

Міністерство освіти і науки України  
Львівський національний університет імені Івана Франка

Національна академія наук України  
Інститут екології Карпат

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ШПАК ЯРОСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 631.45:574.2:633.174:581.4:581.13:581.192

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ФІТОСТРЕСОРНІСТЬ ПОРОДНИХ ВІДВАЛІВ  
КАМ'ЯНОВУГІЛЬНИХ ШАХТ  
ЗА ВПЛИВУ ПОПЕЛУ ТЕС І ГУМАТУ КАЛІЮ**

03.00.16 – Екологія

Біологічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Шпак Я. В. \_\_\_\_\_

Науковий керівник:  
Терек Ольга Іштванівна,  
доктор біологічних наук, професор,  
заслужений працівник освіти України

Львів - 2020

## АНОТАЦІЯ

Шпак Я. В. «Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу ТЕС і гумату Калію». – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 03.00.16 – екологія. – Інститут екології Карпат НАН України. – Львів, 2020.

В дисертації представлено результати досліджень впливу кам'яновугільного попелу Добротвірської теплоелектростанції (Львівська область), вермигумату (гумату Калію з вермикомпосту) і гумату Калію «ГКВ-45» (виробництва ТзОВ «Парк», Львівська область) на «фітостресорність» (негативний вплив сукупності стрес-факторів на рослинний організм) субстратів сіро-чорної неперегорілої та оранжево-червоної перегорілої породи відвалу вуглевидобутку ЦЗФ (Центральної збагачувальної фабрики) «Червоноградська» (Львівська область) з використанням суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) в якості біотесту.

Вперше досліджено сумісність та ефективність застосування кам'яновугільного попелу з гуматами для меліорації породних відвалів гірничодобувної промисловості. Також, проведено кореляційний аналіз вмісту рухомих форм макроелементів і важких металів у субстраті породного відвалу Червоноградського ГПР (гірничопромислового району) з їх валовим вмістом в органах рослин з С<sub>4</sub> типом фотосинтезу (суданської трави) за впливу контрольованих експериментальних умов. Крім того, в субстраті сіро-чорної неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» виявлено високий вміст амонійного Нітрогену.

Показано, що субстрат неперегорілої породи пригнічує екофізіологічні параметри суданської трави більшою мірою, ніж субстрат перегорілої породи. Зокрема, суха маса коренів суданської трави після 95

діб росту на субстраті еталонної ґрунтосуміші (без впливу стрес-факторів) становила 296; перегорілої породи – 101; неперегорілої – 54 мг. Також з'ясовано, що листки рослин еталону мають співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* – 2,4; перегорілої породи – 1,9; неперегорілої – 1,3. Крім того, слід відмітити підвищений вміст фенолів у досліджуваних рослинах за впливу субстратів породного відвалу. Зокрема, сумарний вміст фенольних сполук у листках суданської трави після 68 діб росту на субстраті еталону складав 558; перегорілої породи – 1025; неперегорілої – 1284 мг/г сухої маси.

Внесення кам'яновугільного попелу і гуматів до субстратів породного відвалу спричинило значну нормалізацію морфометричних параметрів, вмісту пластидних пігментів та фенольних сполук у рослинах суданської трави. Встановлено, що сумісне застосування попелу ТЕС з гуматами покращує вищевказані екофізіологічні параметри рослин ефективніше, ніж тільки одного з цих меліорантів.

Дослідження більш фітостресорного субстрату неперегорілої породи показали, що він має низький рівень рН – 3,6. Додавання попелу підвищує його – до 4,3; гумату – до 4,0, а внесення попелу разом з гуматом – до 4,4.

