

УДК 57.045

Андрей Анатольевич Бутько¹, Олег Иванович Родькин², Василий Антонович Пашинский³

¹ст. преподаватель каф. энергоэффективных технологий

Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета

²д-р биол. наук, доц., зам. директора по учебной работе

Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета

³канд. техн. наук, доц., зав. каф. энергоэффективных технологий

Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова
Белорусского государственного университета

Andrei Butsko¹, Alek Rodzkin², Vasil Pashynski³

¹Senior Lecturer of the Department of Energy Efficient Technologies
of International Sakharov State Environmental Institute
of Belarusian State University

²Doctor of Biological Sciences, Associate Professor,
Deputy Director for Education of International Sakharov State Environmental Institute
of Belarusian State University

³Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Chair of the Department of International Sakharov State Environmental Institute
of Belarusian State University

e-mail: ¹butko_andrei@mail.ru; ²aleh.rodzkin@rambler.ru; ³pashynski@mail.ru

ПРОДУКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ SALIX ALBA И ЕЕ ФИТОЭКСТРАКЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ В ОТНОШЕНИИ АЗОТА И ФОСФОРА

Впервые получены морфологические параметры и биопродукционные характеристики растений *Salix alba*, используемых в качестве вегетационных фильтров для аккумуляции азота и фосфора на территории агроландшафтов. По данным морфологических показателей и урожайности *Salix alba*, установлены необходимые эмпирические коэффициенты и предложена формула для расчета продуктивности растения. Результаты моделирования урожайности надземной биомассы *Salix alba* характеризуются весьма высокой количественной и качественной характеристикой силы связи. Фитоэкстракционная способность надземной биомассы растения в отношении азота в конце первого трехлетнего периода роста (2011–2013 гг.) составила $108,95 \pm 1,70$ кг/га, фосфора – $35,68 \pm 0,47$ кг/га. Доказано, что растения *Salix alba* могут культивироваться без дополнительного внесения минеральных удобрений при посадке плантаций в пониженных местах рельефа на территории водосбора, представленного преимущественно пахотными землями.

Ключевые слова: вегетационный фильтр, ива, *Salix alba*, продуктивность, урожайность, органы растений, аккумуляция азота и фосфора.

Production Characteristics of SALIX ALBA and Its Phytoextraction Ability in Regard to Nitrogen and Phosphorus

For the first time, morphological parameters and bioproductive characteristics of *Salix alba* plants used as vegetative filters for the accumulation of nitrogen and phosphorus in agrolandscapes were obtained. According to the morphological parameters and yield of *Salix alba*, the necessary empirical coefficients were established and a formula was proposed for calculating the productivity of the plant. The results of modeling the productivity of the aboveground biomass of *Salix alba* are characterized by a very high quantitative and qualitative characteristic of the bond strength. Phytoextraction capacity of aboveground plant biomass in relation to nitrogen at the end of the first three-year growth period (2011–2013) was $108,95 \pm 1,70$ kg/ha, phosphorus $35,68 \pm 0,47$ kg/ha. It has been proven that *Salix alba* plants can be cultivated without additional application of mineral fertilizers when planting plantations in low relief areas in the catchment area, represented mainly by arable land.

Key words: vegetation filter, willow, *Salix alba*, productivity, yield, plant organs, nitrogen and phosphorus accumulation.

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 (не точечных) источников [1]. Сельское хозяйство является основным источником диффузного загрязнения. При этом сток с сельскохозяйственных территорий несет наибольшую угрозу качественному состоянию вод в связи с поступлением в них значительного объема биогенных веществ – соединений азота и фосфора. Это преимущественно 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 [2; 3].

Фиторемедиация является одним из наиболее экологически безопасных и эффективных с экономической точки зрения методов восстановления поврежденных экосистем по отношению к другим технологиям ремедиации [4; 5]. Технология фиторемедиации основывается на использовании растений для удаления неорганических и/или органических веществ из окружающей среды, при этом растения способны успешно устранять загрязнители посредством процессов адсорбции, транспортировки и транслокации, гипераккумуляции или трансформации и минерализации [6–8]. Достоверно известно, что вегетационные фильтры на основе многолетних растений выполняют важную роль естественного фильтра-очистителя, улучшающего органолептические свойства и химический состав воды, поступающей с водосборных площадей в водоемы [9; 10]. Вегетационные фильтры, размещаемые на границе между источниками загрязнения и водной средой, являются потенциальным средством решения проблем, связанных с диффузным загрязнением [11]. Наряду с этим снижение воздействия сельского хозяйства на окружающую среду достигается путем внедрения многофункциональной системы производства растительной биомассы для целей биоэкономики [12].

Растения ивы обладают значительным потенциалом для фитоэкстракции благодаря их способности аккумулировать значительное количество питательных элементов тканями растений [13–15]. Известно, что при урожайности ивы 17–40 т/га, полученной за два года роста, потенциальный вынос азота с биомассой ивы составил 201–485 кг, фосфора – 30–70 кг [16]. Другие исследования [17] свидетельствуют, что за один трехлетний период роста растения фитоэкстракционная способность ивы в отношении азота составила 116–447 кг/га, фосфора – 23–86 кг/га.

