

УДК 581.5

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УРОВНЯ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И АККУМУЛЯЦИЮ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В БИОМАССЕ БЫСТРОРАСТУЩЕЙ ИВЫ

А. А. БУТЬКО¹⁾, О. И. РОДЬКИН²⁾, В. А. РАКОВИЧ³⁾, Н. Р. МАРКИТАНТОВ²⁾

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

²⁾Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

³⁾Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси,
ул. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследований по оценке влияния уровня минерального питания на морфологические параметры и аккумуляцию биогенных элементов в биомассе быстрорастущей ивы (*Salix alba*) сорт Волмянка. Вегетационный эксперимент для изучения зависимости морфологических параметров ивы и аккумуляции азота и фосфора в биомассе растений от уровня минерального питания был заложен на опытно-экспериментальной площадке (53°55'24,6" N, 27°40'04,7" E) Института природопользования НАН Беларуси. Вегетационный эксперимент осуществлялся по следующим вариантам: контроль, без дополнительного внесения минеральных удобрений; вариант N₅₀P₅₀ (доза внесения 1,5 г на сосуд), вариант N₁₀₀P₁₀₀ (доза внесения 3,0 г); вариант N₁₅₀P₁₅₀ (доза внесения 4,5 г). В вегетационном эксперименте получены зависимости содержания общего азота (N_{общ}) и P₂O₅ в биомассе растения ивы от доз внесения минеральных удобрений и содержания минерального азота (N_{мин}) и P₂O₅ в почве. Влияние содержания N_{мин} (N-NO₃+NH₄) в почве на содержание N_{общ} в биомассе растения выражается высокой степенью количественной и качественной характеристикой силы связи (R² = 0,778). Влияние содержания подвижного фосфора в почве (от 200 до 600 мг/кг) на содержание P₂O₅ в биомассе растения выражается умеренной количественной и качественной характеристикой силы связи (R² = 0,403); (от 600 до 900 мг/кг) – весьма высокой (R² = 0,928). Установлено влияние минеральных удобрений на содержание P₂O₅ и N_{общ} в надземной биомассе растения в течении вегетационного периода. Определено влияние доз минеральных удобрений на продуктивность и морфологические параметры надземной биомассы растений ивы. Результаты исследований подтверждают предположение об возможности использования плантации быстрорастущей ивы (*Salix alba*) сорта Волмянка в качестве вегетативного фильтра, способного аккумулировать азот и фосфор в биомассе растения, препятствовать их поступлению в водные объекты и снижать риск проявления эвтрофикации.

Ключевые слова: биогенные элементы; азот; фосфор; быстрорастущая ива; сорт Волмянка; *Salix alba*; продуктивность; морфологические параметры.

Образец цитирования:

Буцько АА, Родзькин ОИ, Ракович ВА, Маркитантов НР. Оценка влияния уровня минерального питания на морфологические параметры и аккумуляцию биогенных элементов в биомассе быстрорастущей ивы. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2021;4:54–64.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-54-64>

For citation:

Butsko AA, Rodzkin AI, Rakovich VA, Markitantov NR. Assessment of the influence of the level of mineral nutrition on the morphological parameters and accumulation of biogenous elements in the biomass of the fast-growing willow. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2021;4:54–64. Russian.
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2021-4-54-64>

Авторы:

Андрей Анатольевич Буцько – старший преподаватель кафедры энергоэффективных технологий.

Олег Иванович Родзькин – доктор биологических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной экологии.

Вячеслав Александрович Ракович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией биогеохимии и агроэкологии.

Николай Радомирович Маркитантов – студент факультета горного дела и экологии.

Authors:

Andrei A. Butsko, senior lecturer at the department of energy efficient technologies.

butko_andrei@mail.ru

Aleh I. Rodzkin, doctor sciences (biology), docent; head of the department of engineering ecology.

aleh.rodzkin@rambler.ru

Viacheslav A. Rakovich, PhD (engineering); head of the laboratory of biogeochemistry and agroecology.

mire4@tut.by

Nikolaj R. Markitantov, student, faculty of mining and ecology.
marknile@bk.ru

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE LEVEL OF MINERAL NUTRITION ON THE MORPHOLOGICAL PARAMETERS AND ACCUMULATION OF BIOGENOUS ELEMENTS IN THE BIOMASS OF THE FAST-GROWING WILLOW

A. A. BUTSKO^a, A. I. RODZKIN^b, V. A. RAKOVICH^c, N. R. MARKITANTOV^b

^aInternational Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,
23/1 Daŭhabrodskaja Street, Minsk 220070, Belarus

^bBelarusian National Technical University,
65 Niezaliežnasci Avenue, 220013 Minsk, Belarus

^cInstitute of Nature Management, National Academy of Sciences of Belarus,
10 Skaryny Street, Minsk 220076, Belarus

Corresponding author: A. I. Rodzkin (aleh.rodzkin@rambler.ru)

The article presents the results of studies for assessment of the influence of the level of mineral nutrition on the morphological parameters and accumulation of biogenic elements in the biomass of the fast-growing willow *Salix alba*, cv. Volmyanka. A vegetation experiment to study the dependence of the morphological parameters of willow and the accumulation of nitrogen and phosphorus in the biomass of plants on the level of mineral nutrition have been done at the experimental site (53°55'24.6 "N, 27°40'04.7" E) of the Institute of Research institute of nature management Academy of science of Belarus. The vegetation experiment was based on the following options: control, without additional application of mineral fertilizers; option N₅₀P₅₀ (dose of application 0.5 g per vessel); option N₁₀₀P₁₀₀ (the dose of application is 3.0 g per vessel); option N₁₅₀P₁₅₀ (dose of application 4.5 g). In the vegetation experiments, the dependences of the content of total nitrogen (N_{tot}) and P₂O₅ in the biomass of a willow plant from the doses of mineral fertilizers and the content of mineral nitrogen (N_{min}) and P₂O₅ in the soil were obtained. The influence of the content of N_{min} (N-O₃ + NH₄) in the soil on the content of N_{tot} in the plant biomass is expressed by a high degree of quantitative and qualitative characteristics of the correlation (R² = 0.778). The influence of the content of mobile phosphorus in the soil (from 200 to 600 mg/kg) on the content of P₂O₅ in the plant biomass is expressed by a moderate quantitative and qualitative characteristic of the correlation (R² = 0.403); (from 600 to 900 mg/kg) – very high (R² = 0.928). The influence of mineral fertilizers on the content of P₂O₅ and N_{tot} in the aboveground plant biomass during the growing season has been established. The influence of the doses of mineral fertilizers on the productivity and morphological parameters of the aboveground biomass of willow plants has been determined. The research results confirm the assumption about the possibility of using the plantation of fast-growing willow (*Salix alba*), cv. Volmyanka, as a vegetative filter capable to accumulate nitrogen and phosphorus in the plant biomass, preventing their penetration into water bodies and reducing the risk of eutrophication.

