

---

# ІННОВАЦІЙНІ АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОБЕЗПЕКИ

---

УДК 504:581.1662.6

## ВИКОРИСТАННЯ *SALIX VIMINALIS* L. ДЛЯ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Пацула О.І., Фецюх А.Б., Буньо Л.В.

Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Грушевського, 4, Львів 79005, Україна  
ostap.patsula@lnu.edu.ua

Охарактеризовано кілька методів видалення поллютантів з оточуючого середовища, висвітлено питання фітореємедіації забруднених важкими металами ґрунтів за допомогою рослин-гіперакумуляторів, серед яких є *S. viminalis* L. Детально описано акумуляцію рослинами іонів кадмію та міді. У статті на прикладі Швеції наводиться метод реємедіації стічних вод за допомогою верби. Висвітлено суть використання біомаси рослин верби як енергетичної сировини та екологічно чистого джерела енергії у нашій державі. *Ключові слова:* *Salix viminalis* L., важкі метали, фітореємедіація, кадмій, мідь.

**Использование *Salix viminalis* L. для фитореємедіації почв, загрязнєнных тяжєлыми металлами.** Пацула О.И., Фецюх А.Б., Буньо Л.В. Охарактеризованы несколько методов удаления поллютантов, из окружающей среды, раскрыты вопросы фитореємедіації загрязнєнных тяжєлыми металлами почв с помощью растений-гиперакумуляторов, среди которых *S. viminalis* L. Подробно описана аккумуляция растениями ионов кадмия и меди. В статье на примере Швеции приводится метод реємедіації сточных вод с помощью растений ивы. Освещены суть использования биомассы растений ивы в качестве энергетического сырья и как экологически чистого источника энергии в нашем государстве. *Ключевые слова:* *Salix viminalis* L., тяжєлые металлы, фитореємедіація, кадмий, медь.

**The application of *Salix viminalis* L. for soil phytoreємедіаtion, polluted by heavy metals.** Patsula O., Fetsiukh A., Bunio L. Several methods of removing pollutants from the environment have been described, issues of phytoreємедіаtion of soils contaminated with heavy metals have been highlighted with hyperaccumulator plants, among which are *S. viminalis* L. Detailed described the accumulation of cadmium and copper ions in plants. The article gives the example of a method of water reємедіаtion with the application of willow plants in Sweden. The essence of the use of willow plants biomass as energy raw material and as an environmentally friendly source of energy in our country is highlighted. *Key words:* *Salix viminalis* L., heavy metals, phytoreємедіаtion, cadmium, copper.

**Постановка проблеми.** Стан енергетики України та сировинної бази для неї вимагає радикальних кроків в енергетичному секторі, особливо у напрямі зміни сировинної бази з використанням нових, поновлювальних джерел енергії, які є безпечними для довкілля. Одними з таких поновлювальних джерел є енергетичні рослини, які мають ряд переваг над викопним паливом, основними з яких є створення позитивного балансу карбону в біосфері.

Традиційно як енергетична сировина використовуються деревні рослини та відходи сільського господарства. У світі нині близько 11% потреб енергетики забезпечується рослинною сировиною. Щорічно використовується близько 2 млрд м<sup>3</sup> деревини для опалення житлових чи промислових приміщєнь [1]. Таким чином, логічно постало питання про штучне вирощування рослин для цих потреб.

Ідеальні енергетичні рослини повинні мати максимально ефективний механізм перетворення сонячної енергії у біомасу та мінімальний вплив на оточуюче середовище. Також вони повинні мати позитивний енергетичний баланс – їх енергетич-

ний вихід має бути більшим за енергетичні витрати на їх вирощування та використання добрив. Нині є кілька видів рослин, що відповідають цим вимогам та широко застосовуються у багатьох країнах світу. Серед них є деревні рослини (верба прутовидна (*Salix viminalis* L.) та тополя чорна (*Populus nigra* L.) і багаторічні трави (просо деревовидне (*Panicum virgatum* L.), фаларіс тростиновидний (*Phalaris arundinacea* L.), тростина гігантська (*Arundo donax* L.) і міскантус (*Miscantus × giganteus* Greef et Deu.) [2]. Всі ці рослини висаджуються один лише раз та протягом 10–20 років використовуються для виготовлення паливних елементів.

