

## РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НЕЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ИЛОВЫХ ПЛОЩАДОК С СОЗДАНИЕМ ФИТОМЕЛИОРАТИВНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ БИОМАССЫ ИВЫ РОДА SALIX

## RECLAMATION OF UNEXPLOITED SLUDGE LAGOONS WITH THE PHYTOMELIORATIVE SYSTEMS CREATION FOR THE SALIX WILLOW BIOMASS CULTIVATION

**Н.И. Шепелева\*, В.Н. Марцуль, И.В. Войтов**

*Белорусский государственный технологический университет*

УДК 502.171:546.212:622.692.55(476.5)

**N. Shepeleva\*, V. Martsul', I. Voitau**

*Belarusian State Technological University*

### РЕФЕРАТ

*ОСАДКИ СТОЧНЫХ ВОД, БИОЛОГИЧЕСКАЯ РЕКУЛЬТИВАЦИЯ, ФИТОМЕЛИОРАТИВНАЯ СИСТЕМА, ДРЕВОВИДНЫЕ КУСТАРНИКИ, ИВА, ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ БИОМАССА, SALIX*

Целью работы являлась разработка способа рекультивации иловых площадок после окончания периода эксплуатации. До настоящего времени установить пригодность неэксплуатируемых иловых площадок для культивирования «энергетической» биомассы не представлялось возможным, поскольку не исследованы процессы роста и развития древесно-кустарниковых пород на данном субстрате, не рассмотрена возможность рекультивации иловых площадок существующими видами сельскохозяйственной техники. Экспериментальные исследования проводили на базе иловых площадок КУП «Минскводоканал», закрытых в 1990 г. Исследовали доминирующие виды древесных кустарников *Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*, *Salix cinerea* в составе естественного фитоценоза, наличие которых считали первоочередным показателем пригодности осадков сточных вод как питательного субстрата для культивирования «энергетической» биомассы ивы. Установлена зависимость коэффициентов биологического накопления кадмия, меди, никеля, свинца, цинка и хрома стволовой биомассой кустарников ивы рода *Salix* от валового содержания в накопленном осадке сточных вод, и показано, что процесс аккумуляции тяжелых металлов

### ABSTRACT

*SEWAGE SLUDGE, BIOLOGIC RECLAMATION, PHYTO-MELIORATIVE SYSTEM, WILLOW SHRUBBERY, ENERGETIC BIOMASS, SALIX*

Peculiarities of sewage sludge using as a substrate for "energetic" *Salix* willow cultivation are investigated. The possibility of phyto-meliorative short-crop-rotation system development on the basis of unexploited sludge lagoon is reported. Estimated value of average annual yield of "energetic" willow biomass at planting density of 15.3 thousand pieces per hectare is 8.4 t/ha. It is established that the coefficients of cadmium, copper, nickel, lead, zinc and chromium biological accumulation by stem biomass of *Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*, *Salix cinerea* cultivated on sewage sludge are in accordance with general phytoaccumulation functions of these crops growing on agricultural and heavy-metal-contaminated lands.

A method for reclamation of unexploited sludge lagoons has been developed. The method includes *Salix* willow cultivation on unexploited sludge lagoons with artificial substrate in the form of stabilized sewage sludge using 25 cm willow cuttings (1 cm in diameter), that are planted at total density of 15.3 thousand pieces per ha in two-row tapes (row spacing 0.7 m, distance between bands 1.0 m) with sequential biomass harvesting every three years with subsequent replace of planting material after seven harvesting cycles.

\* E-mail: [shnaig@belstu.by](mailto:shnaig@belstu.by) (N. Shepeleva)

на данном виде субстрата подчиняется общим закономерностям фитонакопления, характерным для данных культур.

## ВВЕДЕНИЕ

Основным способом обработки осадков сточных вод (ОСВ) в Республике Беларусь является их размещение на картах иловых площадок для обезвоживания и подсушки в естественных условиях окружающей среды. Длительный период отсутствия в стране нормативной базы, регламентирующей требования к качеству ОСВ в зависимости от предполагаемого направления использования, привел к тому, что дальнейшее вовлечение данных отходов в хозяйственно-экономический оборот затруднено. Таким образом, иловые площадки 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 с ОСВ законодательно приравнивается к захоронению отходов.

