

УДК 628.336.41:628.38

Н. И. Шепелева, В. Н. Марцунь, И. В. Войтов, А. В. Юреня
Белорусский государственный технологический университет

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ФИТОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ КОРОТКОГО ЦИКЛА РОТАЦИИ НА НЕЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ИЛОВЫХ КАРТАХ

Сообщается о результатах исследования древовидно-кустарникового фитоценоза, сформировавшегося в естественных условиях на субстрате из осадков сточных вод, накопленных на неэксплуатируемой иловой площадке очистных сооружений канализации г. Минска. В ходе рекогносцировочного обследования иловой площадки установили преобладание в составе естественного фитоценоза быстрорастущих древовидных кустарников ивы: *Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*, *Salix cinerea*.

Для определения возможности создания фитомелиоративной системы короткого цикла ротации на основе неэксплуатируемой иловой карты исследовали агрофизические и агрохимические показатели накопленных осадков сточных вод, проводили наблюдения за ростом и развитием древовидных кустарников ивы, сформировавшихся в естественных условиях. Установлена пригодность использования накопленных осадков сточных вод в качестве субстрата для выращивания древовидных кустарников ивы рода *Salix* и обоснована возможность создания фитомелиоративных систем короткого цикла ротации на основе неэксплуатируемых иловых карт. Расчетная величина среднего ежегодного прироста «энергетической» биомассы при плотности посадки растений ивы 15,3 тыс. шт./га составит 8,4 т с. в./га.

Определено влияние древовидных кустарников ивы рода *Salix* на изменение физических и химических характеристик накопленных осадков сточных вод. Развитие растений ивы приводит к увеличению в стромосфере (0–40 см) доли крупнодисперсных частиц фракций 3–1 мм – на 0,64%, 1,0–0,5 мм – на 10,30%, а также росту пористости – на 52,8% и снижению насыпной плотности – на 28,0%, что в долгосрочном периоде способствует корректировке водного режима территории переувлажненных иловых площадок.

Ключевые слова: осадки сточных вод, тяжелые металлы, фитомелиорация, биомасса ивы, энергетическая плантация.

N. I. Shepeleva, V. N. Martsul', I. V. Voitau, A. V. Yurenja
Belarusian State Technological University

PECULIARITIES OF PHYTOMELIORATIVE SHORT CROP ROTATION SYSTEM DEVELOPMENT ON THE BASE OF UNEXPLOITED SEWAGE SLUDGE LAGOONS

The investigation results of a tree-shrub phytocenosis formed under natural conditions on a substrate from sewage sludge accumulated on unexploited sludge lagoon of Minsk wastewater treatment plant are reported. Due to the preliminary survey of the site area a fast-growing shrub vegetation of *Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*, *Salix cinerea* prevailed in the composition of the natural phytocenosis.

To establish the possibility of creating a phyto-meliorative short crop rotation system on the basis of unexploited sludge lagoons, the agrophysical and agrochemical indicators of accumulated sewage sludge along with growth and development of willow shrub formed under natural conditions were investigated. The capability of accumulated sewage sludge using as a substrate for *Salix* shrub cultivation and the possibility of phyto-meliorative short crop rotation system creating on the basis of unexploited sludge lagoons is substantiated. The estimated value of average annual yield of “energetic” biomass is 8.4 t d. m./ha for the planting density equivalent to $15.3 \cdot 10^3$ pcs/ha.

The influence of *Salix* shrub on the physical and chemical characteristics of accumulated sewage sludge is determined. Development of willow plants in the stromosphere layer (0–40 cm) leads to 3–1 and 1.0–0.5 mm soil particles portion increase by 0.64% and 10.30% respectively, porosity rise by 52.8% and bulk density reduction by 28.0%, such processes make contribution to the correction of sludge lagoons water regime in the long run.

Key words: sewage sludge, heavy metals, phytomelioration, willow biomass, energetic plantation.

Введение. Особенность системы обращения с осадками сточных вод (ОСВ) в Беларуси заключается в том, что длительное время основным способом обработки данных отходов

очистных сооружений канализации (ОСК) являлось размещение на картах иловых площадок (ИП) для обезвоживания и подсушки в естественных условиях окружающей среды.