Keywords: nutrients; nitrogen; phosphorus; fast-growing willow; cultivar Volmyanka; *Salix alba*; productivity; growth rate.

Введение

Интерес к быстрорастущим древесным насаждениям, кроме возможности использования биомассы в качестве возобновляемого источника энергии, также обуславливается их высоким природоохранным потенциалом (сохранение биологического разнообразия, защита почв от водной и ветровой эрозии, снегозадержание, утилизация биогенных элементов, аккумуляция диоксида углерода) [1; 2].

В этой связи ива вызывает особый интерес как растение, способное произрастать в условиях повышенной увлажненности и на почвах, характеризующихся низким уровнем плодородия и высоким содержанием органических и минеральных загрязнителей. Например, перспективным направлением является использование потенциала быстрорастущих подвидов ивы в качестве вегетативных фильтров [3; 4].

Система «почва–растение» («почва–ива») в контексте вегетационного фильтра является основой для ряда экологических процессов, наиболее важными из которых являются:

- стабилизация и удержание взвешенных и питательных веществ, содержащихся в сточных водах частицами почвенно-поглощающего комплекса;
- разложение органического вещества почвенными макро- и микроорганизмами и бактериями;
- поглощение корневой системой растения питательных веществ и поллютантов, находящихся в сточных водах в непосредственно усвояемой форме или после разложения органического вещества почвы (рис. 1).

Эксперименты свидетельствуют о высокой эффективности ивовых посадок в качестве фильтров для утилизации азота и фосфора, которые являются основными биогенными загрязнителями водоемов, стимулирующих процесс эвтрофикации последних. Такие фильтры могут быть более экономичными, чем традиционные методы контроля эвтрофикации на территории водосборов. Ивовые посадки могут эффективно утилизировать азот и фосфор, которые накапливаются в листьях и стеблях, тем самым успешно выполняя фильтрующие функции [5; 6].

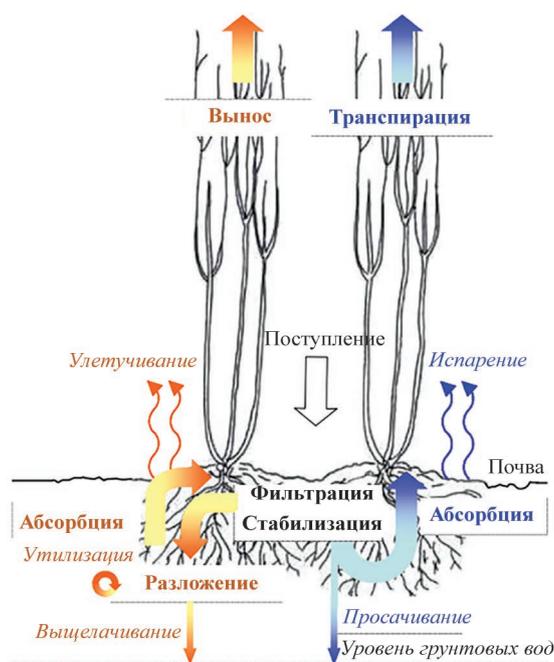


Рис. 1. Система «почва–растение» («почва–ива»)

Fig. 1. System «soil–plant» («soil–plant»)

Сезонная динамика роста растений, а также усвоение и хранение запасов питательных веществ в значительной степени контролируются внешними факторами [7–9]. Данные, взятые из научной литературы, и результаты настоящих исследований позволяют выделить закономерности в отношении роста, поглощения и распределения макроэлементов (азота и фосфора) в растениях ивы. Установлено, что содержание азота и фосфора в корнях, стеблях и листьях снижается в течение лета, в то время как содержание этих элементов в тканях увеличивается. Причем снижение содержания азота и фосфора в тканях наблюдается как при низком, так и при высоком уровне содержания питательных веществ в почве [10]. Осенью рост надземных побегов замедляется и полностью прекращается к моменту опадания листьев, что связано со снижением активности камбия. Установлено, что активность камбия полностью прекращается к концу осени при снижении температуры воздуха и продолжительности светового дня [11]. Развитие корневой системы растения осуществляется в течение всего осеннего периода [12]. Минеральный азот, попавший в это время года в почву, преобразуется в органический, который аккумулируется в корневой системе [13]. По результатам обширных исследований известно [14–17], что содержание азота в листьях, в том числе и ивы, осенью снижается, а многолетних органах растения увеличивается за счет ретранслокации. Ретранслокация также оказывает существенное влияние на снижение содержания фосфора в листьях перед ее опадом [16; 18]. В зимний период содержание азота, фосфора остается стабильным во всех органах многолетних растений. Способность к усвоению питательных веществ корневой системой ивы в условиях низких температур ранее не оценивалась количественно, но в ряде исследований установлен мелкокорневой рост ивы в середине зимы [12]. Весной выделяют три фазы развития: начало митотической активности, набухание и распускание почек и появление новых листьев. Максимальная концентрация азота в ксилемном соке наблюдается во время распускания почек и раннего развития листьев [19]. Содержание азота в корнях, черенках и стеблях снижается параллельно с развитием новых побегов [9; 20]. Установлено, что увеличения уровня питательных элементов оказывает положительное влияние на скорость роста растений.

Таким образом, представленный обзор доказывает перспективу использования плантаций ивы в качестве вегетативных фильтров, способных аккумулировать азот и фосфор в биомассе, препятствовать их поступлению в водные объекты и снижать риск проявления эвтрофикации. Одним из ключевых вопросов, который является целью наших исследований, – оценка уровня аккумуляции биогенных элементов в биомассе ивы от уровня минерального питания, что позволит прогнозировать объем содержания азота и фосфора в биомассе растений ивы и, соответственно, вынос этих элементов при уборке культуры.