Целью данного исследования являлось изучение морфологических параметров и биопродукционных характеристик растений *Salix alba*, используемых в качестве вегетационных фильтров для аккумуляции азота и фосфора на территории агроландшафтов.

Материалы и методы исследований

Полевой эксперимент для оценки морфологических параметров и биопродукционных характеристик растений *Salix alba*, а также аккумуляции азота и фосфора надземной биомассой растения проведен на базе учебно-научного комплекса «Волма», граничащего с угодьями сельскохозяйственного производственного кооператива «Холодон-Агро» Дзержинского района Минской области, в 2011–2016 гг. Экспериментальная площадка расположена в ложбине стока с координатами ($\varphi = 53^{\circ}52'35,43''$, $\lambda = 26^{\circ}58'20,32''$), которая сопряжена с сельскохозяйственными (пахотными) землями, систематически обрабатываемыми и используемыми под посеvy сельскохозяйственных культур.

Общая площадь водосбора в рамках ложбины стока составляет 1,32 га, из них: восточный склон – 0,48 га, северо-западный склон – 0,84 га. Средняя длина северо-западного склона составляет 200 м, восточного – 84,5 м. Средняя длина обоих склонов

в границах водосбора – 126,5 м. Длина ложбины стока – 102 м. Средний уклон северо-западного склона – 0,066 м/м, восточного – 0,138 м/м. Среднезвешенный уклон обоих склонов – 0,092 м/м.

Степень влагообеспеченности по гидротермическому коэффициенту увлажнения Селянинова характеризует 2012 г. как влажный, 2011 и 2014 гг. – оптимальные, 2013 и 2016 гг. – слабозасушливые, 2015 г. – засушливый.

Почва экспериментального участка дерново-подзолистая, развивающаяся на песчанисто-лессовидном суглинке, подстилаемом моренным суглинком. Агрохимический состав почвы: рН в КСІ – 5,6, гумус – 2,22 %, P_2O_5 – 61,1 мг/кг. Объектом исследования служил сорт Волмянка ивы белой (*Salix alba*), внесенный в Государственный реестр сортов и древесно-кустарниковых пород Республики Беларусь [18].

В качестве посадочного материала применялись одревесневшие черенки в безлистом состоянии длиной от 20 до 25 см, полученные из стадийно молодых частей *Salix alba*. Диаметр черенков в верхнем срезе составил не менее 1 см и не более 2 см. Посадка черенков выполнялась толстым концом вниз на глубину 15–22 см под углом 20–35 ° к поверхности почвы с сохранением надземной части в 3–4 см. Количество почек на надземной части черенка составляло 1–3 шт. Посадка черенков произведена 27.04.2011 г. Перед посадкой черенки замачивали на срок 4 суток для лучшего приживания. При подготовке участка осенью вносили гербицид сплошного действия (глифосат) для подавления сорной растительности. Удобрения при посадке ивы не вносились в соответствии с задачами исследований. Элементы питания растений поступали с территории расположенного на водосборе агроландшафта в соответствии с расположением экспериментального поля на пониженном участке рельефа.

Длина экспериментальной делянки – 25 м, ширина – 11 м, общая площадь – 275 м². На территории экспериментального участка выделены 4 делянки размером 50 м². Форма делянки прямоугольная. Длинная сторона делянки расположена перпендикулярно линии тальвега в ложбине стока. Повторность опыта четырехкратная. Расстояние между опытными делянками составляло 1,4 м. Схема посадки растений ленточная двухрядная, с расстоянием между лентами 140 см, между рядами в ленте – 70 см и между растениями в ряду – 50 см.

Оценка морфологических параметров и биопродукционных характеристик растений выполнена согласно методике полевого опыта [19; 20]. Измерения морфологических параметров проводили через каждые две недели начиная с посадки черенков ивы. Для измерения высоты растений использовали рулетку. Измерения проводили от корневой шейки до самой высокой точки растения. Диаметр стебля растений определяли штангенциркулем. Количество стеблей на одно растение определяли как среднеарифметический показатель из выборки растений по опытным вариантам.

Массовая доля общего азота в растениях определена методом Кьельдаля (ГОСТ 26715-85) [21], массовая доля общего фосфора – фотометрическим методом (ГОСТ 26717-85) [22].

Статистическая обработка результатов моделирования выполнена с помощью статистического пакета STATISTICA v.10.

Результаты и их обсуждение

Несмотря на отсутствие предпосадочного внесения удобрений процент приживаемости растений ивы на экспериментальном участке был достаточно высоким. Коэффициент приживаемости растения к концу 1-го и 2-го годов роста составил 0,944, 3-го года роста – 0,907. Такие показатели, в соответствии с данными литературных источников, не уступают величине коэффициента приживаемости, полученной для растений ивы при условии внесения удобрений в полной потребности.