Длительный период отсутствия в стране нормативной базы, регламентирующей требования к качеству ОСВ в зависимости от направления использования, привел к тому, что дальнейшее вовлечение их в хозяйственно-экономический оборот затруднено. Таким образом, ИП из сооружений по обработке превратились в объекты долговременного хранения отходов, на которых в настоящее время накоплено свыше 9 млн т ОСВ. В странах Европейского союза и США подобный способ обращения законодательно приравнивается к захоронению отходов.

Большинство технологических решений по использованию накопленных ОСВ предусматривают изъятие отходов с ИП для последующей обработки по известным технологиям, таким как компостирование, сжигание и пр., а также мероприятия по рекультивации техногенно-загрязненных земель. Однако, длительное хранение ОСВ привело к загрязнению подземных вод и близлежащих территорий на большинстве ИП Беларуси, что делает неактуальным использование данных земель под нужды сельского хозяйства.

Разработке способа вовлечения накопленных ОСВ в хозяйственный оборот предшествовало рекогносцировочное обследование неэксплуатируемых ИП ОСК г. Минска, в ходе которого установили факт естественного зарастания данных территорий с формированием древовидно-кустарникового фитоценоза, состоящего преимущественно из быстрорастущих растений ивы, березы, тополя, татарника, тростника, рогоза, аира и др. Таким образом, накопленные ОСВ более перспективно рассматривать как готовый субстрат для создания фитомелиоративных систем короткого цикла ротации. Данный способ использования не требует извлечения накопленных ОСВ с карт ИП и является многообещающим в плане создания источника местных топливно-энергетических ресурсов.

До настоящего времени установить пригодность неэксплуатируемых ИП для выращивания «энергетической» биомассы не представлялось возможным, поскольку не были решены следующие задачи: не определены агрофизические свойства накопленных ОСВ, не исследованы вопросы роста и развития древовидно-кустарниковых пород на данном субстрате, не рассмотрена возможность рекультивации существующими видами сельскохозяйственной техники. Поэтому при проведении экспериментальных исследований неэксплуатируемых ИП ОСК г. Минска учитывали доминирующие виды растительности локального фитоценоза, наличие которых рассматривали как первостепенный показатель пригодности накопленных ОСВ в качестве питательного субстрата для

культивирования отдельных видов «энергетической» биомассы.

Основная часть. Образцы накопленных ОСВ отбирали в период 2014–2017 гг. с иловой карты (д. Мацевичи), закрытой в 1990 г. При закладке почвенного разреза установили неравномерность состава грунтового профиля, поэтому взятие проб осуществляли с двух генетических горизонтов: 0–40 см (горизонт A_1) и 41–110 см (горизонт G_1).

Методом прикопок установили, что основная масса корней древовидно-кустарниковой растительности (до 97%) расположена в горизонте A_1 , который является стромосферой исследуемого фитоценоза. Данная особенность естественного фитоценоза позволила оценить влияние древовидно-кустарниковой растительности на преобразование агрохимических и агрофизических показателей горизонта A_1 по сравнению с горизонтом G_1 , который не был затронут почвопреобразующими процессами из-за сложившихся в нем анаэробных условий, и по сути является так называемым «исходным» субстратом. Из каждого генетического горизонта методом конверта отбирали образцы накопленного ОСВ массой 2,0 кг, которые после усреднения состава использовали для проведения экспериментальных исследований. Гранулометрический состав горизонтов A_1 , G_1 представлен на рис. 1.

Как видно из представленных данных, в составе горизонтов A_1 , G_1 преобладают частицы фракции 0,25–0,05 мм, доли которых составляют 46,29 и 56,40% соответственно. Горизонт A_1 в процессе пробоотбора имел более рыхлую структуру, что связано с наличием в его составе значительной доли крупнодисперсных частиц фракций 3–1, 1,0–0,5 мм, содержание которых соответственно на 0,64 и 10,30% выше по сравнению с горизонтом G_1 . Нижний горизонт G_1 , напротив, имел более связную текстуру, а содержание частиц менее 10 мкм и физической глины в нем оказалось на 2,36 и 0,59% выше аналогичных показателей горизонта A_1 . По классификации грунтов Н. А. Качинского, генетические горизонты A_1 и G_1 относятся к супесям связным мелкопесчаным некаменистым [1].