Материалы и методы исследований

Вегетационный эксперимент для изучения зависимости морфологических параметров ивы и аккумуляции азота и фосфора в биомассе растений от уровня минерального питания был заложен на

опытно-экспериментальной площадке (53°55'24,6"N, 27°40'04,7"E) Института природопользования НАН Беларуси (рис. 2).



Рис. 2. Вегетационный эксперимент с растениями быстрорастущей ивы (*Salix alba*) сорт Волмянка

Fig. 2. Vegetation experiment with plants of fast-growing willow (*Salix alba*) cv. Volmyanka

В качестве посадочного материала использованы однолетние одревесневшие черенки ивы белой (*Salix alba*) сорт Волмянка [21], длиной 20 см и диаметром до 1 см. Перед посадкой черенки замачивали на срок 2-х суток для лучшего приживания. Черенки высажены 14.05.2021 в вегетационные сосуды объемом 0,019 м³, заполненные субстратом из смеси песка и торфа. Вид торфа тростниково-осоковый низинный, степень разложения 33 %. Образцы песка и торфа смешивались в соотношении 1:1.

Оценку морфометрических параметров и биопродукционных характеристик растений проводили согласно методике полевого опыта [22]. Измерения морфометрических параметров осуществлялось через каждые две недели, начиная с посадки черенков ивы. Для измерения высоты растений ивы от корневой шейки до самой высокой точки использовали рулетку. Диаметр стебля является одним из показателей, определяющих урожайность древесины ивы. Его устанавливали штангенциркулем. Количество стеблей на одно растение определяли как среднеарифметический показатель из выборки растений по опытным вариантам.

Повторность опыта 4-кратная, размещение вегетационных сосудов рендомизированное. В качестве подкормки использовано комплексное водорастворимое твердое гранулированное удобрение KRISTALON 18-18-18 Special Нидерландской компании «Яра Влардинген, Б. В.», включенное в Государственный реестр СЗР и удобрений 26.11.2021, используемых в Республике Беларусь. Их вносили 03.06.2021 в виде растворов [23]. Вегетационный эксперимент заложен по следующим вариантам: контроль, без дополнительного внесения минеральных удобрений; вариант N₅₀P₅₀ (доза внесения 1,5 г на сосуд); вариант N₁₀₀P₁₀₀. (доза внесения 3,0 г); вариант N₁₅₀P₁₅₀ (доза внесения 4,5 г д. в.).

Агрохимические показатели почв определяли по методикам: массовая доля общего азота определена методом Кьельдаля (ГОСТ 26715-85)¹; массовая доля общего фосфора – фотометрическим методом (ГОСТ 26717-85)²; нитратный азот – колориметрический метод с дисульфифеноловой кислотой [24]; аммиачный азот – колориметрически посредством реактива Несслера [24]; подвижные соединения фосфора – метод Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91)³. В качестве основного оборудования использован фотометр фотоэлектрический КФК-3. Почвенные образцы предварительно высушивали в лабораторных условиях в сушильном шкафу 2В-151 по ГОСТу 28268-89⁴. Образцы растительной биомассы измельчали и высушивали (ГОСТ 32975.3-2014)⁵.

Экспериментальные данные, полученные в результате исследований, обрабатывали по Б. А. Доспехову [22] с помощью методов дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализа на основе статистических программ *STATISTICA v.10* и *OriginPro v. 2018*.

Объект исследования – сорт Волмянка ивы белой (*Salix alba*), внесенный в Государственный реестр сортов и древесно-кустарниковых пород Республики Беларусь.

¹ГОСТ 26715-85. Удобрения органические. Методы определения общего азота: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

²ГОСТ 26717-85. Удобрения органические. Метод определения общего фосфора: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

³ГОСТ 26207-91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

⁴ГОСТ 28268-89. Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений: введ. РБ с 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 1992.

⁵ГОСТ 32975.3-2014 (EN 14774-3:2009). Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 3. Влага аналитическая: введ. РБ с 09.11.15. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации, 2015.

Предмет исследований – динамика аккумулирующей способности биогенных элементов биомассой быстрорастущей ивы в зависимости от уровня минерального питания.

Результаты исследования и их обсуждение

Обеспеченность почвы минеральным азотом $N_{\text{мин}}$ в контрольном варианте в течении всего вегетационного периода характеризуется как низкая; в начале вегетационного периода для вариантов $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$ – средняя и варианта $N_{150}P_{150}$ – высокая; в середине и конце вегетационного периода для всех вариантов – низкая. Динамика содержание ионов N ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) в почве характеризуются значительной сезонной зависимостью. Обеспеченность почвы минеральным азотом значительно выше в июне, чем в августе и октябре. В августе и октябре содержание $N_{\text{мин}}$ снижается незначительно в пределах 14,5–17 %. Сезонная динамика обеспеченности растения азотом в течении вегетационного периода представлена на рис. 3.

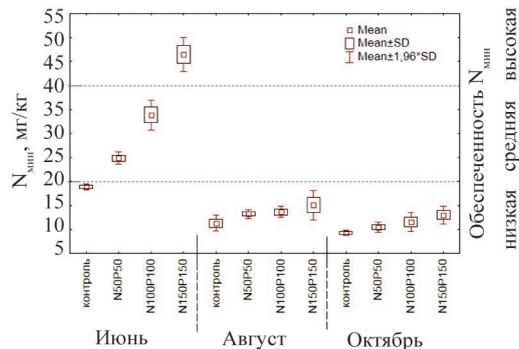


Рис. 3. Содержание и обеспеченность почвы минеральным азотом ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) $N_{\text{ферт}}$ в течении вегетационного периода

Fig. 3. Contents and level of supply of soil by mineral nitrogen ($N\text{-NO}_3\text{+NH}_4$) N_{fert} during vegetation

В разрезе вегетационного периода с июня по октябрь наблюдается снижение концентрации $N_{\text{общ}}$ в биомассе, что обусловлено его растворением вследствие быстрого роста надземной массы. Высокая концентрация $N_{\text{общ}}$ в биомассе в июне согласуется с повышенным содержанием $N\text{-NO}_3$ в почвенном растворе, откуда азот поглощается корневой системой растения. В контрольном варианте максимальное содержание $N_{\text{общ}}$ в биомассе в первой декаде июня составило 3,28 %, в августе и октябре наблюдалось снижение содержания по отношению к максимальному значению в 1,33 и 1,36 раза, что составило 2,17 и 2,08 %.