Метою статті є аналіз публікацій, присвячених опису *S. viminalis* L. як рослин-гіперакумуляторів важких металів та біопалива, методам її культивування у європейських країнах, а також огляд досліджень про накопичення та вплив важких металів на рослини *S. Viminalis* L.

### 1. Характеристика рослин *Salix viminalis* L.

Найбільш перспективним видом енергетичних рослин є *Salix viminalis* L. За сучасними оцінками,

цей вид дерева найбільш швидко росте у довжину (приріст за один день може досягати 3–5 см) і в фазі після першого вегетаційного року рослини). Загальний приріст після першого року становить близько 8–10 т на 1 га/рік, а після 3–4 років – ці показники можуть досягти 30–40 т та довжини до 8 м. Здерев'янілі пагони верби наприкінці сезону зрізаються та використовуються для виготовлення паливних елементів [3].

Верба (Рід *Salix*) – це близько 400 видів, що поширені майже по всій планеті, оскільки вони є невимогливими рослинами до якості ґрунту та інших кліматичних умов. Сорт верби (*Salix viminalis* L.) селекціонери вивели для використання в таких сферах:

- енергетична (високий вміст саліцилового спирту) – використання як палива у приватних будинках, котельнях (шкіл, дитячих садків), електростанціях;
- осушування ґрунтів, збагачених підземними водами;
- використання для очистки стічних вод малих населених пунктів або тваринницьких ферм;
- рекультивация земель при шахтах та покращення ґрунту;
- паперова промисловість;
- меблева промисловість;
- будівельна промисловість (при будівництві тимчасових доріг, захист схилів, берегів річок);
- плетені вироби – кошики, скульптури, арки, огорожі, садові бесідки;
- вирішення проблеми з недостатньою кількістю зелених насаджень;
- використання як медоносною рослини [3].

Саме *S. viminalis* L. використовується як біопаливо та, незважаючи на цілий ряд переваг, нині нешироко застосовується у світі [4]. Зокрема, у Польщі території, які відведені під вирощування енергетичної верби, становлять лише 6000 га, а частка верби у загальній масі опалювального палива у 2008 р. становила тільки 2% [5]. Донині ситуація не змінилась, незважаючи на енергетичні та економічні характеристики цього палива (табл. 1).

Таблиця 1

**Тепло, що виділяється під час згоряння деяких видів палива [5]**

Паливо	Тепло згоряння (ГДж/ 1000 кг)
Природний газ	45
Мазут	40
Кам'яне вугілля	27
Кокс	25
Сухі дрова ( <i>S. viminalis</i> L.)	19
Солома	15

Таким чином, 1000 кг висушеної *S. viminalis* L. дає таку саму кількість енергії, як 700 кг кам'яного вугілля хорошої якості.

При спалюванні біомаси не утворюється більше вуглекислого газу, ніж було поглинуто рослиною за життя, оскільки рослини в процесі фотосинтезу засвоюють цей газ. Тобто використання біомаси для виробництва енергії не збільшує концентрацію вуглекислого газу в атмосфері [3].

У Швеції використання *S. viminalis* L. для потреб енергетики почалось після нафтової кризи у 1970 р., оскільки необхідно було частково замінити викопні палива новими джерелами енергії. Нині *S. viminalis* L. вирощується на 16 000 га [6].

Наступними країнами, які почали наслідувати приклад Швеції, стали Великобританія, Ірландія, Данія, Польща, США та інші. В 2011 р. з'явилися перші промислові посадки і в Україні [3].

За даними Європейської асоціації АЕВІОМ, у Великобританії висаджено близько 4 000 га плантацій енергетичної верби. В цій країні тріску енергетичної верби використовують переважно як біопаливо на ТЕЦ.

У Великобританії та Швеції активно розгортаються програми з вирощування енергетичної верби – досліджуються її різні клони, для пошуку рослин із максимально швидким наростання біомаси та високою толерантністю до дії важких металів. Проводяться дослідження з використання верби для очищення сільськогосподарських угідь, що мають завищений кадмієвий фон, у результаті інтенсивного використання фосфорних добрив. Попередні результати показують можливість очищення таких ґрунтів вже за кілька років. Подібних результатів для інших елементів, наприклад свинцю чи цинку, поки що немає, повне їх видалення цими методами потребує кілька сотень років. Не варто відразу відмовлятися від їх фітореMediaції за допомогою верби, оскільки невідомо, що є мірою забрудненості ґрунту важкими металами. А також проводиться вимірювання загальної концентрації поллютанта у ґрунті, проте не звертається увага на його біодоступність для рослин, тому що не всі фракції металів поглинаються. Існують дані, що біодоступність важких металів суттєво знижується при зростанні верби [3].