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

Разработке технологического способа использования накопленных ОСВ предшествовало рекогносцировочное обследование неэксплуатируемых иловых площадок КУП «Минскводоканал», в ходе которого установили факт естественного зарастания данных территорий с формированием древесно-кустарникового фитоценоза с преобладающим наличием древесных кустарников ивы: *Salix aurita* (ива ушастая), *Salix caprea* (ива козья), *Salix fragilis* (ива ломкая), *Salix cinerea* (ива серая). Реже встреча-

ли 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 напочвенного покрова естественного фитоценоза 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.

С учетом описанных факторов накопленные ОСВ, по нашему мнению, более перспективно рассматривать в качестве субстрата для создания фитомелиоративных систем короткого цикла ротации на основе неэксплуатируемых иловых площадок с выращиванием биомассы древесных кустарников ивы. Данное направление использования не требует извлечения накопленных ОСВ с иловых карт и является многообещающим в плане создания объекта для производства местных топливно-энергетических ресурсов.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования процессов развития древесных кустарников ивы на субстрате из накопленных ОСВ в период 2014–2017 гг. осуществляли наблюдения за растениями *Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis* и *Salix cinerea* в составе естественного фитоценоза иловых площадок КУП «Минскводоканал», выведенных из эксплуатации в 1990 г. В ходе исследования грунта неэксплуатируемых иловых площадок методом прикопок установили, что 97 % массы корневой системы древесных кустарников располагается в горизонте глубиной 0–40 см, который рассматривали как стромосферу исследуемого фитоценоза. Для расчета коэффициентов биологического накопления из слоя стромосферы на

глубине 15, 25 и 35 см в местах произрастания древовидных кустарников ивы методом конверта отбирали пробы ОСВ массой до 2,0 кг, состав которых усредняли и использовали для определения содержания валовых форм тяжелых металлов. Пробы стволовой биомассы кустарников ивы анализировали на содержание тяжелых металлов методом атомно-адсорбционной спектрометрии [1] с предварительной подготовкой проб по способу сухой минерализации [2]. Расчет коэффициентов биологического накопления  $KBH_{me}$  проводили по формуле 1 [3]

$$KBH_{me} = \frac{C_{salix}^{me}}{C_{осв}^{me}}, \quad (1)$$

где  $C_{salix}^{me}$  – содержание тяжелого металла в биомассе ивы, мг/г с. в.;  $C_{осв}^{me}$  – содержание валовой формы тяжелого металла в осадке сточных вод, мг/г с. в.

Усредненные результаты исследования процессов фитонакопления тяжелых металлов древовидными кустарниками ивы рода *Salix* представлены в таблице 1.

Из данных графы 4 таблицы 1 видно, что наибольшая величина  $KBH_{me}$  (0,68) характерна для кадмия, уровень содержания которого в накопленном ОСВ, по сравнению с остальными тяжелыми металлами, минимален. Поскольку диапазоны содержания тяжелых металлов в накопленном ОСВ значительно отличаются (от 2,19 мг для кадмия до 2820,69 мг для цинка), сделать однозначный вывод об их избирательном накоплении биомассой ивы на данном виде субстрата не представляется возможным.

В ходе анализа экспериментальных данных установили наличие корреляционной связи между валовым содержанием тяжелого металла в накопленном ОСВ и соответствующей величиной  $KBH_{me}$  путем расчета коэффициента корреляции Пирсона. Как видно из графы 5 таблицы 1, полученные значения коэффициента Пирсона находятся в интервале 0,95–0,99, что свидетельствует о наличии близкой к функциональной взаимосвязи данных параметров.

Для определения вида функциональной зависимости строили графики распределения экспериментальных результатов, на которые наносили также и литературные данные о фитонакоплении тяжелых металлов биомассой ивы рода *Salix*, произрастающей на иных видах субстратов, в числе которых рассматривали техногенно-загрязненные почвы [4–6], сельскохозяйственные почвы без внесения удобрений [7–9] и с использованием ОСВ в качестве органических удобрений [10–12].