Однофакторный дисперсионный анализ не выявил статистически значимого отличия в содержании $N_{\text{общ}}$ в биомассе растения внутри вариантов в течении всего вегетационного периода. В начале периода p -уровень равен 0,43; ошибка разности средних значений – 0,074; HCP_{05} – 0,172. В середине периода p -уровень составил 0,88; ошибка разности средних значений – 0,123; HCP_{05} – 0,284. В конце периода p -уровень равен 0,81; ошибка разности средних значений – 0,015; HCP_{05} – 0,035.

Влияние фактора минеральных удобрений по результатам дисперсионного анализа на содержание $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе растения в начале вегетационного периода было 27,6 %, в середине – 7,4 %, в конце – 10,8 %. Уровень обеспеченности почвы подвижным фосфором во всех вариантах при различных дозах внесения минеральных удобрений характеризуется как очень высокий. В конце вегетационного периода в контрольном варианте уровень обеспеченности почвы подвижным фосфором определяется как высокий. Сезонная динамика обеспеченности растения P_2O_5 в течении вегетационного периода представлена на рис. 4.

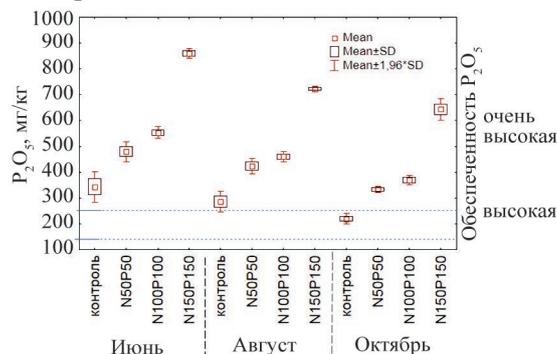


Рис. 4. Содержание и обеспеченность почвы подвижным фосфором P_2O_5 в течение вегетационного периода

Fig. 4. Contents and level of supply of soil by mobile phosphorus P_2O_5 during vegetation

В контрольном варианте максимальное содержание P_2O_5 в первой декаде июня составило $343,3 \pm 17,6$ мг/кг, в августе и октябре – $386,7 \pm 12,0$, $220 \pm 5,8$ мг/кг соответственно. Содержание P_2O_5 в почве к концу вегетационного периода снизилось на 36 %; в вариантах с удобрениями на 28–33 %.

В течение вегетационного периода (с июня по октябрь) наблюдается снижение концентрации P_2O_5 в биомассе. В контрольном варианте максимальное содержание P_2O_5 в первой декаде июня составило 0,74 %, в августе и октябре наблюдается снижение содержания по отношению к максимальному значению в 1,17 и 1,29 раза, что составило 0,61 и 0,51 % соответственно. В вариантах $N_{100}P_{100}$, $N_{150}P_{150}$ содержание P_2O_5 в биомассе в конце вегетационного периода было на 1,2 % выше по отношению к контролю.

Однофакторный дисперсионный анализ не выявил статистически значимого отличия в содержании P_2O_5 в биомассе растения внутри вариантов в течение всего вегетационного периода. В начале периода p -уровень равен 0,24; ошибка разности средних значений – 0,023; НСР₀₅ – 0,05. В середине периода p -уровень составил 0,68; ошибка разности средних значений – 0,047; НСР₀₅ – 0,11. В конце периода p -уровень равен 0,20; ошибка разности средних значений – 0,012; НСР₀₅ – 0,03.

По результатам дисперсионного анализа, влияние фактора минеральных удобрений на содержание P_2O_5 в надземной биомассе растения в начале вегетационного периода составило 38,6 %, в середине – 20,4 %, в конце – 15,7 %.

Графическая интерпретация регрессии, выполненная взвешенным методом наименьших квадратов, описывающая содержание $N_{\text{общ}}$ и P_2O_5 в биомассе растения от дозы внесения минеральных удобрений и содержания минерального азота в почве, представлена на рис. 5, а, б.

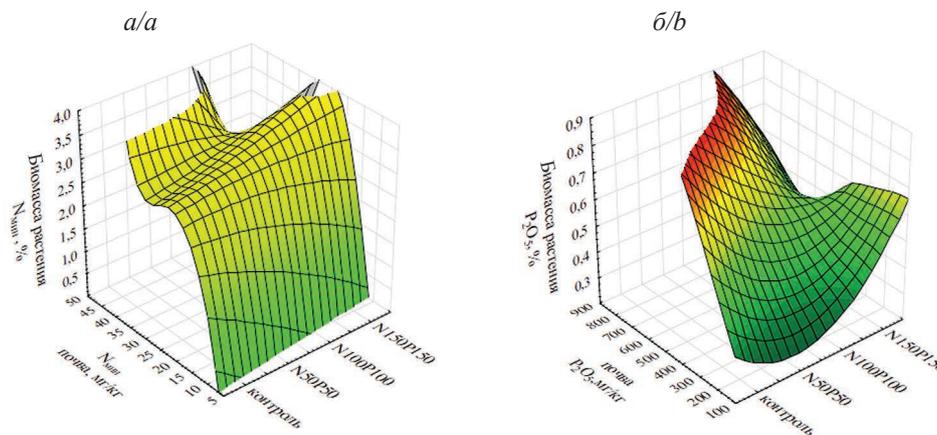


Рис. 5. Содержание $N_{\text{общ}}$ и P_2O_5 в биомассе растения ивы в зависимости от доз внесения минеральных удобрений и содержания $N_{\text{мин}}$ и P_2O_5 в почве

Fig. 5. Contents of $N_{\text{общ}}$ and P_2O_5 in plant biomass in depends of doses of fertilizer and N_{fert} and P_2O_5 contents in the soil

Для расчета содержания $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе растения от содержания $N_{\text{мин}}$ в почве использована сигмоидальная функция Больцмана [Boltzmann sigmoid function]:

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

где A_1 – начальное значение на кривой; A_2 – конечное значение на кривой; x_0 – центр кривой между конечным и конечным значением на кривой; dx – постоянная времени.