## 2. Культивування рослин верби.

Культивування верби повністю механізовано, починаючи від посадки до збирання. Важливе значення при вирощуванні енергетичних плантацій має вибір виду (сорт) верби для культивування у тих чи інших ґрунтово-кліматичних умовах [7]. При обранні регіону необхідно враховувати два фактори – середньорічна кількість опадів та вологість ґрунтів. Цей вид рослин здатен рости на несприятливих ґрунтах, приміром, як рекультивативна культура на рекультивованих землях відкритих шахт. Звичайно, в таких умовах вони не зростатимуть настільки швидко, як при «нормальних» умовах, але розвинута коренева

система рослини уможливило ріст і на несприятливому ґрунті. На таких територіях верба сприятиме утворенню в ґрунті гумусу. Оптимальним для росту рослини є легко-кислі ґрунти з 5,5–6,5 рН, але може проростати і на ґрунтах із рівнем рН від 3,5 до 10. Сприятливим також для проростання є збагачений водою ґрунт [3].

Саджанці (живці) верби мають бути тільки однолітні та мати такі розміри: діаметр від 8,0 до 30,0 мм а довжину, як правило, – від 180 до 200 мм. Під час посадки бруньки мають бути у сплячому стані, та вже через 10–15 днів будуть видимі результати зростання.

На початковому етапі посадки верби у Швеції висаджується приблизно 15 тис. живців на 1 га у подвійні ряди для покращення подальшого підживлення та збирання. Збирання проводиться взимку кожних 3–5 роки спеціальними машинами. Надземна біомаса зрізується та висушується для подальшого спалювання. Після зрізування рослини зберігають життєздатність та можуть повторно використовуватись протягом 20–25 років. Нині у Швеції продуктивність *S. viminalis* L. становить 6–12 т/га за рік [6].

### 3. ФітореMediaція ґрунтів рослинами *S. viminalis* L.

Перспективним напрямом застосування енергетичних рослин є фітореMediaція – використання рослин для очищення ґрунту та води від токсичних поллютантів [8–10]. ФітореMediaція надає багато переваг, що робить її ефективною технологією, основною перевагою якої, звичайно, є низька вартість. ФітореMediaція на 50–80% менш затратна, ніж інші технології очистки середовища [8].

Виділяють кілька методів видалення поллютантів, зокрема важких металів, з оточуючого середовища [11]:

1. фітоекстракція – використання метал-акуюлюючих рослин для нагромадження важких металів із ґрунту та подальше видалення надземних та підземних частин рослин із середовища;

2. ризофільтрація – поглинання, нагромадження та детоксикація важких металів кореневими системами рослин із рідкого середовища;

3. фітостабілізація – використання рослин, для зниження мобільності важких металів у ґрунті;

4. біореMediaція – кореневі системи рослин в асоціації з мікроорганізмами розкладають токсичні органічні сполуки.

Інтерес для фітореMediaції, перш за все, становлять рослини-гіперакумулятори, що можуть нагромаджувати метали у кількостях 100 разів більших, ніж інші рослини [10]. Такі рослини зазвичай мають потребу у високих концентраціях певних елементів та нагромаджують їх великі кількості у надземній частині. Вважають, що таким чином ці рослини пристосувались до захисту від патогенів. Хоча більшість цих рослин є ендемічними, вони пристосовані рости у місцях із високим природ-

ним фоном деяких елементів. Це такі «класичні» гіперакумулятори, як *Thlaspi caerulescens* L., що нагромаджує 3% Zn, 0,5% Pb і 0,1% Cd, та *Alyssum bertolonii* L., що нагромаджує більше 1% Ni у надземних органах [12].