Установлено, что зависимость коэффициентов биологического накопления от валового содержания тяжелых металлов в накопленном ОСВ, описывается степенной функцией, представленной в формуле 2

$$KBH_{me} = A_i \cdot (C_{осв}^{me})^{-B_i}, \quad (2)$$

где  $A_i$  – эмпирический коэффициент для  $i$ -того тяжелого металла;  $B_i$  – эмпирический показатель степени для  $i$ -того тяжелого металла.

Графики зависимостей коэффициентов биологического накопления меди, цинка, кадмия,

Таблица 1 – Накопление тяжелых металлов древовидными кустарниками ивы

Тяжелый металл	Концентрация, мг/кг с. в.		$KBH_{me}$	Коэффициент корреляции Пирсона
	осадок сточных вод	биомасса ивы		
кадмий (Cd)	2,19	1,45	0,68	0,98
медь (Cu)	1530,10	39,66	$2,56 \cdot 10^{-2}$	0,99
никель (Ni)	223,73	1,64	$7,38 \cdot 10^{-3}$	0,97
свинец (Pb)	124,17	3,02	$2,46 \cdot 10^{-2}$	0,95
цинк (Zn)	2820,69	204,33	$7,26 \cdot 10^{-2}$	0,99
хром (Cr)	725,04	0,68	$9,32 \cdot 10^{-4}$	0,95

никеля, хрома и свинца стволовой биомассой ивы рода *Salix* представлены на рисунке 1.

Как видно из рисунка 1, процесс аккумуляции тяжелых металлов стволовой биомассой древовидных кустарников ивы рода *Salix* на субстрате из накопленных ОСВ не отличается от общих закономерностей фитонакопления данных культур, произрастающих на сельскохозяйственных и техногенно-загрязненных землях.

Величину ежегодного прироста ивы определяли путем замера высоты древовидных кустарников в безлистном состоянии в конце каждого из трех вегетационных периодов (2014–2017 гг.), после чего рассчитывали урожайность для плотности посадки растений в 15,3 тыс. шт/га. На втором году наблюдений (2015–2016 гг.) установили наибольшую урожайность – 10,80 т с. в/га, что на 13,7 % меньше литературных данных о приросте ивы на почвах с внесением ОСВ в качестве органических удобрений [10–12]. Урожайность ивы на третьем году наблюдений составила 8,71 т с. в/га, что на 35,7 % больше аналогичного показателя первого года и на 24,1 % менее значения, наблюдавшегося на втором году исследований. Средняя величина урожайности древовидных кустарников ивы по результатам экспериментальных наблюдений составила 8,4 т с. в/га·год. Сравнивая экспериментальные результаты исследования фитоэкстракции и урожайности диких видов ивы на субстрате из ОСВ с известными данными по выращиванию культурных сортов ивы на сельскохозяйственных землях [7–9], можно сказать, что растения диких видов (*Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*, *Salix cinerea*) достаточно неприхотливы к почвенным условиям, однако, по величине урожайности и скорости фитонакопления уступают культурным сортам.

Использование древовидных культур ивы рода *Salix* для проведения биологической рекультивации позволяет формировать фитомелиоративные системы короткого цикла ротации, в которых интервал от интенсивного роста до сбора биомассы составляет 3–4 года с количеством сборов не менее 6–7 [13], и создавать на их основе источники местных топливно-энергетических ресурсов. Короткий период ротации биомассы позволяет более интенсивно управлять системой с целью корректировки водного

режима переувлажненных иловых площадок, обеспечить улучшение агрохимических характеристик плодородного слоя за счет способности растений ивы к аккумуляции тяжелых металлов. Необходимо отметить, что рекультивация неэксплуатируемых иловых площадок не требует проведения технического этапа, поскольку данный объект уже оснащен подъездными путями, водонепроницаемым слоем, обвалован и содержит плодородный слой в виде стабилизированного ОСВ.