Основные морфологические параметры и урожайность *Salix alba* за два трехлетних периода роста представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Морфологические параметры и урожайность *Salix alba* за два трехлетних периода роста

Параметр	1-й трехлетний период			2-й трехлетний период		
	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Количество стеблей, шт./растение	3,1 ± 0,34	3,1 ± 0,31	3,1 ± 0,31	3,4 ± 0,23	3,4 ± 0,29	3,4 ± 0,29
Диаметр стебля, мм	13,17 ± 1,21	20,1 ± 1,43	26,4 ± 1,82	14,04 ± 1,49	23,47 ± 2,03	28,86 ± 2,33
Высота стебля, см	152,5 ± 15,9	222,0 ± 33,1	334,3 ± 28,9	166,9 ± 19,1	263,5 ± 29,2	345,7 ± 37,7
Урожайность ивы, кг/га абс. сухого вещества	7 078	12 330	17 023	5 814	13 472	19 264

Количество стеблей растения в конце 1-го года роста первого трехлетнего периода роста составило 3,1 ± 0,34 шт./растение, 2-го и 3-го года роста – 3,1 ± 0,31 шт./растение.

Диаметр стебля растения в конце 1-го года первого трехлетнего периода роста в среднем составил 13,17 ± 1,21 мм, 2-го года – 20,1 ± 1,43 мм, 3-го года – 26,4 ± 1,82 мм. Максимальное утолщение диаметра стебля наблюдалось в июле, и за весь период наблюдения (2011–2013 гг.) составило в среднем 3,61 мм, принимая максимальное значение 4,6 мм в 2011 г.; минимальное в 2012 г. – 2,9 мм. К концу вегетационного периода утолщение стебля постепенно замедляется. В августе утолщение диаметра стебля по отношению к июлю замедлилось в 1,82 раза до 1,99 мм. В сентябре показатель утолщения стебля сохраняется примерно на уровне августа, а в октябре снижается до 0,22 мм.

К концу вегетационного периода 1-го года первого трехлетнего периода роста средняя высота и диаметр однолетних стеблей составили 152,5 ± 15,9 см и 13,7 ± 1,21 мм; к концу 2-го года роста высота и диаметр стебля увеличились на 69,5 см и 6,9 мм, что составило 222,0 ± 33,1 см и 20,1 ± 1,43 мм соответственно; к концу 3-го года роста высота и диаметр стебля увеличились на 121,3 см и 6,3 мм, достигнув 334,3 ± 28,9 см и 26,4 ± 1,82 мм соответственно.

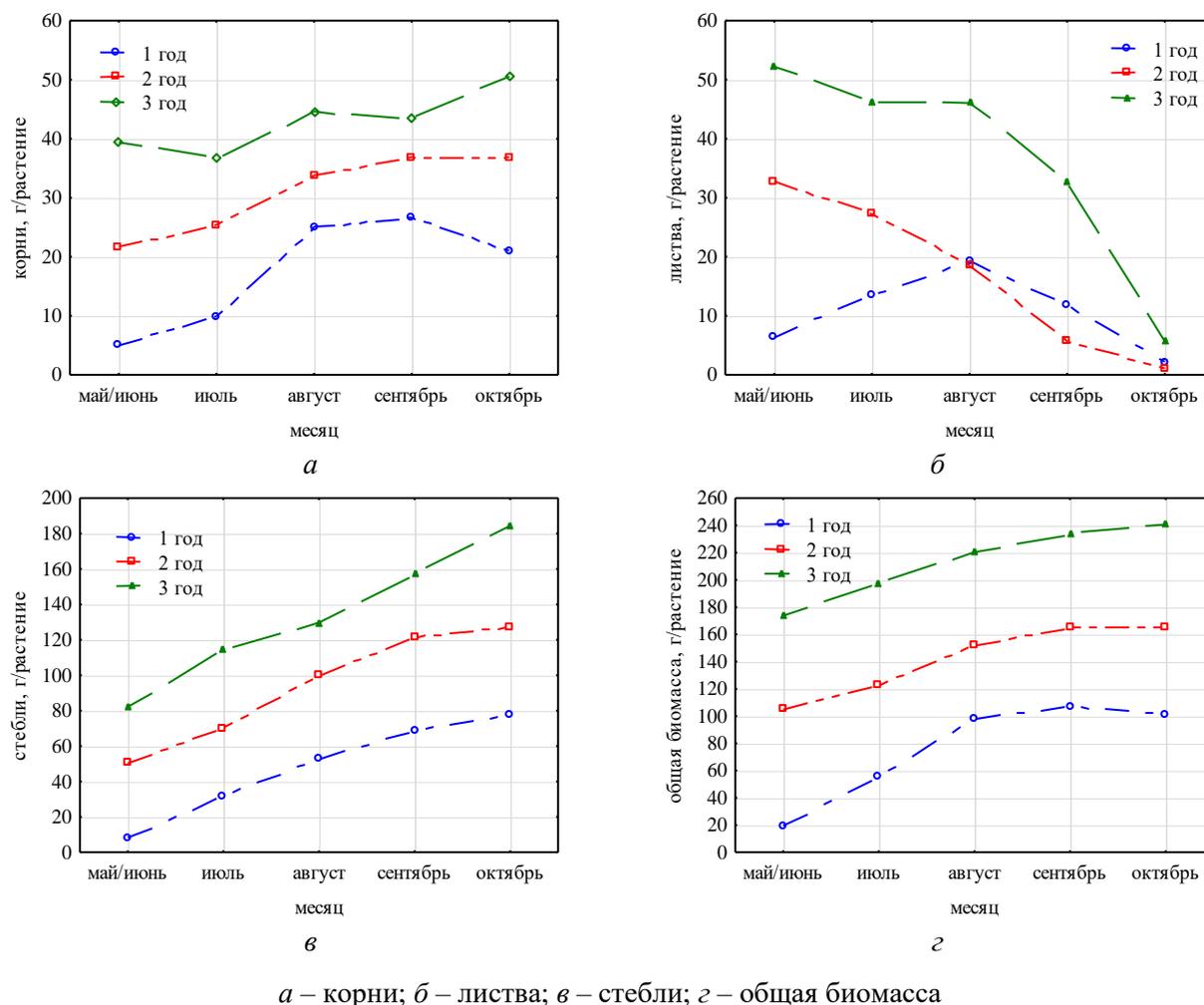
Во втором трехлетнем периоде роста диаметр стебля однолетнего растения в среднем составил 14,04 ± 1,49 мм, к концу 2-го года увеличился в 1,67 раза, а в третьем году роста – в 1,23 раза по отношению ко 2-му году, что составило 23,47 ± 2,03 и 28,86 ± 2,33 мм соответственно. Высота стебля однолетнего растения составила 166,9 ± 19,1 см, к концу 2-го года увеличилась в 1,58 раза и в 1,31 раза к концу 3-го года роста, что составило 263,5 ± 29,2 и 345,7 ± 37,7 см соответственно.