Хоча ці рослини нагромаджують великі концентрації важких металів, використання їх для фітореMediaції є утрудненим, оскільки ці рослини невеликого розміру та повільно ростуть. Ідеальною рослиною для очищення метал-забруднених ґрунтів була б така, що нагромаджує значну біомасу та може толерувати і нагромаджувати високі концентрації важких металів. Серед таких рослин значну увагу приділено деревам. Показано, що береза, клен, верба, тополя можуть нагромаджувати важкі метали [13; 14]. Проте серед цих видів лише верба є найбільш придатною для фітореMediaції, оскільки вона швидко росте [15; 16].

Важкі метали особливо небезпечні тоді, коли вони перебувають у середовищі у високій концентрації та мають високу мобільність – можуть легко переміщуватись між середовищами (ґрунт – вода). Їх іммобілізація, наприклад, у прикореневій зоні рослин, є ефективним методом зниження їх токсичності [17]. З іншого боку, поглинання та транспортування, наприклад кадмію, у надземну частину дає змогу безпечно усунути цей полютант з оточуючого середовища [18]. В обох підходах є свої недоліки – ефективне утримання полютанта в разі іммобілізації та висока концентрація важкого металу в рослинних тканинах, що створює додаткові проблеми для її утилізації.

Певним чином *S. viminalis* L. має унікальну здатність поглинати, деактивувати та нагромаджувати великі кількості важких металів без зниження ростових показників. Ця властивість є досить високою, порівняно з іншими рослинами чи мікроорганізмами, що дає змогу вважати її гіперакумулятором [19]. Окрім того, вона виділяється серед інших видів енергетичних рослин, які маючи високі ростові показники, не нагромаджують важкі метали у таких кількостях. Порівняно з іншими рослинами-гіперакумуляторами, *S. viminalis* L. поглинає іони кадмію у достатній для гіперакумуляторів кількості, при цьому не зупиняючи темпів росту. При порівнянні нагромадження важких металів вербою енергетичною та інших відомих рослин-гіперакумуляторів помітно, що верба не тільки нагромаджує більше, а нагромаджує більше у перерахунку на одиницю сухої маси (табл. 2).

Важкі метали при надходженні в організм верби поведуться по-різному. Так, свинець, хром та мідь переважно нагромаджуються у коренях, а кадмій, нікель та цинк є більш мобільними та легко переміщуються у надземну частину [21]. Вивчення розподілу важких металів, місць акумуляції та переміщення має першочергове значення для фітореMediaції.

Таблиця 2  
Акумуляція іонів кадмію рослинами [20]

Рослина	Продуктивність, т/га	Вміст металу, мг/кг маси сухої речовини	Поглинання металу, г/га
<i>Thlaspi caerulescens</i>	2,93	12,1	35
<i>Alyssum murale</i>	1,32	33,7	43
<i>Salix viminalis</i>	10,00	22,1	217
<i>Hordeum sativum</i>	4,95	2,4	12
<i>Trifolium repens</i>	3,52	1,14	4

З метою дослідження впливу важких металів на рослини верби було проведено ряд польових та лабораторних експериментів. Так, при дослідженні впливу іонів кадмію і цинку на різні клони рослин верби було встановлено, що деякі клони були толерантними до обох металів, інші – лише до одного, толерантні клони нагромаджували важкі метали у діапазоні від 1 до 72% [22].

При вивченні 70 клонів верби показано значні відмінності у нагромадженні ними кадмію – різниця між найбільшим вмістом та найменшим сягала 43 рази [23]. Найбільша здатність акумулювати важкі метали показана для *S. viminalis* L. – коефіцієнт акумуляції становив 3,4 у польових умовах дослідження. Хоча для того, щоб повністю очистити ґрунт до допустимих норм при такій акумуляції необхідно 77 років, а це практично неможливо, оскільки продуктивний вік верби становить близько 30 років. Проте за умов невисокого рівня забруднення ґрунту вирощування на ньому верби дає позитивний результат.

У випадку *S. viminalis* L. процес нагромадження важких металів починається з кореневої системи і через провідну систему іони металів транспортуються по організму. При вирощуванні *S. viminalis* L. на субстратах, забруднених важкими металами, вони повільно, але стабільно очищуються від цих поліютантів. Дослідження вмісту кадмію на 8 ґрунтах, де вирощували вербу, встановило зменшення його концентрації на 30–40%. У лабораторних умовах при вирощуванні на водних культурах верба поглинає близько 30% кадмію за 90 діб [24].