При создании фитомелиоративной системы важно обеспечить эффективное подавление сорной растительности, поскольку растения ивы не способны конкурировать с ней вплоть до смыкания крон кустарников в культивационных рядах, что происходит примерно через два года после укоренения черенков. В ряде исследований, связанных с созданием систем короткого цикла ротации, данный фактор упоминается в качестве основной проблемы обеспечения выживаемости и высокой продуктивности посадок ивы [3, 6, 8].

Подготовку участка начинают летом путем скашивания травяной растительности, желательнее в середине-конце июля. Не позднее 10–14 дней после скашивания проводят обработку гербицидами, производными глифосата, с нормами расхода 3–4 дм<sup>3</sup>/га – против пырея ползучего, 5–6 дм<sup>3</sup>/га – против полыни и осотов. Гербициды на основе глифосата воздействуют на всю корневую систему, поэтому полная гибель травянистой растительности, сопровождающаяся пожелтением и засыханием, наблюдается в течение 14–21 дня с начала обработки. Вспахивание участка на глубину 15–20 см проводят после предварительного отмирания и разрушения корневищ травяной растительности, что происходит не ранее двух недель после внесения гербицида. После окончания механизированных работ по вспахиванию (середина – конец сентября) подготовку плантации на осенний период считают оконченной.

Черенки для закладки плантации заготавливают в ранневесенний период после прекращения сильных морозов, до начала распускания почек. Для заготовки черенков срезают одно- и двухлетние побеги растений *Salix aurita*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*, *Salix cinerea*, произраста-