Для расчета содержания P_2O_5 в надземной биомассе растения от содержания P_2O_5 в почве использованы экспоненциальные функции [ExpGrow1]:

$$f_{(\text{ExpGrow1})} = y_0 + A_1 e^{(x-x_0)/t_1},$$

где y_0 – смещение кривой; A_1 – амплитуда кривой; t_1 – постоянные рассеивания; x_0 – центр кривой между конечным и конечным значением на кривой, а также [ExpDec1]:

$$f_{(\text{ExpDec1})} = y_0 + A_1 e^{(x/t_1)}.$$

Выбор использованных функций [Boltzmann sigmoid function], [ExpGrow1], [ExpDec1] обуславливается достижением максимального значения коэффициента множественной корреляции между содержанием $N_{\text{общ}}$, P_2O_5 в надземной биомассе растения и содержанием минерального азота и подвижного фосфора в почве. Коэффициент корреляции рассчитан на основании алгоритма Левенберга–Марквардта с помощью метода простых итераций.

Наличие $N_{\text{общ}}$ и P_2O_5 надземной биомассе растения рассчитано для всего диапазона содержания минерального азота и подвижного фосфора в почве. Для увеличения качественной и количественной силы связи между содержанием P_2O_5 в надземной биомассе растения и P_2O_5 в почве функция [ExpGrow1] используется при P_2O_5 в почве от 200 до 600 мг/кг; функция [ExpDec1] – при P_2O_5 в почве от 600 до 900 мг/кг.

Значения эмпирических коэффициентов функции Больцмана для расчета $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе растения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты функции [Boltzmann sigmoid function]

Table 1

Empirical coefficients of the function [Boltzmann sigmoid function]

Коэффициент	A_1	A_2	x_0	dx
$N_{\text{общ}}$	0,470	3,334	13,861	2,343

Значения эмпирических коэффициентов функции [ExpGrow1] для расчета P_2O_5 в надземной биомассе растения при содержании P_2O_5 в почве от 200 до 600 мг/кг представлены в табл. 2.

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты функции [ExpGrow1]

Table 2

Empirical coefficients of the function [ExpGrow1]

Коэффициент	y_0	x_0	A_1	t_1
P_2O_5 (200-600 мг/кг)	0,439	-364,013	0,010	270,740

Значения эмпирических коэффициентов функции [ExpDec1] для расчета P_2O_5 в надземной биомассе растения при содержании P_2O_5 в почве от 600 до 900 мг/кг представлены в табл. 3.

Таблица 3

Эмпирические коэффициенты функции [ExpDec1]

Table 3

Empirical coefficients of the function [ExpDec1]

Коэффициент	y_0	A_1	t_1
P_2O_5 (600-900 мг/кг)	0,820	-3,980	246,231

В качестве фактора, влияющего на изменение $N_{\text{общ}}$ в биомассе растения, принято содержание минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве $N_{\text{мин}}$ в течение вегетационного периода (рис. 6, а). Вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения представлено на рис. 6, б).

Полученные результаты накопления $N_{\text{общ}}$ в надземной биомассе растения от содержания минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве $N_{\text{мин}}$ в течение вегетационного периода характеризуются высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 0,277 < \chi^2_{\text{кр}} = 48,6$; ошибка разности средних значений – 0,450; коэффициент детерминации $R^2 = 0,778$.

В качестве фактора, влияющего на изменение P_2O_5 в биомассе растения, принято содержание подвижного P_2O_5 в почве; от 200 до 600 мг/кг (рис. 7, а); от 600 до 900 мг/кг (рис. 8, а).

Вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения представлено на рис. 7, б) и рис. 8, б).

Содержание подвижного фосфора в почве P_2O_5 от 200 до 600 мг/кг характеризуется умеренной количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 0,006 < \chi^2_{\text{кр}} = 37,63$; ошибка разности средних значений – 0,069; коэффициент детерминации $R^2 = 0,403$.

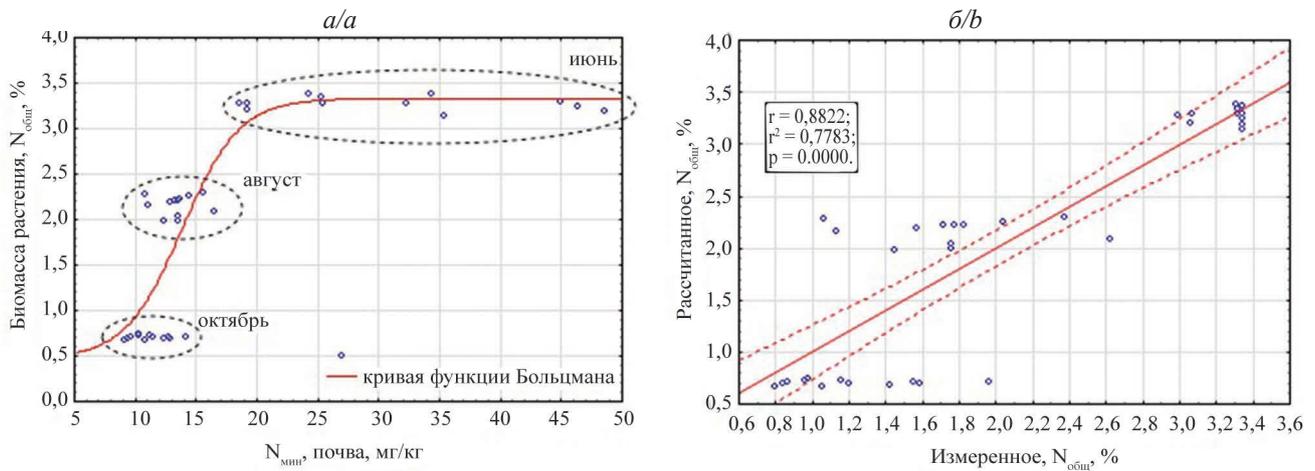


Рис. 6. Влияние содержание минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве на содержание $N_{обит}$ в биомассе растения (а); вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения (б)

Fig. 6. Influence of contents of mineral nitrogen ($N-NO_3+NH_4$) in the soil on contents of N_{tot} in plants biomass (а); the type of connection, assessment of parameters and quality of proposed analytic relationship (б)