При вирощуванні *S. viminalis* L. на хвостосховищі м. Стебник було помічено, що різні органи рослин *S. viminalis* накопичували різну кількість важких металів. Найбільше вони накопичувались у кореневій системі, найменше – у пагонах. У листі спостерігали велике нагромадження свинцю, цирконію та хрому порівняно з коренем та пагоном. У найбільшій кількості у листі *S. viminalis* накопичувались цинк та

хром за росту на субстраті з хвостосховища. У коренях рослин *S. viminalis* зростав вміст молібдену, міді, нікелю, цирконію, барію та заліза. Ріст *S. viminalis* також впливав на вміст важких металів у субстраті, відбулось помітне зменшення ванадію, міді, цинку, цирконію, хрому, титані та заліза щодо початкового рівня. Найбільше зменшився вміст цинку – в 12 разів щодо початкового рівня [25].

При дослідженні концентрації важких металів у корі та деревині верби було встановлено, що деревина містила кадмію на порядок більше, ніж у ґрунті [21]. Компартментизація важких металів саме у деревині дає змогу використовувати її для довготривалої ремедіації ґрунту. У Швеції підраховано, що річне поглинання кадмію вербою (за виключенням добрив та надходження з повітря) становило близько 3–4% від загальної його кількості у ґрунті, що дає змогу за 20–25 років знизити концентрацію кадмію нижче природного рівня [26]. Середньо верба акумулює 20–30 г кадмію з 1 га за рік.

Окрім кадмію, *S. viminalis* L. ефективно нагромаджує й інші важкі метали, наприклад мідь. Дослідження впливу іонів міді виявили їх надходження до усіх органів верби (табл. 3).

Таблиця 3  
Нагромадження іонів Cu органами рослин *Salix viminalis* L. [21]

Вміст Cu у середовищі, мМ/л	Нагромадження Cu, мг/кг маси сухої речовини		
	Листки	Пагони	Корені
0	0,22	0,28	0,48
0,5	0,84	1,69	3,27
1,0	1,65	2,46	5,38
1,5	2,79	2,93	8,84
2,0	3,46	3,56	10,61
2,5	4,22	3,90	13,51
3,0	2,30	4,69	15,38

Рослини вирощувались на поживному середовищі Кнопа з додаванням солей міді у відповідних концентраціях. Помітно, що нагромадження іонів зростає зі збільшенням концентрації металу в середовищі, корені та стебла нагромаджують значно більше важкого металу, ніж новоутворені листки. Латеральні частини, швидше, є кінцевим пунктом призначення для іонів важких металів та не беруть участі у транспортуванні [27].

При проведенні польових досліджень на територіях, збагачених важкими металами, встановлено, що 50–80% біоаккумуляованих металів нагромаджується у коренях та пагонах, що вказує на стійке вилучення та стабілізацію цих поліютантів рослинами верби. Оскільки метали, що нагромаджуються листям, повертаються повторно у середовище

наприкінці сезону. Найвищий коефіцієнт акумуляції був для кадмію та цинку, для нікелю, міді та свинцю він був значно нижчим.

Під час дослідження нагромадження важких металів у рослинах верби було встановлено, що живці рослин, відібрані у нижніх частинах рослин, нагромаджують значно вищі концентрації іонів металів, ніж ті, що розміщені вище.

Морфометричні показники рослин верби та нагромадження ними кадмію, нікелю та міді за умов росту на забруднених та не забруднених важкими металами ділянках не відрізнялась. Проте, коли рослини, що росли на забрудненій території, перенесли на ділянки з низьким вмістом важких металів, їх ріст пришвидшувався. Також у рослин забруднених ділянок основна маса важких металів нагромаджувалась у корені, запобігаючи тим самим переносу цих поллютантів у надземну частину [21].

Дослідження впливу іонів важких металів на стійкість різних видів верби показало, що при вирощуванні рослин на водних культурах є багато варіацій серед клонів. Встановлено, що стійкість рослин верби до важких металів не є видоспецифічною, а, швидше, клоно- чи гібридо-специфічною. Ця ознака є дуже важливою для планування фітореMediaційних досліджень, оскільки для початку досліджень необхідне детальне планування з обов'язковим попереднім визначенням конкретного стійкого клону, який може нагромаджувати важкі метали [27].