За два трехлетних периода роста высота и диаметр стебля растения в конце 1-го года роста составили 159,70 ± 10,18 и 27,63 ± 1,74 мм; 2-го – 242,75 ± 29,34 и 21,79 ± 2,37 мм; 3-го – 340,00 ± 8,06 и 27,63 ± 1,74 мм. Среднегодовое утолщение стебля за два трехлетних периода роста составило 9,21 ± 3,67 мм, а увеличение высоты стебля – 113,33 ± 38,92 мм.

Наиболее высокий сезонный прирост надземной биомассы растения наблюдается в июле – 23,8 ± 8,5 г/растение. В мае–июне прирост в 2,29 раза ниже, чем в июле – 8,1 ± 6,0 г/растение. В августе прирост биомассы находился на относительно высоком по отношению к июлю уровне – 21,0 ± 6,0 г/растение. В сентябре прирост замедляется

в 2 раза по отношению к августу – $10,4 \pm 3,4$ г/растение. В конце вегетационного периода прирост практически прекратился и составил $0,2 \pm 0,1$ г/растение.

Сезонная динамика средней динамики прироста биомассы отдельных органов растения в течение вегетационного периода представлена на рисунке 1.



а – корни; б – листья; в – стебли; г – общая биомасса

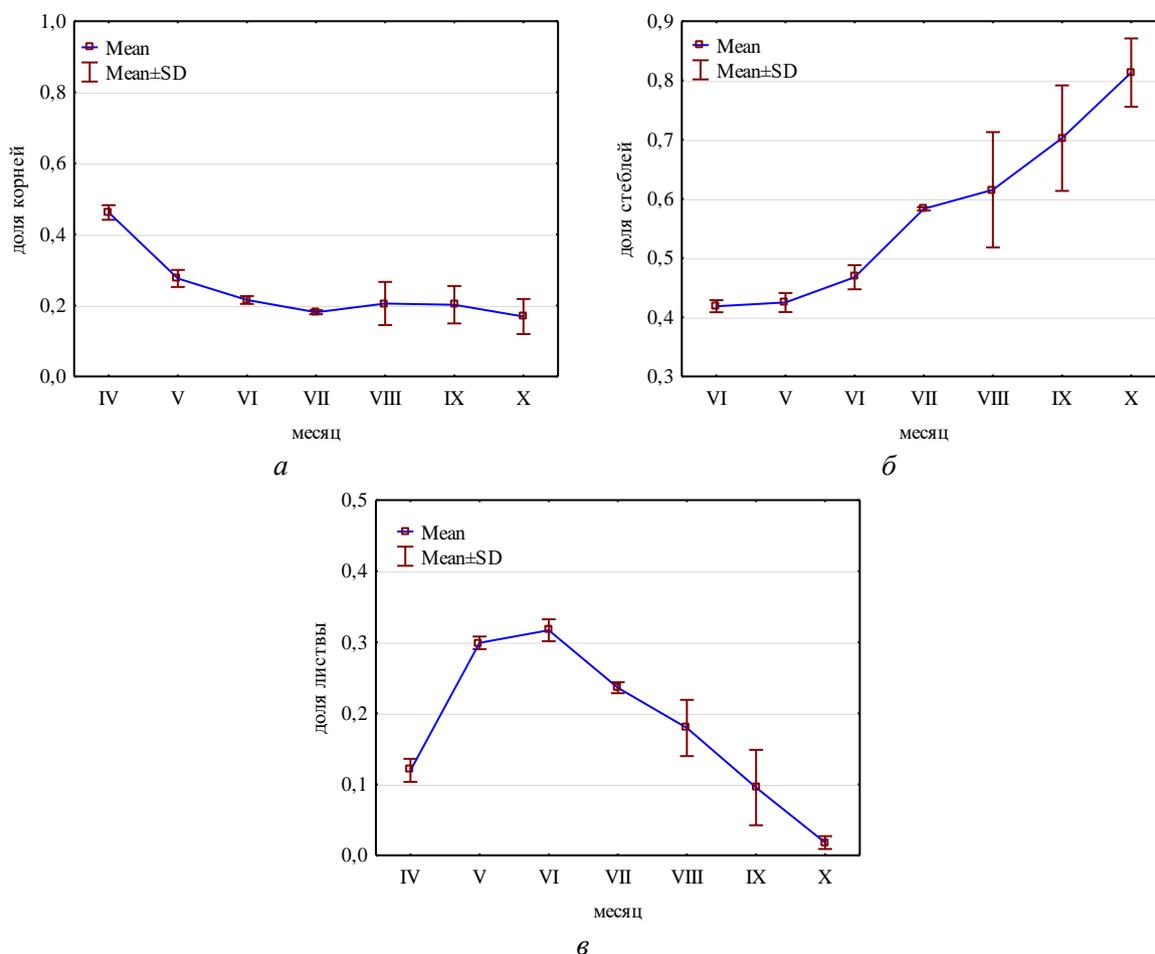
Рисунок 1 – Прирост биомассы *Salix alba* в течение вегетационного периода 2011–2013 гг.