Полевая влажность двух горизонтов значительно отличалась: 43,5% – A_1 , 70,4% – G_1 , однако, величина данного показателя существенным образом зависит от сезона года и режима выпадения атмосферных осадков. По результатам экспериментальных исследований, насыпная плотность грунта, слагающего горизонт A_1 , составила 0,58 г/см³, пористость – 72,8%, что, соответственно, на 52,8% менее и на 28,0% более аналогичных показателей грунта горизонта G_1 .

Содержание, %

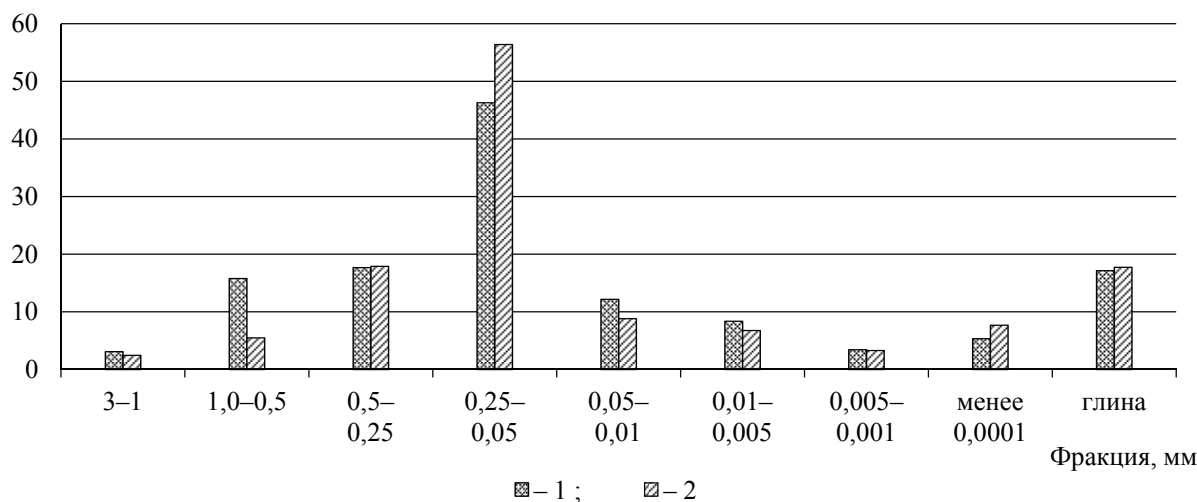


Рис. 1. Гранулометрический состав генетических горизонтов:
1 – A_1 ; 2 – G_1

Плотность твердой фазы грунта составила 2,13 и 2,23 г/см³ для горизонтов A_1 и G_1 , соответственно. По классификации Н. А. Качинского, плотность твердой фазы сильноуплотненных иллювиальных горизонтов подзолистых почв составляет 2,7–2,8 г/см³, сильно разложившихся уплотненных горизонтов торфяных почв – 2,0–2,4 г/см³, слабо разложившихся торфяных слоев – 1,5–2,0 г/см³ [1]. Таким образом, плотность твердой фазы грунта неэксплуатируемой ИП по данной классификации соответствует сильно разложившимся уплотненным горизонтам торфяных почв. Следовательно, для организации фитомелиоративных систем и выполнения всего цикла агротехнических работ на данных территориях может использоваться система машин и технологические решения, разработанные применительно к торфяным почвам. Важным элементом создания «энергетических» плантаций является также организация уборки биомассы, что требует использования специальной системы машин, например оборудования по заготовке растительной биомассы с территорий повторно-заболоченных земель [2].