З'ясовано також, що субстрат неперегорілої породи містить 14,5 мг/кг рухомих форм Плюмбуму та 44,5 мг/кг Хрому. Додавання гумату Калію «ГКВ-45» призвело до зниження вмісту Рb, але не спричинило змін вмісту Cr. Натомість, внесення попелу не змінило вміст Рb, але знизило вміст Cr. Водночас додавання попелу разом з гуматом знижує вміст обох досліджуваних важких металів. В свою чергу вирощування суданської трави протягом 95 діб також знижує вміст Рb і Cr в субстраті. Зокрема, в коренях суданської трави після росту на субстраті породного відвалу виявлено 6,44 мг/кг валового Рb і 14,2 мг/кг валового Cr, у стеблах – 1,76 мг/кг Рb і 8,44 мг/кг Cr, а в листках – 1,38 мг/кг Рb і 11,7 мг/кг Cr. Додавання попелу до породи призвело до зниження вмісту Рb і Cr у стеблах і листках, а внесення гумату знижує вміст Рb і Cr тільки у листках.

Встановлено, що сумісне застосування попелу і гумату Калію знижує вміст Рb і Cr у коренях, стеблах і листках суданської трави, яку вирощували на субстраті неперегорілої породи у більшій мірі, ніж внесення тільки попелу чи гумату.

У субстраті неперегорілої породи виявлено 21,1 мг/кг рухомих форм Кальцію, 13,9 мг/кг Калію і 16,2 мг/кг Фосфору. Вирощування суданської трави протягом 95 діб не вплинуло на вміст К, Са і Р у цьому субстраті. Додавання попелу також не вплинуло на вміст цих макроелементів у субстраті породного відвалу, а внесення гумату підвищило тільки вміст Фосфору. Показано, що застосування попелу сумісно з гуматом збільшує вміст рухомих форм К і Р у субстраті неперегорілої породи. Виявлено, що корені суданської трави накопичують 6,2 г/кг валового Са; 1,9 г/кг К і 1,0 г/кг Р; у стеблах – 7 г/кг валового Са; 2,1 г/кг К і 0,7 г/кг Р, а в листках – 5,7 г/кг Са; 2,7 г/кг К і 1,2 г/кг Р.

Додавання попелу не вплинуло на вміст Са і К в органах суданської трави, але збільшило вміст Р у коренях і листках. В свою чергу додавання гумату підвищило тільки вміст Калію в стеблах і Фосфору в листках. Натомість застосування обох меліорантів разом призвело до підвищення вмісту Са, К і Р у коренях, стеблах і листках.

Також виявлено, що субстрат неперегорілої породи містить 2,3 г/кг амонійного Нітрогену, що більше, ніж в умовно чистій ґрунтосуміші еталону – 1,2 г /кг. Показано, що субстрат неперегорілої породи містить 3 мг/кг нітритного і 2,1 мг/кг нітратного Нітрогену. Додавання попелу знизило вміст амонійного Нітрогену на фоні підвищення нітритного і нітратного Нітрогену. Внесення гумату достовірно підвищило вміст нітритного і нітратного Нітрогену, але не змінило вміст амонійного Нітрогену в субстраті неперегорілої породи. Встановлено, що сумісне застосування попелу та гумату не змінює вміст амонійного Нітрогену, але підвищує вміст нітритного та нітратного Нітрогену в субстраті неперегорілої породи. Водночас вирощування суданської трави протягом

95 діб знижує вміст амонійного, нітритного та нітратного Нітрогену в субстраті породного відвалу.

При цьому, в коренях суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи виявлено 3,8, у стеблах – 3,3, а у листках – 4,2 г/кг валового Нітрогену. Встановлено, що внесення тільки попелу чи гумату до породи призводить до підвищення вмісту валового Нітрогену в коренях, стеблах і листках. Проте сумісне застосування обох меліорантів підвищує вміст валового Нітрогену в органах суданської трави більшою мірою, ніж тільки одного з них.

Також відмічено, що субстрат неперегорілої породи містить 121 г/кг органічного Карбону, що значно більше, ніж умовно чиста ґрунтосуміш еталону – 81 г/кг. Внесення гумату не вплинуло на вміст цього макроелементу в субстраті породного відвалу. Натомість виявлено зниження вмісту органічного Карбону в субстраті за впливу попелу і його внесення сумісно з гуматом. В свою чергу показано, що 95 діб вирощування суданської трави призводить до підвищення вмісту органічного Карбону в субстраті неперегорілої породи.

