю отклонений запасов азота в пределах 11,5, а фосфора – 3,8 кг/га при средней абсолютной ошибке результатов моделирования соответственно 15,7 и 17,7 %, что подтверждает хорошее качество прогноза содержания данных элементов. При моделировании действительно возможной аккумуляции азота и фосфора надземной фитомассой ивы использован стохастический компонент имитации рядов метеорологических элементов, позволивший обозначить следующие диапазоны варьирования аккумуляции за вегетационный период в кг/га: азота – 43,6 – 91,3, а фосфора – 13,8–28,9 [2, 7, 11, 12, 16, 18, 21–23, 25, 27–29].

5. Дано технико-экономическое обоснование эффективности разработки, базирующееся на использовании созданной технологической карты выращивания древесно-кустарниковых пород с коротким периодом роста, включающей 5 технологических этапов (основная обработка почвы, предпосадочная обработка и посадка, уход за насаждением, уборка фитомассы, ликвидация насаждения), а также 19 технологических операций.

Установлено, что количество условного топлива, полученного из надземной фитомассы ивы за семь трехлетних периодов (срок эксплуатации насаждения) при ее запасах 17 т/га, низшей удельной теплоте сгорания 8,26 МДж/кг, показателях зольности 1,44 % и влажности 44,3 % может составить 58,2 т усл. топл./га. При сохранении паритета между расчетной стоимостью условного топлива 210 долл. США, рекомендованной Департаментом по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь, и отпускной ценой производителя 15,1 долл. США/нас. м³, рентабельность инвестиций составит 169,6 %, а среднегодовая чистая прибыль – 327,1 долл. США [3–6, 8–10, 17, 18, 20, 24, 26, 27].

6. На основании результатов исследований по определению в экспериментальных посадках ивы белой морфометрических и биопродукционных параметров растений, с оценкой степени аккумуляции в них азота и фосфора из сельскохозяйственных стоков, теплотехнических характеристик надземной фитомассы, а также использование приемов моделирования в ней продукционного процесса и динамики биогенных элементов, научно обоснована целесообразность использования данных насаждений в качестве вегетативных фильтров в ложбинах стока на территории водосбора при весьма высокой экономической эффективности [3–7, 11–16, 18, 21–25, 27–29].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Адаптированная с учетом полученных экспериментальных данных модель SWAT, позволяет прогнозировать продуктивность ивы белой и аккумуляцию азота и фосфора в наземной фитомассе насаждений в зависимости от метеорологических и эдафического факторов. Научно обоснована достаточно высокая экономическая эффективность использования насаждений ивы в качестве природных экологических фильтров для минимизации поступления биогенных элементов в водные объекты с диффузными стоками сельскохозяйственных угодий.

Результаты исследований используются в деятельности Логойской районной инспекции природных ресурсов и охраны окружающей среды, филиале «Ресурсный центр ЭкоТехноПарк – Волма» УО «Республиканский институт профессионального образования», РУП «Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов», ООО «Ляховичская вербочка» и в учебном процессе УО «МГЭИ им. А.Д. Сахарова» БГУ, что подтверждено документально. На основании данных исследований получено уведомление о регистрации патента на изобретение «Способ биологической очистки вод в аграрных ландшафтах».

Полученная новая научная информация о морфометрических и продукционных характеристиках данного вида, а также о его способности к повышенной аккумуляции азота и фосфора, с учетом цикличности в функционировании насаждений, свидетельствуют о целесообразности расширения направлений использования растений семейства ивовых в целях охраны водных объектов от широкого спектра загрязнителей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах, включенных в перечень изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований и в иностранных научных изданиях

1. Родькин, О. И. Экологические аспекты контроля биогенных элементов и производства возобновляемой биомассы в сельскохозяйственных экосистемах / О. И. Родькин, А. А. Бутько // Экол. вестн. – 2010. – № 2. – С. 117–123.

2. Бутько, А. А. Прогнозирование поступления фосфора в водные объекты с территории агроландшафтов / А. А. Бутько, О. И. Родькин // Экол. вестн. – 2012. – № 2. – С. 76–83.

3. Бутько, А. А. Оценка и моделирование энергетического потенциала биомассы ивы на примере клона *Salix viminalis* / А. А. Бутько, О. И. Родькин, Е. В. Иванова // Экол. вестн. – 2014. – № 1. – С. 80–88.

4. Бутько, А. А. Оценка биоэнергетической эффективности технологии возделывания ивы в короткоцикловых посадках / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, О. И. Родькин // Вестн. ИРГСХА. – 2016. – Вып. 75. – С. 7–17.