В ходе рекогносцировочного обследования естественного фитоценоза исследуемой ИП установили преобладающее наличие древовидных кустарников ивы: *Salix aurita* (ива ушастая), *Salix caprea* (ива козья), *Salix fragilis* (ива ломкая), *Salix cinerea* (ива серая). Реже встречали быстрорастущие деревья семейства ивовых – *Populus tremula* (тополь дрожащий), *Populus nigra* (тополь черный), а также березовые – *Alnus glutinosa* (ольха клейкая), *Betula pubescens* (береза пушистая), *Betula verrucosa* (береза бородавчатая). В состав живого напоч-

венного покрова входили: сфагновые и гипновые мхи, эпифитные лишайники, травяные, моховые и полукустарниковые растения. Толщина лесной подстилки в осенний период варьировалась в пределах 5,0–8,5 см, растительный опад представлен в основном ветвями и листьями ивы, ольхи, тополя, а также остатками травянистой растительности.

Для оценки питательной ценности накопленных ОСВ определяли агрохимические показатели грунтов горизонтов A_1 , G_1 : pH солевой вытяжки [3], а также массовые доли органических веществ [4], общего азота [5], фосфора [6] и калия [7], результаты исследований представлены в таблице.

Агрохимические показатели генетических горизонтов

Наименование показателя	Генетический горизонт		Норматив [8]
	A_1	G_1	
Органические вещества, % с. в.	8,31	13,51	50,0
Общий азот, % с. в.	2,13	2,85	0,6
Общий фосфор (P_2O_5), %	1,95	2,34	1,5
Общий калий (K_2O), % с. в.	0,3	0,8	0,6
pH _{сол}	7,78	9,5	5,5–8,5

В грунтах обнаружили низкое содержание органических веществ – закономерный результат протекания долговременных процессов минерализации и стабилизации органической части накопленных ОСВ при хранении на ИП. Благодаря влиянию почвопреобразующих процессов, содержание органических веществ в грунте горизонта A_1 уменьшилось на 5,2% по сравнению с горизонтом G_1 . Сравнивая значения

данного показателя с величиной норматива для использования ОСВ как органического удобрения, можно сказать, что исследуемые ОСВ не отвечают установленным требованиям [8], так как содержание органических веществ в них в 4–6 раз ниже. Данный факт является очередным подтверждением нецелесообразности извлечения накопленных ОСВ с ИП для использования в качестве органических удобрений под сельскохозяйственные культуры. По содержанию остальных питательных элементов – общего азота, фосфора и калия – исследуемые грунты удовлетворяют нормативам [8], причем в горизонте A_1 (стромосфере) наблюдается незначительное снижение данных показателей – на 0,72, 0,39 и 0,5% соответственно.

pH солевой вытяжки исследуемых горизонтов составил: 7,7 – A_1 , 9,5 – G_1 . Щелочной характер горизонта G_1 связан с особенностями реализации технологического процесса обезвоживания на ОСК г. Минска в период до конца 90-х гг. XX в., когда в качестве обезвоживающего агента использовали смесь извести и хлорида железа с массовым расходом до 30% от количества ОСВ, подаваемого на обезвоживание. Анализируя результаты ранних исследований кафедры промышленной экологии, можно сказать, что ОСВ, накопленные в аналогичный период на ИП ОСК г. Витебска и Мозыря, характеризовались меньшими величинами pH (в пределах 6,5–7,6) в связи с тем, что на данных ОСК не применялась технология известкового обезвоживания.

В случае создания фитомелиоративных систем с целью выращивания «энергетической» биомассы щелочной характер грунта исследуемой ИП может являться препятствием для интенсивного роста и развития древовидных кустарников, в т. ч. ивы.

Согласно литературным данным, оптимальная кислотность грунта для древовидных кустарников ивы составляет pH 5–6, хороший рост растений наблюдается также на нейтральных почвах [9]. Таким образом, естественное зарастание исследуемой ИП кустарниками ивы, вероятно, связано с воздействием почвопреобразующих процессов в стромосфере (горизонт A_1 , 0–40 см), долговременное протекание которых (практически 30 лет) привело к снижению уровня pH от щелочных до нейтральных значений, увеличению пористости, снижению насыпной плотности и влажности данного горизонта по сравнению с исходным горизонтом G_1 .