При цьому, в коренях рослин після росту на субстраті породного відвалу виявлено 324, у стеблах – 262, а в листках – 211 г/кг органічного Карбону. Додавання попелу та гумату до породи призвело до підвищення вмісту органічного Карбону в коренях, стеблах і листках суданської трави. Відмічено, що сумісне застосування обох меліорантів разом підвищує вміст Карбону в органах рослин у більшій мірі, ніж тільки одного з них.

Зазначимо, що субстрат неперегорілої породи після вирощування суданської трави не впливає на морфогенез проростків крес-салату, який використовували в якості біотесту алелопатичних властивостей потенційного фітомеліоранта.

Аналіз літературних джерел у поєднанні з кореляційним аналізом дозволяє пояснити одержані нами результати через зв'язок актуальної

кислотності субстрату, його хімічного складу та екофізіологічними параметрами суданської трави.

Загалом показано, що попіл ТЕС і гумати Калію значно знижують фітостресорність субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська», а їх сумісний вплив ефективніший, ніж тільки одного з них.

**Ключові слова:** фітостресорність, фітомеліорація, породні відвали вуглевидобутку, кам'яновугільний попіл ТЕС, гумати, *Sorghum*.

## SUMMARY

*Shpak Y.* 'Phytostressority of coal mines waste dumps under the effect of ash of TPP and potassium humate'. – Manuscript.

Dissertation for PhD degree in biology by specialty 03.00.16 – ecology. – Institute of Ecology of the Carpathians, Lviv – 2020.

In the dissertation are presented researches results about effect of coal fly ash, potassium humates (of vermicompost and preparate 'ГКВ-45') to reduce substrates *phytostressority* (complexive negative impact on plant organism) of Central Coal Enreacment Factory 'Chervonohradska' with using of Sudan grass *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) in role of biotester. For the first time researched efficiency and compatibility of coal ash with humates for amelioration of mining rock dumps. Also, performed the correlation analysis of macronutrients and heavy metals mobile form contents in the substrate of the Chervonograd industrial coal mining region with their total contents in the organs of plants with C<sub>4</sub>-type of photosynthesis (Sudan grass) under the effect of controlled experimental conditions. In addition, found high content of ammoniacal Nitrogen in the gray-black unburned rock substrate of the rock dump of Central Coal Enreacment Factory 'Chervonohradska'.

Proved that substrate of unburned rock depress ecophysiological parameters of Sudan grass more than substrate of burned rock. In particular, the roots dry mass after 95 days of growth on the substrate of standart (soil mix

without stress) was 296; burned – 101 and unburned rock – 54 mg. Also found that standard plants leaves have the ratio of chlorophyll *a* to chlorophyll *b* – 2.4; burned 1.9; unburned rock – 1.3. In addition, observed the increased content of phenols in the researched plants under the effect of rock dump substrates. In particular, the total content of phenolic compounds in the wet mass of Sudan grass leaves after 68 days of growth in microcosms (small artificial ecosystems) on the substrate of the standard was 558; burned rock – 1025; unburned – 1284 mg/g of dry weight.

The introduction of coal ash and humates into rock dump substrates caused normalization of morphometric parameters, plastids pigment content and phenolic compounds in Sudan grass plants. Established that the combined use of TPP ash with humate preparations improves the abovementioned ecophysiological parameters of plants more efficiently than only one of these ameliorants.

Researches of more phytostressive unburned rock substrate shown that it has a low pH level of 3.6. Adding ash raises it to 4.3; humate up to 4.0, and ash along with humate up to 4.4.