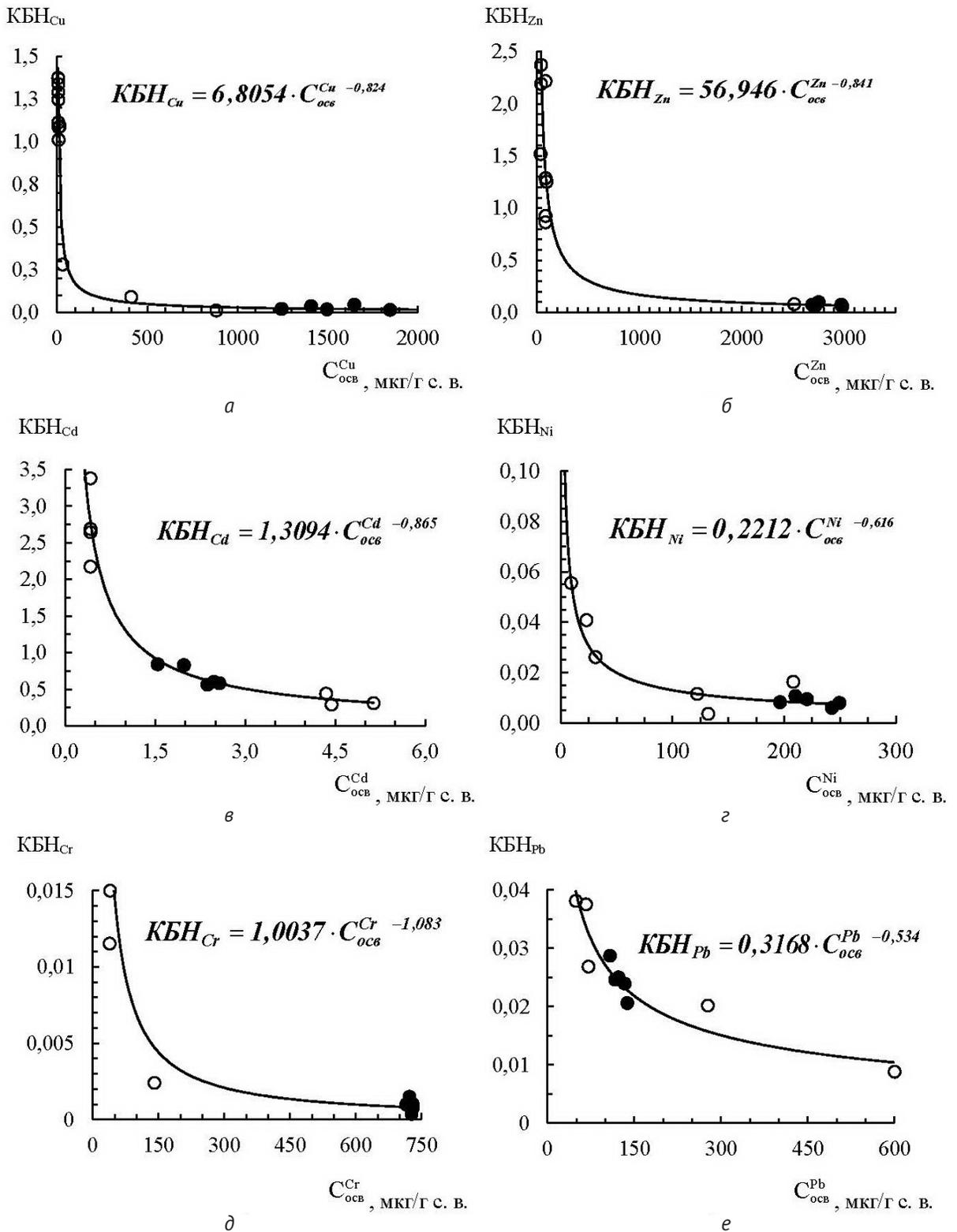


Рисунок 1 – Графики зависимостей коэффициентов биологического накопления меди (а), цинка (б), кадмия (в), никеля (г), хрома (д) и свинца (е) от валового содержания в ОСВ

ющих на иловых картах. Использование местных видов ивы для закладки фитомелиоративных систем предпочтительно, так как растения адаптированы к влагообеспеченности иловых площадок и субстрату из накопленных ОСВ.

Заготовленный посадочный материал до нарезки на черенки хранят при температуре от 0–4 °С для предотвращения распускания почек. Для улучшения укоренения черенков перед посадкой их на сутки замачивают в воде с добавлением стимуляторов роста. Посадку осуществляют ранней весной, сразу после оттаивания и рыхления субстрата чизелем на глубину 5–10 см для улучшения аэрации стромосферы и уничтожения остатков сорной растительности. Оптимальным для проведения посадочных работ является период с середины апреля до конца мая, поскольку влагообеспеченность субстрата в этот период способствует быстрому укоренению и росту черенков ивы. При разбивке участка под посадки необходимо создать технологические разрывы длиной не менее 6 м на каждые 100 м посадочного ряда, что в последующем обеспечит оптимальные условия для работы комбайнов на период уборки биомассы [13]. При ручной посадке черенков для разметки рядков используют меч лесоведа. Механизированную посадку осуществляют с использованием посадочных машин, являющихся прицепными агрегатами, которые позволяют за один проход проводить посадку до четырех рядков ивы по схеме 2×75 см [3].

Подрезку саженцев первого года культивирования проводят в начале марта на этапе набухания почек с использованием серповидной косилки, обеспечивающей получение четких срезов, побеги срезают на длину 2,5–5 см. Скорость прохождения косилки подбирают опытным путем с учетом обеспечения четкого среза и предотвращения вырывания саженцев. Срезанные побеги оставляют на участке либо используют для замены неприжившихся черенков в посадочных рядках. Подрезка способствует ветвлению саженцев, что ускоряет смыкание крон кустарников. При оптимальных климатических условиях смыкание крон кустарников ивы в рядках наблюдается не позднее середины – конца июля второго года культивирования, после чего саженцы могут конкурировать с

сорной растительностью и необходимость в гербицидной обработке отсутствует. К концу второго вегетационного периода высота кустарников составляет в среднем 1,4–1,6 м. Через четыре года с момента закладки плантации кустарники ивы достигают состояния пригодного для сбора урожая биомассы. В случае замедления развития ивы из-за неблагоприятных климатических условий в зимний период, сбор урожая откладывают на год или два. Сбор урожая осуществляют в зимний период после промерзания субстрата для предотвращения вырывания саженцев ивы уборочной техникой.