Продуктивность надземной биомассы в среднем за два трехлетних периода роста к концу 1-го года роста составила $422,4 \pm 58,6$ г/растение; во 2-ом и 3-ем году – $868,1 \pm 85,3$ и $1\,188,6 \pm 103,8$ г/растение соответственно. В целом по результатам наблюдений урожайность ивы в конце 1-го года составила $6,45 \pm 0,89$ т/га абс. сух. вещества, 2-го и 3-го – $12,90 \pm 0,81$ т/га и $18,14 \pm 1,58$ т/га. соответственно. Прирост урожайности надземной биомассы *Salix alba* в конце 2-го и 3-го года составил $6,46 \pm 1,70$ и $5,24 \pm 0,78$ т/га абс. сух. вещества.

Доля биомассы корневой системы растения в среднем за период вегетации за первый трехлетний период наблюдения составила $0,24 \pm 0,10$, варьируя от 0,462 в начале до 0,169 в конце вегетационного периода. Доля листвы в общей биомассе растения принимает максимальное значение в мае–июне – $0,308 \pm 0,02$, минимальное значение в конце вегетации – $0,018 \pm 0,01$. С июля по октябрь наблюдается линейное снижение доли листвы в среднем на 0,075 в течение месяца. Доля биомассы стеблей в конце периода вегетации составила максимальное значение $0,813 \pm 0,03$; в апреле–июне минимальное – $0,437 \pm 0,03$. В среднем за месяц доля стеблей с мая по октябрь увеличивается на 0,086.

Максимальное увеличение доли биомассы стеблей наблюдается в мае–июне – 0,115, минимальное – в апреле – 0,006.

Доля биомассы отдельных органов растения в течение вегетационного периода за один трехлетний цикл с момента посадки представлена на рисунке 2.



а – корни; б – стебли; в – листья

Рисунок 2 – Доля биомассы органов *Salix alba* в течение вегетационного периода 2011–2013 гг.

Общая продуктивность биомассы *Salix alba* в конце 1-го года роста составила $160,6 \pm 10,4$ г/растение; 2-го года роста – $254,4 \pm 16,1$ г/растение; 3-го года роста – $424,8 \pm 23,1$. Продуктивность надземной биомассы растения в конце 1-го года роста составила $132,8 \pm 10,2$ г/растение; 2-го и 3-го года роста – $224,4 \pm 15,3$ и $234,0 \pm 19,0$ г/растение соответственно.

По результатам полевого эксперимента (2011–2013 гг.) содержание общего азота $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе ивы определено в конце вегетационного периода, которое в 1-й год роста составило $0,703 \pm 0,006$ %; 2-й и 3-й – $0,667 \pm 0,015$ и $0,640 \pm 0,010$ % соответственно. Содержание P_2O_5 в биомассе растения в 1-й год роста – $0,487 \pm 0,012$ %; 2-й и 3-й – $0,483 \pm 0,023$ и $0,480 \pm 0,010$ % соответственно.

При продуктивности сухой массы надземной биомассы за первый трехлетний период роста растения (2011–2013 гг.) накопление $N_{\text{общ}}$ в 1-й год роста составило

49,76 ± 0,42 кг/га, 2-й и 3-й – 82,24 ± 1,85 и 108,95 ± 1,70 кг/га соответственно. Накопленные фосфора растением в 1-й год роста составило 15,05 ± 0,37 кг/га; во 2-й и 3-й год – 26,00 ± 1,23 и 35,68 ± 0,47 кг/га соответственно.