5. Бутько, А. А. Оценка жизненного цикла производства щепы при возделывании древесно-кустарниковой породы с коротким периодом роста ивы белой (*Salix alba*) / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский // Экол. вестн. – 2016. – № 4. – С. 89–97.

6. Бутько, А. А. Технично-экономические аспекты производства щепы при возделывании ивы белой (*Salix alba*) / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. – 2017. – № 3. – С. 91–100.

7. Оценка влияния уровня минерального питания на морфологические параметры и аккумуляцию биогенных элементов в биомассе быстрорастущей ивы / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Ракович, Н. Р. Маркитантов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. – 2021. – № 4. – С. 54–64.

Статьи в других рецензируемых научных журналах

8. Энергетическое использование клона ивы корзиночной *Salix viminalis Valetas Gigantia (Turbo)* / О. И. Родькин, В. А. Пашинский, А. А. Бутько, Е. В. Иванова // Энергоэффективность. – 2014. – № 5. – С. 14–19.

9. Экологическая оценка сжигания биомассы клонов ивы / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, О. И. Родькин, Б. Крстич // Энергоэффективность. – 2015. – № 8. – С. 26–30.

10. Бутько, А. А. Оценка энергоемкости производства щепы при возделывании древесно-кустарниковой породы с коротким периодом роста ивы белой вида *Salix alba* / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, О. И. Родькин // Энергоэффективность. – 2016. – № 6. – С. 24–27.

11. Бутько, А. А. Стохастическое моделирование рядов метеорологических элементов для решения задач экологического мониторинга / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский // Весн. Гродз. дзярж. ун-та ім. Я. Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 51–64.

Научные труды в сборниках материалов научных конференций

12. Родькин, О. И. Моделирование переноса биогенных элементов в аграрных ландшафтах как метод контроля эвтрофикации водных объектов / О. И. Родькин, А. А. Бутько // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию образования

ИрГСХА, Иркутск, 27–29 мая 2014 г. : в 2 ч. / Иркут. гос. с.-х. акад. [и др.] ; редкол.: Г. О. Такаландзе [и др.]. – Иркутск, 2014. – Ч. 1. – С. 152–159.

13. Методика контроля антропогенной нагрузки на водные объекты на основе использования вегетативных фильтров / О. И. Родькин, А. А. Бутько, В. А. Пашинский, Е. В. Иванова // Радиация, экология и техносфера : материалы респ. науч.-практ. конф., Гомель, 3–4 дек. 2015 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т радиологии ; редкол.: И. А. Чешик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 111–114.

14. Аграрное лесоводство как инструмент экологического менеджмента территорий / О. И. Родькин, А. А. Бутько, С. К. Пронько, О. А. Шкутник // Промышленная экология : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф., 27–28 окт. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т, Фак. гор. дела и инженер. экологии ; под общ. ред. И. А. Басалай. – Минск, 2015. – С. 209–218.

15. The environmental benefit of SCR willow cultivation in agrolandscape for preventing of lakes eutrophication / A. Rodzkin, S. Orlovich, B. Krstic, A. Pilipovich, A. Butzko // Environmental protection of urban and suburban settlements : XIX eco-conf., Novi Sad, Serbia, 23–25 Sept. 2015 / Ecological Movement of the City of Novi Sad. – Novi Sad, 2015. – P. 93–100.

16. Бутько, А. А. Моделирование количественных характеристик поверхностного стока при конструировании вегетативных фильтров / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, О. И. Родькин // Актуальные проблемы экологии : сб. науч. ст. по материалам XII Междунар. науч.-практ. конф, Гродно, 4–6 окт. 2017 г. / Гродн. гос. ун-т ; отв. ред. В. Н. Бурдь. – Гродно, 2017. – С. 179–181.

17. Бутько, А. А. Экологические аспекты жизненного цикла производства и конверсии биомассы древесно-кустарниковых пород с коротким периодом роста / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, О. И. Родькин // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология – 2017) : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., [Уфа, 30 апр. 2017 г.] : в 2 т. / Уфим. гос. авиац. техн. ун-т [и др.]. – Уфа, 2017. – Т. 1. – С. 13–30.

18. Бутько, А. А. Оценка продукционных и морфометрических характеристик ивы *Salix alba* при утилизации сельскохозяйственных стоков / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский // Экологическая безопасность в техносферном пространстве : сб. материалов Пятой Междунар. науч.-практ. конф. преподавателей, молодых ученых и студентов, Екатеринбург, 20 мая 2022 г. / Рос. гос. проф.-пед. ун-т. ; сост.: С. В. Анахов, Г. В. Харина, И. В. Гордеева. – Екатеринбург, 2022. – С. 63–68.