Для оценки интенсивности процессов роста и развития древовидных кустарников на субстрате из накопленных ОСВ рассчитывали величину ежегодного прироста местных видов ивы (*Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*,

Salix cinerea), для чего измеряли высоту стволов растений в безлистном состоянии, характерном для конца вегетационного периода (ноябрь) в период 2014–2017 гг. Количество биомассы ивы рассчитывали по формуле [10]:

$$M = \frac{1}{3} \pi h \rho (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2),$$

где M – масса стволовой биомассы древовидного кустарника, г с. в.; h – высота ствола древовидного кустарника, см; ρ – плотность древесины ивы в воздушно-сухом состоянии, г с. в./см³; R_1 – меньший радиус ствола древовидного кустарника, см; R_2 – больший радиус ствола древовидного кустарника, см.

На рис. 2 представлена информация о расчетном приросте ивы на грунте из накопленных ОСВ в период 2014–2017 гг. (площадь «энергетической» плантации – 1 га, плотность высадки саженцев – 15,3 тыс. шт), для сравнения показаны литературные данные о средней урожайности рассматриваемых видов ив, культивируемых без использования удобрений на сельскохозяйственных почвах и землях, загрязненных тяжелыми металлами, а также с внесением свежесформованных ОСВ в качестве удобрения [11–18].

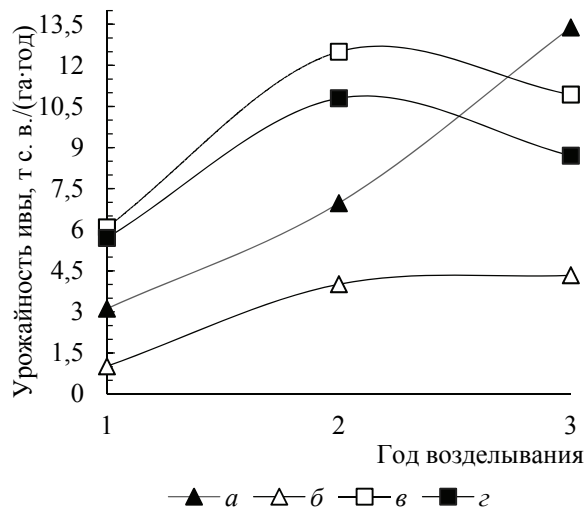


Рис. 2. Урожайность ивы на разных субстратах: а – сельскохозяйственные почвы без внесения удобрений; б – почвы, загрязненные тяжелыми металлами; в – сельскохозяйственные почвы с внесением ОСВ в качестве удобрений; г – накопленные ОСВ

Как видно из литературных данных, на сельскохозяйственных землях без внесения удобрений наибольший прирост кустарников ивы наблюдался на третьем году культивирования и составил 13,38 т с. в./га, что на 76,7 и 47,9% выше прироста культур на первом и вто-

ром годах культивирования [11–13]. Среди причин увеличения прироста ивы упоминаются ежегодная подрезка, оптимальный водный и температурный режим возделывания [13].

На почвах, загрязненных тяжелыми металлами, максимальный прирост ивы также наблюдался на третьем году возделывания и составил 4,34 т с. в./га [14], что на 67,6% менее аналогичного показателя для незагрязненных земель. Среди причин невысокого прироста растений ивы, кроме влияния тяжелых металлов, в работах [14–15] также упоминаются неблагоприятные климатические условия в период возделывания и отсутствие стимулирования роста биомассы путем подрезки саженцев.

По результатам экспериментальных исследований, наибольший прирост древовидных кустарников ивы наблюдали во втором году (2016 г.) – 10,80 т с. в./га, подрезку растений в период 2014–2017 гг. не осуществляли. Полученные результаты коррелируют с известными данными о выращивании кустарников ивы на почвах с внесением ОСВ в качестве удобрений [16–18], согласно которым наибольший прирост наблюдался на втором году культивирования и составил 12,52 т с. в./га, что на 13,7% выше экспериментальных результатов, полученных при наблюдениях за развитием растений на субстрате в виде накопленных ОСВ. Прирост кустарников ивы на третьем году экспериментальных наблю-

дений составил 8,71 т с. в./га, что на 35,7% выше прироста в первом году, но на 24,1% менее максимального прироста второго года.

Закключение. Показана возможность создания на основе неэксплуатируемых ИП фитомелиоративных систем короткого цикла ротации, обеспечивающих производство местного топливно-энергетического ресурса с расчетной величиной среднего ежегодного прироста биомассы ивы, эквивалентной 8,4 т с. в. /га при плотности посадки растений ивы 15,3 тыс. шт/га.