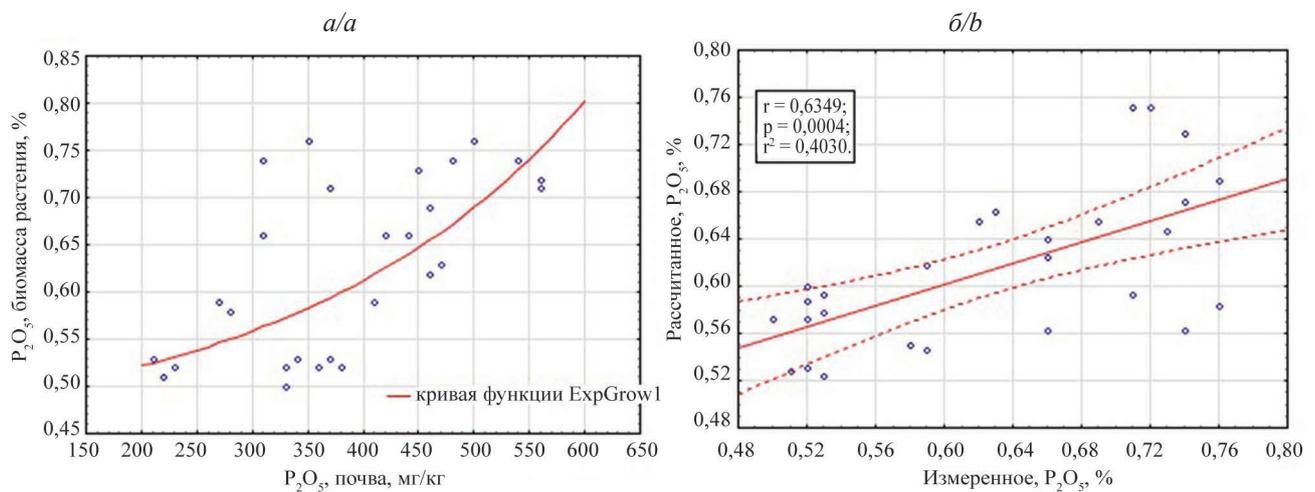


Рис. 7. Влияние содержание подвижного фосфора в почве на содержание P_2O_5 в биомассе растения(а); вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения (б)

Fig. 7. Influence of contents of mobile phosphor in the soil on contents of P_2O_5 in plants biomass (а); the type of connection, assessment of parameters and quality of proposed analytic relationship (б)

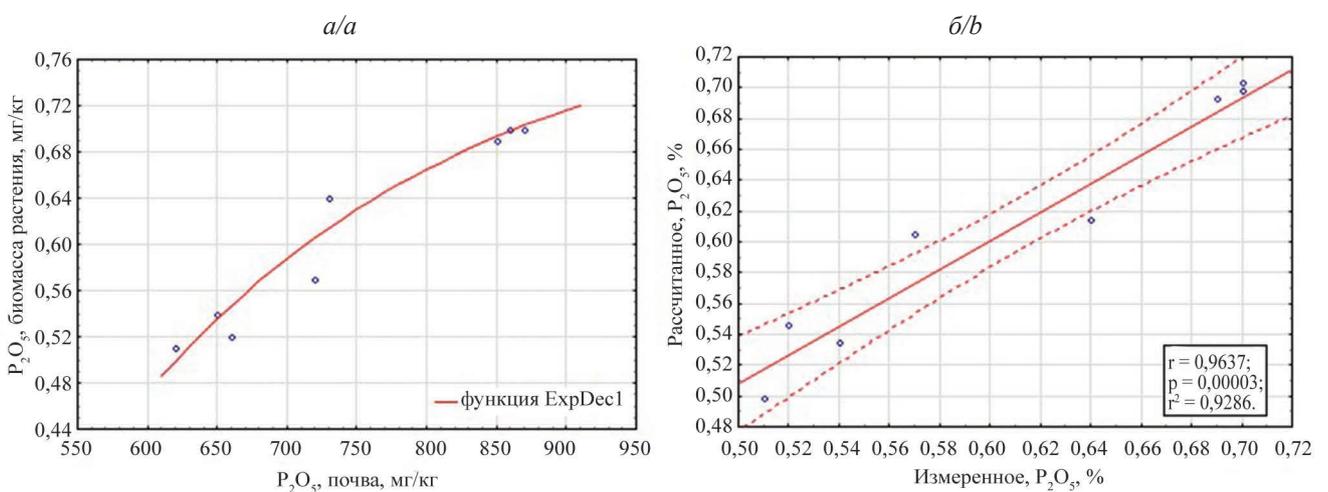


Рис. 8. Влияние содержание подвижного фосфора в почве на содержание P_2O_5 в биомассе растения (а); вид формы связи, оценка параметров и качество предлагаемого аналитического уравнения (б)

Fig. 8. Influence of contents of mobile phosphor in the soil on contents of P_2O_5 in plants biomass (а); the type of connection, assessment of parameters and quality of proposed analytic relationship (б)

Полученные результаты зависимости накопления P_2O_5 в надземной биомассе растения от содержания подвижного фосфора в почве при P_2O_5 от 600 до 900 мг/кг характеризуются весьма высокой количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 5,82 < \chi^2_{кр} = 15,5$; ошибка разности средних значений – 0,064; коэффициент детерминации $R^2 = 0,928$.

Продуктивность надземной биомассы растения в контрольном варианте составила $20,35 \pm 1,29$ г/сосуд; в вариантах $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$ наблюдается увеличение продуктивности на 5,6 и 13,3 %, что составило $22,26 \pm 1,26$ и $23,44 \pm 1,44$ г/сосуд, соответственно. В варианте $N_{150}P_{150}$ изменение продуктивности по отношению к контрольному варианту не превысило 1 %, а по отношению к вариантам $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$ уменьшилось на 7,9 и 12,7 %, соответственно. Влияние доз удобрения на продуктивность биомассы составила 10,5 % (рис. 9).

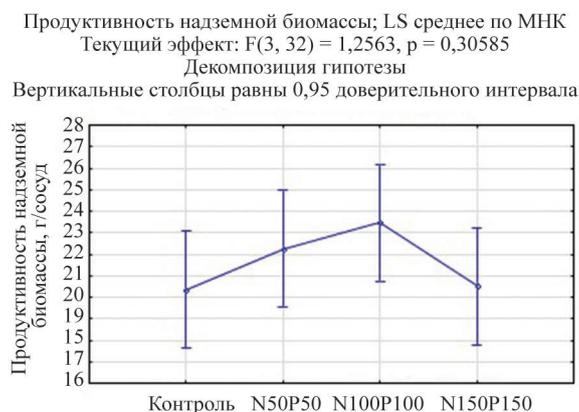


Рис. 9. Влияние доз внесения минеральных удобрений на продуктивность биомассы растения

Fig. 9. Influence of doses of fertilizer application on productivity of plants biomass