По данным полевого эксперимента установлено влияние диаметра стебля *Salix alba* на его продуктивность (рисунок 3, а). Вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения представлено на рисунке 3, б.

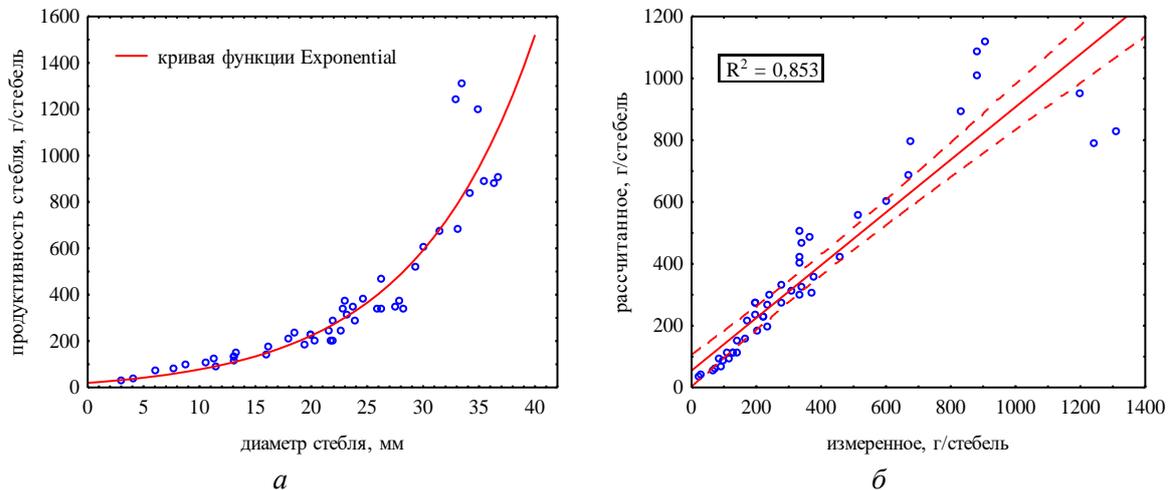


Рисунок 3 – Зависимость продуктивности стеблей *Salix alba* от их диаметра

Для расчета продуктивности стебля использована экспоненциальная функция (Exponential):

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

где m_s – масса стебля растения, г; y_0 – смещение кривой; A_1 – начальное значение кривой; R_0 – постоянная скорости роста кривой; x – диаметр стебля растения, мм.

Значения эмпирических коэффициентов функции (Exponential) для расчета продуктивности стебля представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Эмпирические коэффициенты функции (Exponential)

Коэффициент	y_0	A_1	R_0
	-18,173	38,028	0,093

Полученные результаты зависимости продуктивности стебля от его диаметра характеризуются высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий $t < 0 < t_{кр} = 1,7$; р-уровень – 0,49; коэффициент детерминации $R^2 = 0,853$. На основании вышепредставленных данных морфологических показателей и продуктивности *Salix alba*, полученных за два трехлетних периода роста (2011–2016 гг.) предложена формула для расчета общей урожайности надземной биомассы, т:

$$M_{н.б} = a \cdot \left(m_s + \frac{m_s}{\frac{f_{st}}{f_f}} \right) \cdot n_p \cdot n_{st} \cdot k_s \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где $a = 0,780$ – эмпирический коэффициент регрессии; n_p – количество растений, шт.; n_{st} – количество стеблей растения, шт./растение; k_s – коэффициент приживаемости растения; f_{st} – доля стеблей в общей биомассе растения; f_f – доля листвы в общей биомассе растения.

На основании общей урожайности надземной биомассы ивы, рассчитанной по формуле (2), и значений долей органов биомассы растения (рисунок 1) предложена формула для расчета урожайности подземной биомассы растения, т:

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

где f_r – доля корней в общей биомассе растения.

Общая урожайность ивы рассчитывается по формуле:

$$M_{б} = M_{n.б} + M_{n.б}. \quad (4)$$

Уравнения 1–4 позволяют определить урожайность биомассы растения в течение всего вегетационного периода. Результаты моделирования урожайности надземной биомассы растения за два трехлетних периода роста, которые получены на основании морфологических характеристик, представлены на рисунке. 4.

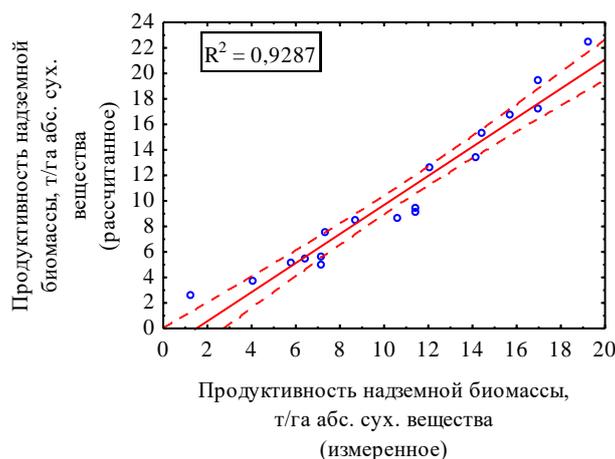


Рисунок 4 – Результаты моделирования урожайности надземной биомассы *Salix alba*

Полученные результаты зависимости урожайности растения от диаметра стебля характеризуются весьма высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий $t = 1,04 < t_{кр} = 1,76$; p -уровень – 0,157; коэффициент детерминации $R^2 = 0,929$. Средний модуль отклонений – 0,39 т/га, средний квадрат отклонений – 1,19 т/га, квадратный корень из среднеквадратической ошибки – 1,09 т/га, средняя абсолютная ошибка – 17,2 %.