Установлено влияние древовидных кустарников ивы рода *Salix* на изменение физических и химических характеристик грунтов из накопленных ОСВ. Развитие растений ивы приводит к увеличению в стромосфере (0–40 см) доли крупнодисперсных частиц фракций 3–1 мм – на 0,64%, 1,0–0,5 мм – на 10,30%, а также росту пористости – на 52,8% и снижению насыпной плотности – на 28,0%, что в долгосрочном периоде способствует корректировке водного режима территорий переувлажненных ИП.

Щелочной характер грунта (рН 9,5), характерный для некоторых ИП ОСК г. Минска, выведенных из эксплуатации после 1990 г., не является препятствием для роста и развития древовидных кустарников ивы рода *Salix*, так как в стромосфере (0–40 см) наблюдается снижение величины рН грунта до нейтральных значений (7,7) в связи с воздействием почвопреобразующих процессов.

Литература

1. Соколовский И. В., Домасевич А. А., Юрения А. В. Практикум по почвоведению с основами земледелия: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2016. 184 с.
2. Developing new-generation machinery for vegetation management on protected wetlands in Poland / A. P. Dubowski [et al.]. Mires and Peat. 2014, vol. 13, no. 11. P. 1–13.
3. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО: ГОСТ 26483-85. Введ. 01.07.86. Минск: Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 1992. 8 с.
4. Удобрения органические. Методы определения органического вещества: ГОСТ 27980-88. Введ. 01.01.90. Минск: Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 1992. 12 с.
5. Удобрения органические. Методы определения общего азота: ГОСТ 26715-85. Введ. 17.12.92. Минск: Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 1992. 16 с.
6. Удобрения органические. Метод определения общего фосфора: ГОСТ 26717-85. Введ. 17.12.92. Минск: Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 1992. 8 с.
7. Удобрения органические. Метод определения общего калия: ГОСТ 26718-85. Введ. 17.12.92. Минск: Гос. ком. по стандартизации Респ. Беларусь, 1992. 8 с.
8. Удобрения из осадков сточных вод: ТУ 300003249.001-2009. Введ. 01.09.09. Минск: [б. и.], 2009. 8 с.
9. Анциферов Г. И. Ива. М.: Лесная пром., 1984. 101 с.
10. Lazdina D., Lazdinš A., Karinš Z., Kāposts V. Effect of sewage sludge fertilization in short-rotation willow plantations // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. 2007, vol. 15, no. 2. P. 105–111.
11. Laidlaw W. S., Arndt S. K., Huynh T. T., Gregory D., Baker A. J. M. Phytoextraction of heavy metals by willows growing in biosolids under field conditions // Journal of Environmental Quality. 2012, no. 1. P. 134–143.
12. Dimitriou I., Eriksson J., Adler A., Aronsson P., Verwijst T. Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood-ash mixtures to short-rotation willow coppice // Environmental Pollution. 2006, no. 142. P. 160–169.

13. Telenius B. F. Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden // *Biomass and Bioenergy*. 1999, no. 16. P. 13–23.
14. Dušek J., Květ J. Seasonal dynamics of dry weight, growth rate and root/shoot ratio in different aged seedlings of *Salix caprea* // *Biologia*. 2006, vol. 61, no. 4. P. 441–447.
15. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis* / M. Mleczek [et al.] // *Biomass and bioenergy*. 2010, no. 34. P. 1410–1418.
16. Phytoextraction of cadmium and zinc by *Salix* from soil historically amended with sewage sludge / A. P. Maxted [et al.] // *Plant Soil*. 2007, no. 290. P. 157–172.
17. Greger M., Landberg T. Use of Willow in Phytoextraction // *International Journal of Phytoremediation*. 2006, vol. 1, no. 2. P. 115–123.
18. Dredged sediment as a substrate for biomass production of willow trees established using the SALIMAT technique / P. Vervaeke [et al.] // *Biomass and Bioenergy*. 2001, no. 21. P. 81–90.