Тезисы докладов

19. Бутько, А. А. Определение естественной фоновой и критической фосфорной нагрузки на водный объект/ А. А. Бутько, О. И. Родькин, К. В. Шушлакова // Сахаровские чтения 2012 года: экологические проблемы XXI века : материалы 12-й междунар. науч. конф., Минск, 17–18 мая 2012 г. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. С. П. Кундаса, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2012. – С. 308.

20. Бутько, А. А. Оценка энергетического потенциала клона на основе ивы корзиночной (*Salix viminalis valetas gigantia (Turbo)*) / Е. В. Иванова, А. А. Бутько, О. И. Родькин // Сахаровские чтения 2013 года: экологические проблемы XXI века : материалы 13-й междунар. науч. конф., Минск, 16–17 мая 2013 г. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. С. П. Кундаса, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2013. – С. 318.

21. Моделирование баланса и визуализация миграции соединений фосфора на неоднородных территориях / С. Ю. Пороховник, Т. В. Пузына, Г. П. Куканков, А. А. Бутько, О. И. Родькин // Сахаровские чтения 2014 года: экологические проблемы XXI века : материалы 14-й междунар. науч. конф., Минск, 29–30 мая 2014 г. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. В. И. Дуная, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2014. – С. 217–218.

22. Бутько, А. А. Управление диффузными стоками с сельскохозяйственных угодий в водные объекты / А. А. Бутько, О. И. Родькин, В. А. Пашинский // Сахаровские чтения 2014 года: экологические проблемы XXI века : материалы 14-й междунар. науч. конф., Минск, 29–30 мая 2014 г. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. В. И. Дуная, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2014. – С. 229–230.

23. Бутько, А. А. Оценка эффективности моделирования переноса фосфора на территории агроландшафтов / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, О. И. Родькин // Сахаровские чтения 2015 года: экологические проблемы XXI века : материалы 15-й междунар. науч. конф., Минск, 21–22 мая 2015 г. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2015. – С. 286–287.

24. Бутько, А. А. Оценка энергоемкости производства щепы при возделывании древесно-кустарниковой породы с коротким периодом роста ивы белой вида *Salix alba* / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, О. И. Родькин // Сахаровские чтения 2016 года: экологические проблемы XXI века : материалы 16-й междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2016 г. /

Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2016. – С. 265–266.

25. Бутько, А. А. Эффективность использования посадок быстрорастущей ивы для предотвращения загрязнения водных объектов / А. А. Бутько, О. И. Родькин // Сахаровские чтения 2016 года: экологические проблемы XXI века : материалы 16-й междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2016 г. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск, 2016. – С. 264–265.

26. The economic issue of willow biomass production for energy purpose in short rotation coppice plantations / A. I. Rodzkin, A. A. Butsko, V. A. Pashynski, A. A. Shabanov, A. A. Rodzkin // Новые горизонты – 2016 : сб. материалов III Белорус.-Кит. молодеж. инновац. форума, Минск, 29–30 нояб. 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т [и др.]. – Минск, 2016. – С. 57–58.

27. Комплексная оценка эффективности использования древесно-кустарниковых пород с коротким периодом роста – Willow Energy Calculator / А. А. Бутько, В. А. Пашинский, А. А. Зайцев, Л. А. Липницкий // Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века : материалы 18-й междунар. науч. конф., Минск, 17–18 мая 2018 г. : в 3 ч. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка. – Минск, 2018. – Ч. 3. – С. 114–115.

28. Стохастическая модель имитации временных рядов метеорологических элементов / А. А. Бутько, И. А. Кирюхин, В. А. Пашинский, О. И. Родькин // Сахаровские чтения 2021 года: экологические проблемы XXI века : материалы 21-й междунар. науч. конф., Минск, 20–21 мая 2021 г. : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ун-т им. А. Д. Сахарова [и др.] ; под общ. ред. С. А. Маскевича, М. Г. Герменчук. – Минск, 2021. – Ч. 2. – С. 293–296.

29. Моделирование биологической продуктивности быстрорастущей ивы (*Salix alba*) в качестве возобновляемого источника энергии / А. А. Бутько, О. И. Родькин, С. В. Артемчук, М. С. Артемчук // Новые горизонты низкоуглеродного развития в мире и Узбекистане : материалы междунар. науч.-техн. конф., Ташкент, 23–24 сент. 2022 г. / Нац. науч.-исслед. ин-т возобновляемых источников энергии. – Ташкент, 2022. – С. 113–114.