Заключение

Обобщая вышепредставленные результаты исследований, констатируем, что сезонные морфологические данные можно использовать для упрощенного метода расчета урожайности ивы. Данный метод может быть востребован при составлении технико-экономического обоснования создания ивовых плантаций в качестве вегетационного

фільтра, а такжэ акумуляцыі N і P біомасой івы. Растення *Salix alba* могуць культываваться без дадатковага ўнесення мінеральных удобренняў пры пасадке плантацый у паніжэнных месцах рэльефа на тэрыторыі водасбора, прадстаўленага пераважна пахотнымі землямі.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов, С. А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: аналитический обзор / С. А. Михайлов. – Барнаул : День, 2000. – 130 с.
2. Обзоры результативности экологической деятельности: Беларусь (третий обзор, сокращенная версия) / К. Ф. Бах [и др.]. – Нью-Йорк ; Женева : ООН, 2016. – 60 с.
3. Экологический доклад по стратегической экологической оценке по проекту «Стратегии в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года» / И. Ф. Приходько [и др.]. – Минск : Респ. центр гос. экол. экспертизы и повышения квалификации руководящих работников и специалистов, 2021. – 221 с.
4. Khan, F. I. An overview and analysis of site remediation technologies / F. I. Khan, T. Husain, R. Hejazi // Journal of environmental management. – 2004. – Vol. 71, nr 2. – P. 95–122.
5. Licht, L. A. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities / L. A. Licht, J. G. Isebrands // Biomass Bioenergy. – 2005. – Vol. 28. – P. 203–218.
6. Ali, H. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications / H. Ali, E. Khan, M. A. Sajad // Chemosphere. – 2013. – Vol. 91. – P. 869–881.
7. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements / Z. Fischerová [et al.] // Environ. Pollut. – 2006. – Vol. 144. – P. 93–100.
8. Meagher, R. B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants / R. B. Meagher // Curr. Opin. Plant Biol. – 2000. – Vol. 3. – P. 153–162.
9. Broadmeadow, S. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: A literature review of best management practice / S. Broadmeadow, T. R. Nisbet // Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. – 2004. – Vol. 8. – P. 286–305.
10. Riparian forests mitigate harmful ecological effects of agricultural diffuse pollution in medium-sized streams / J. Turunen [et al.] // Sci. Total Environ. – 2019. – Vol. 649. – P. 495–503.
11. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics – a critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France / J-M. Dorioz [et al.] // Agric Ecosyst Environ. – 2006. – Vol. 117, nr 1. – P. 4–21.
12. Christen, B. Buffers for biomass production in temperate European agriculture: a review and synthesis on function, ecosystem services and implementation / B. Christen, T. Dalgaard // Biomass Bioenergy. – 2013. – Vol. 55. – P. 53–67.
13. Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Woody Plants with Deep-Planting Technique for the Potential Environmental Management of Carcass Burial Sites / K. Geonha [et al.] // Sustainability. – 2017. – Vol. 9, nr 1. – P. 155.
14. Greger, M. Use of willow in Phytoextraction / M. Greger, T. Landberg, // Int. J. Phytoremediat. – 1999. – Vol. 1, nr 2. – P. 115–123.
15. Neuschütz, C. Ability of various plant species to prevent leakage of N, P, and metals from sewage sludge / C. Neuschütz, M. Greger // Int. J. Phytoremediation. – 2009. – Vol. 12, nr 1. – P. 67–84.
16. An assessment of the multifunctionality of integrated buffer zones in northwestern Europe / D. Zak [et al.] // Environmental Quality. – 2019. – Vol. 48. – P. 362–375.

17. Potential efficiency of grassy or shrub willow buffer strips against nutrient runoff from soybean and corn fields in southern Quebec, Canada / L. Hénault-Ethier [et al.] // *Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48. – P. 352–361.
18. Государственный реестр сортов / сост.: Т. В Семашко [и др.] ; науч. ред. В. А. Бейня. – Минск : Гос. инспекция по испытанию и охране сортов растений, 2017. – 225 с.
19. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., доп. и перераб. – М. : Агропромиздат, 1985. – 351 с.
20. Карманова, И. В. Математические методы изучения роста и продуктивности растений / И. В. Карманова. – М. : Наука, 1976. – 221 с.
21. Удобрения органические. Методы определения общего азота : ГОСТ 26715-85. – Введ. РБ 17.12.92. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. – 16 с.
22. Удобрения органические. Метод определения общего фосфора : ГОСТ 26715-85. – Введ. РБ 17.12.92. – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1987. – 8 с.