Використання енергетичних рослин, зокрема верби, для фітореMediaції ґрунтів, забруднених важкими металами має високий потенціал. Існує багато доказів, що ці рослини можуть виживати та нормально розвиватись у таких складних умовах. Звичайно, інтенсивність росту може бути дещо знижена та це не є таким важливим. Важливо те, що вони толерують такі високі концентрації важких металів. Це стає можливим, перш за все, завдяки тому, що корені оминають ділянки ґрунту із високим вмістом цих поллютантів та іммобілізують їх у підземні органи. З часом у рослин проходить акліматизація до їх дії.

#### **Ремедіація стічних вод за допомогою верби.**

Окрім ремедіації важких металів, вербу застосовують для ремедіації мулу міських стічних вод. Мул стічних вод містить у великій кількості нітроген, фосфор та інші елементи, що можуть виступати у ролі поживного середовища для рослин. Проте санітарні норми не дають змогу використовувати їх для рослин, які застосовуються в їжу чи для годівлі худоби.

У 1990-х рр. у Швеції було закладено плантації енергетичної верби разом із іригаційним комплексом поруч з очисними спорудами стічних вод для зменшення надходження сполук нітрогену та фосфору у середовище. Припускали, що якщо продуктивність верби буде 10 т сухої речовини/га з концентрацією нітрогену у тканинах 0,5%, то це дасть змогу видобути із середовища близько 50 кг нітрогену/га за рік. Проте дослідження показали, що верба насправді може усувати близько 200 кг нітрогену/га за рік, оскільки вона утворює стійкі асоціації з денітрифікуючими мікроорганізмами, що переводять нітратну форму азоту у форму молекулярного азоту [4].

У містечку центральної Швеції (20 000 жителів) було запроваджено новітню систему очистки. Стічні води, збагачені сполуками нітрогену, які раніше очищувались на спеціальній фабриці, розподілялись по території в 75 га, де росла енергетична верба. У воді містилося близько 800 мг нітрогену на 1 л, взимку стічні води закачуються у спеціальні резервуари та використовуються літом для поливу. Така система переробляє близько 11 т нітрогену та 0,2 т фосфору щорічно [4].

#### **Вирощування енергетичної верби в Україні.**

Використання вербової біомаси як енергетичної сировини набуває у нашій державі широкого розвитку. Цей напрям особливо активно розвивається упродовж останніх десяти років, коли деякі компанії, переважно у західних областях, почали у промислових масштабах створювати енергетичні вербові плантації на малопродатних для сільськогосподарського виробництва землях. Нині площа таких насаджень становить близько 5 000 га [7].

Використання верби як екологічно чистого джерела енергії має велике значення для України. Біологічне паливо може стати більш дешевою та доступною альтернативою дорогим видам палива, що імпортуються в Україну із-за кордону. А це, своєю чергою, сприятиме зменшенню нинішнього високого рівня залежності від іноземних постачальників енергоресурсів. А виробництво палива з біомаси має велике екологічне значення, оскільки зменшує емісію парникових газів в атмосферу [3].

**Головні висновки.** Рослини *S. viminalis* є альтернативою для вирішення питання очистки забруднених поллютатами, зокрема важкими металами, ґрунтів та використання їх як енергетичної сировини. *S. viminalis* L. ефективно нагромаджує такі важкі метали, як кадмій та мідь. Компартментизація важких металів саме у деревині рослин дає змогу використовувати її для довготривалої ремедіації ґрунту.

#### **Література**

1. Jama A., Nowak W. Willow (*Salix viminalis* L.) in purifying sewage sludge treated soils. *Polish Journal of Agronomy*. 2012, 9. P. 3–6.
2. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 83 (2002). P. 37–46.
3. Пиріков О.В. Практичний посібник з поетапного підходу до висадки енергетичних рослин. Київ, 2016. 99 с.
4. Borjesson P., Gustavsson L., Christersson L., Linder S. Future production and utilization of biomass in Sweden: Potentials and CO<sub>2</sub> mitigation. *Biomass Bioenergy*. 1997. 13 (6). P. 399–412.