Also found that the unburned rock substrate contains 14.5 mg/kg of mobile Plumbum and 44.5 mg/kg of mobile Chromium. Introduction of potassium humate 'ГКВ-45' resulted in a decrease in Pb content, but did not cause a change in Cr content. On the other hand, the introduction of ash did not lead to changes in the Pb content, but reduced the Cr content. At the same time, the addition of ash together with humate significantly reduced the content of both researched heavy metals. In turn, growing of Sudanese grass for 95 days also reduced the content of Pb and Cr in the substrate. In particular, found 6.44 mg/kg of total Pb and 14.2 mg/kg of total Cr in the roots of Sudan grass after growth on the rock dump substrate, 1.76 mg/kg of Pb and 8.44 mg/kg of Cr in the stems and in leaves – 1.38 mg/kg of Pb and 11.7 mg/kg of Cr. The addition of ash to the rock resulted in decrease in the content of Pb and Cr in the stems and leaves, and the introduction of humate reduced the content of Pb and Cr

only in the leaves. The combined use of coal fly ash and humate reduced the content of Pb and Cr in the roots, stems, and leaves of Sudan grass, which was grown on unburned rock substrate to a greater extent than the introduction of ash or humate alone.

Found 21.1 mg/kg of mobile Calcium, 13.9 mg/kg of mobile Potassium and 16.2 mg/kg of mobile Phosphorus in the substrate of the unburned rock. The cultivation of Sudan grass for 95 days did not affect the content of K, Ca and P in this substrate. The addition of ash also does not change the content of these macronutrients in the rock dump substrate, and the application of humate significantly increases only the mobile Phosphorus content. Proved that the use of ash in combination with humate leads to increase in the content of mobile forms K and P in the substrate of the unburned rock. Found that Sudan grass roots to accumulate 6.2 g/kg of total Ca; 1.9 g/kg of total K and 1.0 g/kg of total P; in stems – 7 g/kg of total Ca; 2.1 g/kg of total K and 0.7 g/kg of total P, and in leaves – 5.7 g/kg of total Ca; 2.7 g/kg of total K and 1.2 g/kg of total P.

The addition of coal ash did not affect the content of Ca and K in Sudan grass organs but increased the P content of roots and leaves. In turn, the addition of humate significantly increased only the content of potassium in the stems and phosphorus in the leaves. Instead, the use of both ameliorants together increased contents of Ca, K and P content in the roots, stems and leaves.

Also found that unburned rock substrate contains 2.3 g/kg of ammonium Nitrogen, which is greater than 1.2 g/kg of the relatively pure soil mixture of the standard. It is shown that unburned rock substrate contains 3 mg/kg of nitrite and 2.1 mg/kg nitrate Nitrogen. The addition of coal ash reduced the content of ammonium Nitrogen and contrastly increased nitrite and nitrate Nitrogen. The application of humate significantly increased the content of nitrite and nitrate Nitrogen, but did not change the content of ammonium Nitrogen in unburned rock substrate. Established that the combined use of ash and humate does not change the content of ammonium Nitrogen, but increases the content of nitrite and nitrat Nitrogen in the unburned rock substrate. At the same time, the



cultivation of Sudan grass for 95 days significantly reduced the content of ammonium, nitrite and nitrate Nitrogen in the rock dump substrate.

At the same time, in roots of Sudan grass that cultivated on unburned rock substrate found 3.8, in the stems – 3.3, and in the leaves – 4.2 g/kg of total Nitrogen. The introduction of ash or humate into the rock alone has been shown to increase the gross nitrogen content of the roots, stems and leaves. However, the combined use of both ameliorants increases the gross nitrogen content of Sudan grass organs more than just one of them.

Also observed that the substrate of the unburned rock contains 121 g/kg of organic Carbon, which is higher than the relatively pure soil mixture of the standard – 81 g/kg. The application of humate did not affect the content of this macronutrient in the rock dump substrate. Instead, the addition of only ash and in combination with humate caused a reduction in the content of organic Carbon in the substrate. In turn, proved that 95 day of Sudanese grass cultivation increase the content of organic Carbon in the substrate of non-burnt breed.

At the same time, were found in the roots of the plants after growth on the unburned rock substrate found 324, in the stems – 262 , and in the leaves – 211 g/kg of organic Carbon. The addition of ash and humate to the rock increased organic Carbon content in the roots, stems and leaves of Sudan grass. Proved that the combined use of both ameliorants together increases Carbon content in plant organs to a greater extent than just one of them.