РЕЗЮМЕ

Буцько Андрэй Анатольевіч

Эколага-біялагічнае абгрунтаванне выкарыстання насаджэнняў вярбы белай (*Salix alba* L.) у якасці прыродных фільтраў для мінімізацыі забруджвання водных экасістэм біягеннымі элементамі

Ключавыя словы: вярба, марфаметрычныя і прадукцыйныя характарыстыкі, акумуляцыя азоту і фосфару, вегетатыўны фільтр, мадэляванне

Цэль працы: навуковае абгрунтаванне выкарыстання раслін вярбы белай у якасці экалагічных прыродных фільтраў для мінімізацыі забруджвання водных экасістэм біягеннымі элементамі на аснове аптымізацыі ўмоў іх акумуляцыі ў фітамасе насаджэнняў.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура: палявыя і вегетацыйныя эксперыменты, лабараторны аналіз, метады матэматычнага мадэлявання, фотаметрыя, каларыметрыя.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Устаноўлены марфаметрычныя і прадукцыйныя характарыстыкі раслін вярбы белай і параметры назапашвання азоту і фосфару ў надземнай фітамасе яе насаджэнняў, якія выкарыстоўваюцца ў якасці экалагічных прыродных фільтраў для мінімізацыі забруджвання водных аб'ектаў у аграладшафтах. Прапанаваны метадычны прыём для ацэнкі сезоннай дынамікі агульных запасаў надземнай фітамасы ў насаджэннях вярбы з выкарыстаннем эмпірычных каэфіцыентаў узаемасувязі паміж марфаметрычнымі і біопродукцыйнымі характарыстыкамі раслін. Эксперыментальна абгрунтавана залежнасць узроўняў назапашвання азоту і фосфару ў надземнай фітамасе вярбы ад утрымання ў глебе мінеральнага азоту і рухомага злучэнняў фосфару. Удасканалена глебава-гідралагічная мадэль SWAT прадуктавання надземнай фітамасы і акумуляцыі злучэнняў азоту і фосфару ў насаджэннях вярбы ў залежнасці ад гідратэрмічнага рэжыму вегетацыйнага перыяду. Навукова абгрунтавана мэтазгоднасць выкарыстання насаджэнняў вярбы ў якасці прыродных фільтраў і ўстаноўлена іх эканамічная эфектыўнасць на натуральным аграфоне.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманыя дадзеныя могуць быць скарыстаны пры распрацоўцы метадаў аховы водных аб'ектаў.

Ступень выкарыстання. Вынікі даследаванняў укаранёны ў рэальным сектары эканомікі, у практыцы прыродаахоўнай дзейнасці, у навучальным працэсе.

Галіна выкарыстання: прыродакарыстанне і ахова навакольнага асяроддзя.

РЕЗЮМЕ

Буцько Андрей Анатольевич

Эколого-биологическое обоснование использования насаждений ивы белой (*Salix alba* L.) в качестве природных фильтров для минимизации загрязнения водных экосистем биогенными элементами

Ключевые слова: ива, морфометрические и продукционные характеристики, аккумуляция азота и фосфора, вегетативный фильтр, моделирование

Цель работы: научное обоснование использования растений ивы белой в качестве экологичных природных фильтров для минимизации загрязнения водных экосистем биогенными элементами на основе оптимизации условий их аккумуляции в фитомассе насаждений.

Методы исследования и использованная аппаратура: полевые и вегетационные эксперименты, лабораторный анализ, методы математического моделирования, фотометрия, калориметрия.

Полученные результаты и их новизна. Установлены морфометрические и продукционные характеристики растений ивы белой и параметры накопления азота и фосфора в надземной фитомассе ее насаждений, используемых в качестве экологичных природных фильтров для минимизации загрязнения водных объектов в агроландшафтах. Предложен методический прием для оценки сезонной динамики общих запасов надземной фитомассы в насаждениях ивы с использованием эмпирических коэффициентов взаимосвязи между морфометрическими и биопродукционными характеристиками растений. Экспериментально обоснована зависимость уровней накопления азота и фосфора в надземной фитомассе ивы от содержания в почве минерального азота и подвижных соединений фосфора. Усовершенствована почвенно-гидрологическая модель SWAT продуцирования надземной фитомассы и аккумуляции соединений азота и фосфора в насаждениях ивы в зависимости от гидротермического режима вегетационного периода. Научно обоснована целесообразность использования насаждений ивы в качестве природных фильтров и установлена их экономическая эффективность на естественном агрофоне.

Рекомендации по использованию. Полученные данные могут быть использованы при разработке методов охраны водных объектов.