В конце вегетационного периода средняя высота растения в контрольном варианте составила $71,2 \pm 3,4$ см; в варианте $N_{50}P_{50}$ – $78,5 \pm 3,4$; $N_{100}P_{100}$ – $79,2 \pm 3,4$; $N_{150}P_{150}$ – $76,1 \pm 4,8$ см соответственно. В вариантах $N_{50}P_{50}$ и $N_{100}P_{100}$, $N_{150}P_{150}$ наблюдается увеличение высоты растений по отношению к контрольному варианту на 9,3, 10,0 и 6,4 %. Средняя скорость роста растения с момента посадки до первой декады июня в контрольном варианте составила – 1,566; $N_{50}P_{50}$ – 1,671; $N_{100}P_{100}$ – 1,528; $N_{150}P_{150}$ – 1,525 см/сутки соответственно. Скорость роста растения в варианте $N_{50}P_{50}$ выше по отношению к контролю на 6,3 %, а в вариантах $N_{100}P_{100}$, $N_{150}P_{150}$ ниже на 2,5 % и 2,7 %. С июня по июль скорость роста в контроле составила 0,908; $N_{50}P_{50}$ – 0,925; $N_{100}P_{100}$ – 0,990; $N_{150}P_{150}$ – 0,795 см/сутки, что меньше на 42,0, 73,0, 44,7 и 73,5 % по отношению к периоду с 14.05.2021 по 09.06.2021. Далее с 07.09.2021 по 11.08.2021 наблюдается более существенное снижение скорости роста растений, которая составила 0,245, 0,245, 0,253, 0,369 см/сутки. С 11.08.2021 по 03.09.2021 в контрольном варианте выявлено отсутствие роста растения, а для вариантов $N_{50}P_{50}$ – 0,038; $N_{100}P_{100}$ – 0,191; $N_{150}P_{150}$ – 0,077 см/сутки. С 03.09.2021 по 05.10.2021 по всем вариантам прирост биомассы постепенно останавливается. В вариантах с высоким содержанием питательных веществ растения прекратили рост примерно на две недели позже, чем растения в контрольном варианте с более низким содержанием питательных веществ.

В целом в течении вегетационного периода биомассы по всем вариантам статистически значимых различий в высоте растений растения в зависимости от доз внесении минеральных удобрений не выявлено. Влияние доз удобрения на высоту растения составила: июнь – 4,6 %; июль – 7,4 %; август – 1,0 %; сентябрь – 5,5 %; октябрь – 5,8 %.

Заклучение

В результате проведенных исследований было выявлено, что по всем вариантам вегетационного опыта наблюдаются сезонные изменения содержания азота и фосфора в биомассе растений ивы. Максимальное содержание элементов приходится приблизительно на середину вегетационного периода. При этом влияние фактора минеральных удобрений по результатам дисперсионного анализа на содержание $N_{общ}$ в надземной биомассе растения в начале вегетационного периода составило 27,6 %, в середине – 7,4 %, в конце – 10,8 %. По фосфору влияние фактора минеральных удобрений было несколько выше: в начале вегетационного периода – 38,6 %, в середине – 20,4 %, в конце – 15,7 % соответственно.

Результаты экспериментов позволили обосновать высокий уровень корреляции содержания азота и фосфора в биомассе ивы и почве. Результаты накопления $N_{общ}$ в надземной биомассе растения от содержание минерального азота ($N-NO_3+NH_4$) в почве $N_{мин}$ в течении вегетационного периода характеризуются высокой

количественной и качественной характеристикой силы связи; критерий Пирсона $\chi^2 = 0,277 < \chi^2_{кр} = 48,6$; ошибка разности средних значений – 0,450; коэффициент детерминации $R^2 = 0,778$. По фосфору уровень взаимосвязи факторов зависит от содержания подвижного P_2O_5 в почве. При среднем уровне (от 200 до 600 мг/кг почвы) коэффициент детерминации R^2 составил 0,403, а при высоком уровне от 600 до 900 мг/кг почвы) – $R^2 = 0,928$. Полученные результаты зависимости могут стать основой для моделирования прогнозного накопления азота и фосфора в биомассе ивы при различном содержании элементов в почве.

Внесение минеральных удобрений стимулирует продуктивность и увеличение морфологических параметров растений ивы до определенного уровня. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при максимальных дозах внесения минеральных удобрений ($N_{150}P_{150}$) наблюдается торможение ростовых процессов. Этот фактор необходимо учитывать при разработке технологии выращивания ивы в плантационных посадках.