С одной посадки древовидных культур ивы рода *Salix* возможно получить не менее шести урожаев с интервалом от начала интенсивного роста до сбора биомассы не менее трех лет [13]. Краткий период от начала культивирования до сбора урожая способствует более интенсивному управлению фитомелиоративной системой с целью корректировки агрофизических показателей грунта переувлажненных иловых площадок, а также обеспечивает улучшение агрохимических характеристик накопленных ОСВ. Согласно литературным данным после шести циклов сбора урожая скорость прироста биомассы ивы снижается, что требует замены посадочного материала.

После шестого зимнего сбора урожая биомассы ивы по мере оттаивания грунта (начало – середина апреля) начинают работы по раскорчевке посадок ивы до наступления периода интенсивной вегетации кустарников. Раскорчевку проводят вдоль посадочных рядков с использованием почвообрабатывающей фрезы ФР-00700-Б или иных фрез с аналогичными характеристиками. Фреза ФР-00700-Б агрегируется с мини-тракторами «Беларус» МТЗ-132Н, МТЗ-152, МТЗ-082 и обеспечивает скорость обработки на легких почвах до 3 км/ч. Не позднее пяти дней после окончания фрезерования проводят гербицидную обработку участка препаратом симазина при норме расхода 5–6 дм<sup>3</sup>/га. Через 21 день после внесения гербицида (начало – середина мая) проводят обработку участка чизельно-дисковым культиватором КЧД-6 или аналогичным на глубину 6–12 см с засевом подготовленного субстрата рапсом, клевером или иными покровными культурами. На данном

этапе мероприятия по раскорчевке посадок ивы считают оконченными. Новую предпосадочную подготовку участка начинают после окончания зимнего периода (с середины апреля до конца мая) по описанной схеме.

#### ВЫВОДЫ

Установлена пригодность накопленных ОСВ в качестве субстрата для выращивания древесных 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.

Зависимость коэффициентов биологического накопления тяжелых металлов (кадмия, меди, никеля, свинца, цинка и хрома) стволовой биомассой кустарников ивы рода *Salix* от валового содержания в накопленном ОСВ описывается

степенной функцией, а процесс фитонакопления на данном виде субстрата подчиняется общим закономерностям, характерным для данных культур, произрастающих на сельскохозяйственных и техногенно-загрязненных землях.

Разработан способ рекультивации неэксплуатируемых иловых площадок, который включает выращивание древесных кустарников ивы рода *Salix* прямым посевом в искусственный субстрат в виде обезвоженных стабилизированных ОСВ с использованием в качестве посадочного материала черенков диаметром не менее 1 см, длиной до 25 см, высаживаемых при общей густоте 15,3 тыс. штук/га в виде двухрядной ленты с междурядьем 0,7 м, расстоянием между лентами 1 м, на неэксплуатируемых иловых площадках с последовательным сбором биомассы ивы один раз в три года в течение семи циклов, после чего производят раскорчевку фитомелиоративной системы для замены посадочного материала.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ Р 55447-2013. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение содержания кадмия, свинца, мышьяка, ртути, хрома, олова методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Введ. 27.06.2013, Москва, Межгоссовет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2014, 18 с.
- ГОСТ 26929-94. Сырье и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. Введ. 21.02.1995, Москва, Межгоссовет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1996, 9 с.
- Родькин, О. И. Производство возобновляемого биотоплива в аграрных ландшафтах: экологические и технологические аспекты, Минск, Международный государственный экологический университет, 2011, 210 с.
- M. Mleczek [et al.] (2010), Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*, *Biomass and bioenergy*, 2010, № 34,

#### REFERENCES

- GOST R 55447-2013. Forage, mixed fodder, feed forage. Determination of the content of cadmium, lead, arsenic, mercury, chromium, tin by the method of atomic-absorption spectroscopy. Ent. 27.06.2013, Moscow, ICSMC Standards Publ., 18 p.
- GOST 26929-94. Raw materials and food products. Preparation of samples. Mineralization for the determination of the content of toxic elements. Ent. 21.02.1995, Moscow, ICSMC Standards Publ., 9 p.
- Rod'kin, O. I. (2011), *Proizvodstvo vozobnovlyаемого biotopliva v agrarnykh landshaftakh* [Production of renewable biofuel in agrarian landscapes: ecological and technological aspects], Minsk, ISEU Publ., 210 p.
- M. Mleczek [et al.] (2010), Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*, *Biomass and bioenergy*, 2010, № 34, P. 1410–1418.
- Laidlaw, W. S., Arndt, S. K., Huynh, T. T., Gregory, D., Baker, A. J. M. (2012), Phytoextraction of heavy metals