Степень использования. Результаты исследований внедрены в реальном секторе экономики, в практике природоохранной деятельности, в учебном процессе.

Область применения: природопользование и охрана окружающей среды.

SUMMARY

Butsko Andrei A.

Ecological and biological justification for the use of white willow (*Salix alba* L.) plantations as natural filters to minimize pollution of aquatic ecosystems with nutrients

Keywords: willow, morphometric and production characteristics, accumulation of nitrogen and phosphorus, vegetative filter, modeling

The purpose of the work: scientific substantiation of the use of white willow plants as environmentally friendly natural filters to minimize pollution of aquatic ecosystems with nutrients based on optimizing the conditions for their accumulation in the phytomass of plantings.

Research methods and equipment: field and vegetation experiments, laboratory analysis, mathematical modeling methods, photometry, calorimetry.

The results obtained and their novelty. The morphometric and production characteristics of white willow plants and the parameters of nitrogen and phosphorus accumulation in the above-ground phytomass of its plantings, used as environmentally friendly natural filters to minimize the pollution of water bodies in agricultural landscapes, have been established. A methodological technique is proposed for assessing the seasonal dynamics of the total reserves of above-ground phytomass in willow plantations using empirical coefficients of the relationship between the morphometric and bioproductive characteristics of plants. The dependence of the levels of accumulation of nitrogen and phosphorus in the aboveground phytomass of willow on the content of mineral nitrogen and mobile phosphorus compounds in the soil has been experimentally substantiated. The soil-hydrological SWAT model of the production of above-ground phytomass and the accumulation of nitrogen and phosphorus compounds in willow plantations depending on the hydrothermal regime of the growing season has been improved. The feasibility of using willow plantings as natural filters has been scientifically substantiated and their economic efficiency in the natural agricultural background has been established.

Recommendations for use. The data obtained can be used in developing methods for protecting water bodies.

Degree of application. The research results have been implemented in the real sector of the economy, in environmental practice, and in the educational process.

The field of application: nature management and environmental protection.



Подписано в печать 27.11.2023 Формат 60x84_{1/16} Бумага офсетная
Печать цифровая Усл.печ.л. 1,4 Уч.изд.л. 1,5 Тираж 60 экз. Заказ 6535
ИООО «Право и экономика» 220072 Минск Сурганова 1, корп. 2 Тел. 8 029 684 18 66
Отпечатано на издательской системе Gestetner в ИООО «Право и экономика»
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий, выданное
Министерством информации Республики Беларусь 17 февраля 2014 г.
в качестве издателя печатных изданий за № 1/185

ЛИСТ ИСПРАВЛЕНИЙ

в текст автореферата диссертации **Буцько Андрея Анатольевича** «Эколого-биологическое обоснование использования насаждений ивы белой (*Salix alba* L.) в качестве природных фильтров для минимизации загрязнения водных экосистем биогенными элементами», представленной на соискание учёной степени кандидата биологических наук по специальности 03.02.08 – экология

Страницы автореферата	
Написано	Следует читать
Раздел «Общая характеристика работы», структурный элемент «Положения выносимые на защиту», с. 4	
4. Моделирование действительно возможной аккумуляции азота и фосфора в надземной фитомассе ивы позволяет с высокой степенью точности и достоверности прогнозировать многолетнюю динамику накопления данных элементов в насаждениях ивы белой, что подтверждается сопоставимостью расчетных с использованием модели и фактических их запасов при среднем модуле отклонений для азота 13,3 кг/га, для фосфора – 4,4 кг/га.	4. Моделирование действительно возможной аккумуляции азота и фосфора в надземной фитомассе ивы позволяет с высокой степенью точности и достоверности прогнозировать многолетнюю динамику накопления данных элементов в насаждениях ивы белой, что подтверждается сопоставимостью расчетных с использованием модели и фактических их запасов при среднем модуле отклонений для азота 11,5 кг/га, для фосфора – 3,8 кг/га.
Раздел «Основная часть», структурный элемент «Продукционные характеристики растений ивы и аккумуляция азота и фосфора в надземной фитомассе», с. 10, рисунок 1, ось абсцисс	
контроль эксперимент	эксперимент контроль
Раздел «Основная часть», структурный элемент «Сезонная динамика накопления азота и фосфора в фитомассе ивы белой», с. 13, формула 7	
y_0, A_1, t_1, x_0 – эмпирические коэффициент	y_0, A_1, t_1 – эмпирические коэффициенты

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 01.38.01,
к.б.н., доцент



Е.Я. Куликова

Соискатель



А.А. Буцько