Библиографические ссылки

1. Baum C, et al. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Landbauforschung Volkenrode*. 2009;59:183–196.
2. Hammar T, Hansson P-A, Sundberg C. Climate impact assessment of willow energy from a landscape perspective: a Swedish case study. *GCB Bioenergy*. 2017;9:973–985.
3. Aronsson P, Perttu K. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *Forestry Chronicle*. 2001;77:293–299.
4. Dimitriou I, Rosenqvist H. Sewage sludge and wastewater fertilization of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production. Biological and economic potential. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35:835–842.
5. Dimitriou I, Aransson P. Wastewater phytoremediation treatment system in Sweden using short rotation willow coppice. Short rotation crops for bioenergy. In: IEA Bioenergy task 30. Proceedings of the Conference, 1–5 December 2003, Mount Maunganui. Tauranga, New Zealand: International Energy Agency; 2003. p. 225–228.
6. Dimitriou I, Aransson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56:47–50.
7. Bollmark L, Sennerby-Forsse L, Ericsson T. Seasonal dynamics and effects of nitrogen supply rate on nitrogen and carbohydrate reserves in cutting-derived willow (*Salix viminalis* L.) plants. *Canadian Journal of Forest Research*. 1999;29:85–94.
8. Rytter L, Ericsson T. Leaf nutrient analysis in *Salix viminalis* L. energy forest stands growing on agricultural land. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 1993;156:349–356.
9. Fircks Y, Ericsson T, Sennerby-Forsse L. Seasonal variation of macronutrients in leaves, stems and roots of *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Biomass and Bioenergy*. 2001;21:321–334.
10. Nilsson L-O, Ericsson T. Influence of shoot age on growth and nutrient uptake patterns in a willow plantation. *Canadian Journal of Forest Research*. 1986;16:185–190.
11. Sennerby-Forsse L, Fircks HA. Ultrastructure of cells in the cambial region during winter hardening and spring dehardening in *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Trees*. 1987;1:151–163.
12. Rytter RM. Fine-root production and carbon and nitrogen allocation in basket willows [PhD thesis]. Silvestria: Swedish University of Agricultural Science; 1997. 36 p.
13. Dickson RE. Assimilate distribution and storage. *Physiology of trees*. 1991:51–85.
14. Ericsson T. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. *Journal of Forestry Science*. 1994;24(2–3):133–168.
15. Titus JS, Kang S-M. Nitrogen metabolism, translocation and recycling in apple trees. *Horticultural Reviews*. 1982;4:204–246.
16. Chapin FS, Kedrowski RA. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *Ecology*. 1983;64: 376–391.
17. Stepien V, Brun A, Botton B, Martin F. Protein bodies in bark cells of *Populus x euramericana*. *C. R. Academy Science Paris*. 1991;313:153–158.
18. Bernier B. Nutrient cycling in *Populus*: A literature review with implications in intensively managed plantations. In: IEA/ENFOR Report 5. Ottawa: Canadian Forest Service; 1984. 46 p.
19. Glavac V, Jochheim H. A contribution to understanding the internal nitrogen budget of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*. 1993;7:237–241.
20. Fircks von Y. Distribution and seasonal variation of macro-nutrients, starch and radio-nuclides in short rotation *Salix* plantations Department of Short Rotation Forestry. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 2000. 41 p.
21. Бейня ВА, редактор. *Государственный реестр сортов*. Минск: Государственная инспекция по испытанию и охране сортов растений; 2017. 225 с.
22. Доспехов БА. *Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований)*. Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.
23. *Государственный реестр средств защиты растений и удобрений, разрешенных к применению на территории Республики Беларусь*. Минск: Главная государственная инспекция по семеноводству, карантину и защите растений; 2017. 152 p.
24. Фролова АА, Анцелович МЕ, редакторы. *Агрохимические методы исследования почв*. Москва: Наука; 1965. 436 с.

References

1. Baum, C et al. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Landbauforschung Volkenrode*. 2009;59:183–196.
2. Hammar T, Hansson P-A, Sundberg C. Climate impact assessment of willow energy from a landscape perspective: a Swedish case study. *GCB Bioenergy*. 2017;9:973–985.
3. Aronsson P, Perttu K. Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *Forestry Chronicle*. 2001;77:293–299.

4. Dimitriou I, Rosenqvist H. Sewage sludge and wastewater fertilization of Short Rotation Coppice (SRC) for increased bioenergy production. Biological and economic potential. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35:835–842.
5. Dimitriou I, Aransson P. Wastewater phytoremediation treatment system in Sweden using short rotation willow coppice. Short rotation crops for bioenergy. In: IEA Bioenergy task 30. Proceedings of the Conference, 1–5 December 2003, Mount Maunganui. Tauranga, New Zealand: International Energy Agency; 2003. p. 225–228.
6. Dimitriou I, Aransson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva*. 2005;56:47–50.
7. Bollmark L, Sennerby-Forsse L, Ericsson T. Seasonal dynamics and effects of nitrogen supply rate on nitrogen and carbohydrate reserves in cutting-derived willow (*Salix viminalis* L.) plants. *Canadian Journal of Forest Research*. 1999;29:85–94.
8. Rytter L, Ericsson T. Leaf nutrient analysis in *Salix viminalis* L. energy forest stands growing on agricultural land. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 1993;156:349–356.
9. Fircks Y, Ericsson T, Sennerby-Forsse L. Seasonal variation of macronutrients in leaves, stems and roots of *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Biomass and Bioenergy*. 2001;21:321–334.
10. Nilsson L-O, Ericsson T. Influence of shoot age on growth and nutrient uptake patterns in a willow plantation. *Canadian Journal of Forest Research*. 1986;16:185–190.
11. Sennerby-Forsse L, Fircks HA. Ultrastructure of cells in the cambial region during winter hardening and spring dehardening in *Salix dasyclados* Wimm. grown at two nutrient levels. *Trees*. 1987;1:151–163.
12. Rytter RM. Fine-root production and carbon and nitrogen allocation in basket willows [PhD thesis]. Silvestria: Swedish University of Agricultural Science; 1997. 36 p.
13. Dickson RE. Assimilate distribution and storage. *Physiology of trees*. 1991:51–85.
14. Ericsson T. Nutrient dynamics and requirements of forest crops. *Journal of Forestry Science*. 1994;24(2–3):133–168.
15. Titus JS, Kang S-M. Nitrogen metabolism, translocation and recycling in apple trees. *Horticultural Reviews*. 1982;4:204–246.
16. Chapin FS, Kedrowski RA. Seasonal changes in nitrogen and phosphorus fractions and autumn retranslocation in evergreen and deciduous taiga trees. *Ecology*. 1983;64: 376–391.
17. Stepien V, Brun A, Botton B, Martin F. Protein bodies in bark cells of *Populus x euramericana*. *C. R. Academy Science Paris*. 1991;313:153–158.
18. Bernier B. Nutrient cycling in *Populus*: A literature review with implications in intensively managed plantations. In: IEA/ENFOR Report 5. Ottawa: Canadian Forest Service; 1984. 46 p.
19. Glavac V, Jochheim H. A contribution to understanding the internal nitrogen budget of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Trees*. 1993;7:237–241.
20. Fircks von Y. Distribution and seasonal variation of macro-nutrients, starch and radio-nuclides in short rotation *Salix* plantations Department of Short Rotation Forestry. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 2000. 41 p.
21. Semashko TV, editor. *Gosudarstvennyj reestr sortov* [State register of varieties]. Minsk: State Inspectorate for testing and protection of plant varieties; 2017. 225 p. Russian.
22. Dospheov VA. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij)* [Field experiment methodology (with the basics of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat; 1985. 351 p. Russian.
23. *Gosudarstvennyj reestr sredstv zashhity rastenij i udobrenij, razreshennyh k primeneniju na territorii Respubliki Belarus* [State Register of plant protection products and fertilizers permitted for use on the territory of the Republic of Belarus]. Minsk: State Inspection for seed breeding, plant protection and quarantine; 2017. 152 p. Russian.
24. Frolova AA, Ancelovich ME, editors. *Agrohimicheskie metody issledovanija pochv* [Agrochemical methods of soils investigation]. Moscow: Science; 1965. 463 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 02.12.2021.
Received by editorial board 02.12.2021.