REFERENCES

1. Mikhajlov, S. A. Diffuznoje zagriaznienije vodnoj ekosistemy. Mietody ocenki i matiematichieskije modeli: priedpolagajemyj obzor / S. A. Mikhajlov. – Barnaul : Dien', 2000. – 130 s.
2. Obzory riezul'tativnosti ekologichieskoj diejatel'nosti: Bielarus' (trietij obzor, sokrashchionnaja viersija) / K. F. Bakh [i dr.]. – N'ju-York ; Zhenieva : OON, 2016. – 60 s.
3. Ekologichieskij doklad po stratiegichieskoj ekologichieskoj ocenkie po projektu «Stratigii v oblasti okhrany okruzhajushchiej sriedy Riespubliki Bielarus' na pieriod do 2035 goda» / I. F. Prikhod'ko [i dr.]. – Minsk : Riesp. centr gos. ecol. ekspiertizy i povysheniya kvalifikacii rukovodiashchikh rabotnikov i spicialistov, 2021. – 221 s.
4. Khan, F. I. An overview and analysis of site remediation technologies / F. I. Khan, T. Husain, R. Hejazi // *Journal of environmental management*. – 2004. – Vol. 71, nr 2. – P. 95–122.
5. Licht, L. A. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities / L. A. Licht, J. G. Isebrands // *Biomass Bioenergy*. – 2005. – Vol. 28. – P. 203–218.
6. Ali, H. Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications / H. Ali, E. Khan, M. A. Sajad // *Chemosphere*. – 2013. – Vol. 91. – P. 869–881.
7. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements / Z. Fischerová [et al.] // *Environ. Pollut.* – 2006. – Vol. 144. – P. 93–100.
8. Meagher, R. B. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants / R. B. Meagher // *Curr. Opin. Plant Biol.* – 2000. – Vol. 3. – P. 153–162.
9. Broadmeadow, S. The effects of riparian forest management on the freshwater environment: A literature review of best management practice / S. Broadmeadow, T. R. Nisbet // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* – 2004. – Vol. 8. – P. 286–305.
10. Riparian forests mitigate harmful ecological effects of agricultural diffuse pollution in medium-sized streams / J. Turunen [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2019. – Vol. 649. – P. 495–503.
11. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics – a critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France / J-M. Dorioz [et al.] // *Agric Ecosyst Environ.* – 2006. – Vol. 117, nr 1. – P. 4–21.
12. Christen, B. Buffers for biomass production in temperate European agriculture: a review and synthesis on function, ecosystem services and implementation / B. Christen, T. Dalgaard // *Biomass Bioenergy*. – 2013. – Vol. 55. – P. 53–67.

13. Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Woody Plants with Deep-Planting Technique for the Potential Environmental Management of Carcass Burial Sites / K. Geonha [et al.] // *Sustainability*. – 2017. – Vol. 9, nr 1. – P. 155.
14. Greger, M. Use of willow in Phytoextraction / M. Greger, T. Landberg, // *Int. J. Phytoremediat.* – 1999. – Vol. 1, nr 2. – P. 115–123.
15. Neuschutz, C. Ability of various plant species to prevent leakage of N, P, and metals from sewage sludge / C. Neuschutz, M. Greger // *Int. J. Phytoremediation*. – 2009. – Vol. 12, nr 1. – P. 67–84.
16. An assessment of the multifunctionality of integrated buffer zones in northwestern Europe / D. Zak [et al.] // *Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48. – P. 362–375.
17. Potential efficiency of grassy or shrub willow buffer strips against nutrient runoff from soybean and corn fields in southern Quebec, Canada / L. Hénault-Ethier [et al.] // *Environmental Quality*. – 2019. – Vol. 48. – P. 352–361.
18. Gosudarstviennyj riejestr sortov / sost.: T. V. Siemashko [i dr.] ; nauch. ried. V. A. Biejnia. – Minsk : Gos. inspiekciya po ispytaniyu i okhranie sortov rastienij, 2017. – 225 s.
19. Dospiekhov, B. A. Mietodika polievogo opyta (s osnovami statistichieskoj obrabotki riezul'tatov issliedovaniy) / B. A. Dospiekhov. – 5-je izd., dop. i pierierab. – M. : Agropromizdat, 1985. – 351 s.
20. Karmanova, I. V. Matematichieskije mietody izuchienija rosta i produktivnosti rastienij / I. V. Karmanova. – M. : Nauka, 1976. – 221 s.
21. Udobrienija organichieskije. Mietody opriedielienija obshchiego azota : GOST 26715-85. – Vvied. RB 17.12.92. – Minsk : Belorus. gos. in-t standartizacii i siertifikacii, 1987. – 16 s.
22. Udobrienija organichieskije. Mietod opriedielienija obshchiego fosfora : GOST 26715-85. – Vvied. RB 17.12.92. – Minsk : Belorus. gos. in-t standartizacii i siertifikacii, 1987. – 8 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 15.02.2023