5. Olejniczak A., Cyganiuk A., Kucińska A., Jerzy P. Łukaszewicz. Energetic Willow (*Salix viminalis*). Unconventional Applications, Sustainable Growth and Applications in Renewable Energy Sources, Dr. Majid Nayeripour (Ed.), InTech. 2011. P. 181–208.
6. Dimitriou I., Aronsson P. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylyva* 221. 2005. Vol. 56. pp. 47–50.
7. Фучило Я.Д., Сбитна М.В., Зелінський Б.В. Стан, перспективи та особливості створення енергетичних плантацій верб в Україні. Міжнародна науково-практична конференція Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (м. Київ, 11 липня 2017 р.). С. 159–160.
8. Raskin I., Ensley B. D. Phytoremediation of toxic metals using plants to clean up the environment. New York: Wiley; 2000. P. 316.
9. Salt D.E., Smith R.D., Raskin I. Phytoremediation. *Annu Rev Plant Physiol.* 1998. 49. P. 643–68.
10. Pilon-Smits E. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2005. 56. 15–39.
11. Pulford I.D., Watson C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review. *Environment International.* 29 (2003), p. 529–54.
12. Brown S.L., Chaney R.L., Angle J.S., Baker A.J. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc- and cadmium contaminated soil. *J Environ Qual.* 1994. 23. P. 1151–1157.
13. Brooks R.R. Plants that hyperaccumulate heavy metals. Wallingford: CAB Intl. 1998. 381 p.
14. Ferro A., Chard J., Kjellgren R., Chard B., Turner D., Montague T. Groundwater capture using hybrid poplar trees: evaluation of a system in Ogden, Utah. *Int. J. Phytoremed.* 2001. 3. P. 87–104.
15. Lindegaard K.N., Barker J.H.A. Breeding willows for biomass. *Asp Appl Biol.* 1997. 49. P. 155–62.
16. Greger M., Landberg T. Use of willow in phytoextraction. *Int. J. Phytoremed.* 1999 (1). P. 115–123.
17. Berti W.R., Cunningham S.D. Phytostabilization of metals. In *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plants to Clean up the Environment*, ed. I Raskin, BD Ensley, 2000. pp. 71–88.
18. Blaylock M.J., Huang J.W.. Phytoextraction of metals. In *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plants to Clean up the Environment*, ed. I Raskin, BD Ensley, 2000, pp. 53–70.
19. Łukaszewicz J.P., Wesołowski R., Cyganiuk A. Enrichment of *Salix viminalis* wood in metal ions by means of phytoextraction. *Pol. J. Environ. Stud.* 2009. 18, (3), pp. 507–511. ISSN: 1230-1485.
20. Porębska G., Ostrowska A. Heavy Metal Accumulation in Wild Plants: Implications for Phytoremediation. *Polish Journal of Environmental Studies.* Vol. 8, No. 6 (1999). P. 433–442.
21. Mleczek M., Magdziak Z., Rissmann I., Goliński P. (2009). Effect of different soil conditions on selected heavy metal accumulation by *Salix viminalis* tissues, *J. Environ. Sci. Health Part A*, 44, (14), Pp. 1609–1616.
22. Landberg T., Greger M. Differences in uptake and tolerance to heavy metals in *Salix* from unpolluted and polluted areas. *Appl Geochem.* 1996. 11. P. 175–80.
23. Greger M., Landberg T. Use of willow in phytoextraction. *Int. J. Phytoremed.* 1999 (1). P. 115–123.
24. Eriksson J., Ledin S. Changes in phytoavailability and concentration of cadmium in soil following long term *Salix* cropping. *Water Air Soil Pollut.* 1999. 114. p. 171–84.
25. Фецох А.Б., Буньо Л.В., Пацула О.І. Вміст важких металів у рослин *Salix viminalis* L. за росту на засоленому субстраті з хвостосховища м. Стебник. «Біологія: від молекули до біосфери», Харків, 29 листопада – 2 грудня 2016. С. 106–107.
26. Ostman G. Cadmium in *Salix* – a study of the capacity of *Salix* to remove cadmium from arable soils. In: Aronsson P, Perttu K, editors. Willow vegetation filters for municipal wastewaters and sludges. A biological purification system. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences; 1994. P. 153–5.
27. Gąsecka M., Mleczek M., Magdziak Z., Drzewiecka K., Goliński P., Chadzinikolaou T. Physiological and Morphological Changes in *Salix viminalis* as a Result of Plant Exposure to Copper. Proc. 15th ICHMET, Gdańsk, September 2010. pp. (350-<sup>353</sup>), ISBN: 9788392898658.