- P. 1410–1418.
5. Laidlaw, W. S., Arndt, S. K., Huynh, T. T., Gregory, D., Baker A. J. M. (2012), Phytoextraction of heavy metals by willows growing in biosolids under field conditions, *Journal of Environmental Quality*, 2012, № 1, P. 134–143.
  6. P. Vervaeke [et al.] (2001), Dredged sediment as a substrate for biomass production of willow trees established using the SALIMAT technique, *Biomass and Bioenergy*, 2001, № 21, P. 81–90.
  7. Telenius, B. F. (1999), Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden, *Biomass and Bioenergy*, 1999, № 16, P. 13–23.
  8. Dušek, J., Květ, J. (2006), Seasonal dynamics of dry weight, growth rate and root/shoot ratio in different aged seedlings of *Salix caprea*, *Biologia*, 2006, vol. 61, № 4, P. 441–447.
  9. Greger, M., Landberg, T. (2006), Use of Willow in Phytoextraction, *International Journal of Phytoremediation*, 2006, vol. 1, № 2, P. 115–123.
  10. Lazdina, D., Lazdinš, A., Karinš, Z., Kāposts, V. (2007) Effect of sewage sludge fertilization in short-rotation willow plantations, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2007, vol. 15, № 2, P. 105–111.
  11. Dimitriou, I., Eriksson, J., Adler, A., Aronsson, P., Verwijst, T. (2006), Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood-ash mixtures to short-rotation willow coppice, *Environmental Pollution*, 2006, № 142, P. 160–169.
  12. A. P. Maxted [et al.] (2007), Phytoextraction of cadmium and zinc by *Salix* from soil historically amended with sewage sludge, *Plant Soil*, 2007, № 290, P. 157–172.
  13. P. Lawrence [et al.] (2002), *Willow biomass producer's handbook*, Syracuse, State University of New York, 2002, 31 p.
- by willows growing in biosolids under field conditions, *Journal of Environmental Quality*, 2012, № 1, P. 134–143.
6. P. Vervaeke [et al.] (2001), Dredged sediment as a substrate for biomass production of willow trees established using the SALIMAT technique, *Biomass and Bioenergy*, 2001, № 21, P. 81–90.
  7. Telenius, B. F. (1999), Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden, *Biomass and Bioenergy*, 1999, № 16, P. 13–23.
  8. Dušek, J., Květ, J. (2006), Seasonal dynamics of dry weight, growth rate and root/shoot ratio in different aged seedlings of *Salix caprea*, *Biologia*, 2006, vol. 61, № 4, P. 441–447.
  9. Greger, M., Landberg, T. (2006), Use of Willow in Phytoextraction, *International Journal of Phytoremediation*, 2006, vol. 1, № 2, P. 115–123.
  10. Lazdina, D., Lazdinš, A., Karinš, Z., Kāposts, V. (2007), Effect of sewage sludge fertilization in short-rotation willow plantations, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2007, vol. 15, № 2, P. 105–111.
  11. Dimitriou, I., Eriksson, J., Adler, A., Aronsson, P., Verwijst, T. (2006), Fate of heavy metals after application of sewage sludge and wood-ash mixtures to short-rotation willow coppice, *Environmental Pollution*, 2006, № 142, P. 160–169.
  12. A. P. Maxted [et al.] (2007), Phytoextraction of cadmium and zinc by *Salix* from soil historically amended with sewage sludge, *Plant Soil*, 2007, № 290, P. 157–172.
  13. P. Lawrence [et al.] (2002), *Willow biomass producer's handbook*, Syracuse, State University of New York, 2002, 31 p.

Статья поступила в редакцию 10. 04. 2018 г.