References

1. Sokolovskiy I. V., Domasevich A. A., Yurenja A. V. *Praktikum po pochvovedeniyu s osnovami zemledeliya* [Workshop on soil science with the foundations of agriculture]. Minsk, BGTU Publ., 2016, 184 p.
2. Dubowski A. P., Zembrowski K., Rakowicz A., Pawlowski T., Weymann S., Wojnilowicz L. Developing new-generation machinery for vegetation management on protected wetlands in Poland. *Mires and Peat*. 2014, vol. 13, no. 11, pp. 1–13.
3. GOST 26483-85. Soil. Preparation of the salt extract and pH determination by CINA method. Minsk, IPC Standards Publ., 1992. 8 p. (In Russian)
4. GOST 27980-88. Organic fertilizers. Methods of organic matter determination. Minsk, IPC Standards Publ., 1992. 12 p. (In Russian)
5. GOST 26715-85. Organic fertilizers. Methods of total nitrogen determination. Minsk, IPC Standards Publ., 1992. 16 p. (In Russian).
6. GOST 26717-85. Organic fertilizers. Method of total phosphorus determination. Minsk, IPC Standards Publ., 1992. 8 p. (In Russian).
7. GOST 26718-85. Organic fertilizers. Method of total potassium determination. Minsk, IPC Standards Publ., 1992. 8 p. (In Russian).
8. TC 300003249.001-2009. Fertilizers from sewage sludge. Minsk, Without Publ., 2009. 8 p. (In Russian).
9. Antsiferov G. I. *Iva* [Willow]. Moscow, Lesnaya prom. Publ., 1984. 101 p.
10. Lazdina D., Lazdinš A., Karinš Z., Kāposts V. Effect of sewage sludge fertilization in short-rotation willow plantations. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2007, vol. 15, no. 2, pp. 105–111.
11. Laidlaw W. S., Arndt S. K., Huynh T. T., Gregory D., Baker A. J. M. Phytoextraction of heavy metals by willows growing in biosolids under field conditions. *Journal of Environmental Quality*. 2012, no. 1, pp. 134–143.
12. Dimitriou I., Eriksson J., Adler A., Aronsson P., Verwijst T. Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood-ash mixtures to short-rotation willow coppice. *Environmental Pollution*. 2006, no. 142, pp. 160–169.
13. Telenius B. F. Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden. *Biomass and Bioenergy*. 1999, no. 16, pp. 13–23.
14. Dušek J., Květ J. Seasonal dynamics of dry weight, growth rate and root/shoot ratio in different aged seedlings of *Salix caprea*. *Biologia*. 2006, vol. 61, no. 4, pp. 441–447.
15. Mleczek M., Rutkowski P., Rissmann I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Strażyńska K., Stachowiak K. Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biomass and bioenergy*. 2010, no. 34, pp. 1410–1418.
16. Maxted A. P., Black C. R., West H. M., Crout N. M. J., Mcgrath S. P., Young S. D. Phytoextraction of cadmium and zinc by *Salix* from soil historically amended with sewage sludge. *Plant Soil*. 2007, no. 290, pp. 157–172.
17. Greger M., Landberg T. Use of Willow in Phytoextraction. *International Journal of Phytoremediation*. 2006, vol. 1, no. 2, pp. 115–123.
18. Vervaeke P., Luyssaerta S., Mertens J., De Vos B., Speleers L., Lust N. Dredged sediment as a substrate for biomass production of willow trees established using the SALIMAT technique. *Biomass and Bioenergy*. 2001, no. 21, pp. 81–90.

Информация об авторах

Шепелева Наталья Игоревна – инженер кафедры промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shnaig@belstu.by

Марцуль Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: martsul@belstu.by

Войтов Игорь Витальевич – доктор технических наук, доцент, ректор. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rector@belstu.by

Юреня Андрей Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесных культур и почвоведения. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: urenaya@belstu.by

Information about the authors

Shepeleva Natal'ya Igorevna – engineer, the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shnaig@belstu.by

Martsul' Vladimir Nicolaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: martsul@belstu.by

Voitau Ihar Vital'evich – DSc (Engineering), Associate Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rector@belstu.by

Yurenya Andrey Vladimirovich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Plantations and Soil Science. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: urenaya@belstu.by

Поступила 12.02.2018