Also noted that unburned rock substrate after the cultivation of Sudan grass does not cause on the morphometrical parameters of garden cress *Lepidium sativum* L. which were used as biotester of its possible allelopathic properties.

The analysis of the literature, combined with the correlation analysis, allows us to clarify the results obtained by the relationship between the actual acidity of the substrate, its chemical composition and the ecophysiological parameters of the Sudan grass.

In general, proved that coal ash and potassium humate significantly

reduce the phytostressority of the rock dump substrates, and their combined effect is more effective than just one of them.

**Key words:** phytostressority, phytoamelioration, coal mining rock dumps, coal fly ash, humate, *Sorghum*.

## Список публікацій здобувача в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

### Публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. **Shpak Y., Rudenko S.** Modeling of chromium effect on ecophysiological parameters of soil-plant system. *Studia Biologica*. 2015. Is. 2. Vol. 11. P. 115-124. **CrossRef, DOAJ, J-Gate** (*Особистий внесок: розробка схеми досліджу, експериментальна робота й обговорення результатів досліджень*).
2. **Шпак Я.,** Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Фітотоксичність субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу теплоелектростанцій і гумату калію. *Traektoriâ Nauki/Path of Science*. 2017. Вип. 3. Т. 3. С. 1-17. **CrossRef, Index Copernicus, DOAJ, J-Gate** (*Особистий внесок: розробка схеми експерименту, аналіз та обговорення результатів досліджень*).
3. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Вміст макроелементів і важких металів у породних відвалах і рослинах за впливу меліорантів. *Екологічні науки*. 2018. Вип. 23. Т.4. С.117-123. **Index Copernicus** (*Особистий внесок: експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень*).

### Публікації в наукових фахових виданнях України:

1. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу додавання кам'яновугільного попелу. *Вісник Львівського ун-ту. Серія біологічна*. 2016. Вип. 74. С. 127-135.

*(Особистий внесок: експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень).*

2. **Шпак Я.,** Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Нейтралізація фітотоксичності перегорілої породи відвалів кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом калію. Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія біологічна. 2017. Вип. 7. Т. 2. С. 103-108. *(Особистий внесок: розробка схеми досліджу та обговорення результатів досліджень).*
3. **Шпак Я.,** Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу кам'яновугільного попелу та вермигумату. Біологічні системи. 2017. Вип. 1. Т. 9. С.138-143. *(Особистий внесок: розробка схеми експерименту та обговорення результатів досліджень).*

#### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

1. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Стійкість сорго трав'янистого (*Sorghum vulgare* var. *sudanense* Hitch.) до умов породних відвалів породних відвалів кам'яновугільних шахт». Матеріали XI Наукової конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку», 10-13 вересня 2015 р. Шацьк. С. 115-116. *(Особистий внесок: експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень).*
2. **Шпак Я. В.,** Баранов В. І., Терек О. І. Вплив біогумату на морфометричні параметри та вміст пігментів фотосинтезу в листках сорго за умов росту на субстратах породних відвалів вугільних шахт. Збірник тез 65-ї науково-технічної конференції «Наукові основи підвищення продуктивності та біологічної стійкості лісових та урбанізованих екосистем», 24 листопада 2015 р. Львів. С. 131-133. *(Особистий внесок: розробка схеми досліджу, експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень).*
3. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Вплив вугільної золи та калій гумату на

- фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт. Матеріали XII наукової конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку», 8-11 вересня 2016 р. Шацьк. С. 106-107. *(Особистий внесок: розробка схеми досліджу, експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень).*
4. **Шпак Я.**, Баранов В., Терек О. Моделювання впливу золи Добротвірської ТЕС на фітотоксичність породних відвалів вугільних шахт за допомогою сорго трав'янистого. Збірник тез XII Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології», 19-21 квітня 2016 р. Львів. С. 346-347. *(Особистий внесок: розробка схеми експерименту, експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень).*
5. **Шпак Я.**, Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Нейтралізація фітотоксичності субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом калію. Збірник тез XIII міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології», 25-27 квітня 2017 р. Львів. С. 146-147. *(Особистий внесок: розробка схеми досліджу та обговорення результатів досліджень).*
6. Роман І., **Шпак Я.**, Баранов В., Терек О. Оптимізація хімічного складу породних відвалів вуглевидобутку попелом ТЕС і гуматом Калію. Збірник тез XV Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології», 9-11 квітня 2019 р. Львів. С. 205-206. *(Особистий внесок: розробка схеми експерименту та обговорення результатів досліджень).*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	16
ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	24
1.1. Вплив породних відвалів вуглевидобутку на довкілля.....	24
1.2. Фітостресорність і біотестування породних відвалів вуглевидобутку.....	25
1.3. Вплив Плюмбуму та Хрому на біоту.....	28
1.4. Роль Кальцію, Калію та Фосфору в рослинному організмі.....	31
1.5. Значення Нітрогену та Карбону для системи ґрунт-рослина.....	33
1.6. Вплив кам'яновугільних ТЕС на довкілля і використання їх попелу.....	34
1.7. Роль гумінових речовин у системі ґрунт-рослина та використання препаратів на їх основі.....	37
1.8. Самозаростання та фітомеліорація породних відвалів вуглевидобутку.....	40
РОЗДІЛ 2. РАЙОН, ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	47
2.1. Характеристика району дослідження .....	47
2.2. Відбір і підготовка матеріалів.....	55
2.3. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС і гуматів Калію.....	55
2.3.1. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС і вермигумату Калію в умовах чашок Петрі.....	55
2.3.2. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС в умовах мікрокосмів.....	57
2.3.3. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» в напівпольових умовах.....	59
2.4. Визначення пластидних пігментів і фенольних сполук.....	60

2.5. Визначення актуальної кислотності субстратів.....	62
2.6. Визначення Плюмбуму та Хрому в субстратах і рослинах.....	62
2.7. Визначення Кальцію, Калію та Фосфору в субстратах і рослинах.....	63
2.8. Визначення Нітрогену в субстратах і рослинах.....	65
2.9. Визначення органічного Карбону в субстратах і рослинах.....	67
2.10. Біотестування потенційного алелопатичного впливу суданської трави з використанням крес-салату.....	68
2.11. Обчислення меліораційного ефекту.....	69
2.12. Статистичний аналіз результатів.....	70
<b>РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ПОПЕЛУ ДОБРОТВІРСЬКОЇ ТЕС І ВЕРМИГУМАТУ КАЛІЮ НА ФІТОСТРЕСОРНІСТЬ СУБСТРАТІВ ПОРОДНОГО ВІДВАЛУ ЦЗФ «ЧЕРВОНОГРАДСЬКА».....</b>	<b>72</b>
3.1. Екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті оранжево-червоної перегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і вермигумату Калію.....	72
3.2. Морфометричні параметри, вміст хлорофілів і фенольних сполук суданської трави за росту на субстраті сіро-чорної неперегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і вермигумату Калію.....	79
<b>РОЗДІЛ 4. ФІТОСТРЕСОРНІСТЬ СУБСТРАТІВ ПОРОДНОГО ВІДВАЛУ ЗА ВПЛИВУ ПОПЕЛУ ТЕС В УМОВАХ МІКРОКОСМУ «ЗЕМНОВОДНА КОЛОНА».....</b>	<b>86</b>
4.1. Морфометричні параметри, вміст пігментів фотосинтезу і фенольних сполук суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи з додаванням попелу ТЕС.....	86
4.2. Екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням попелу ТЕС.....	90
<b>РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ПОПЕЛУ ДОБРОТВІРСЬКОЇ ТЕС І ГУМАТУ КАЛІЮ «ГКВ-45» НА ФІТОСТРЕСОРНІСТЬ СУБСТРАТІВ ПОРОДНОГО ВІДВАЛУ.....</b>	<b>96</b>

5.1. Вміст пластидних пігментів і морфометричні параметри суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і гумату Калію.....	96
5.2. Екофізіологічні параметри субстрату неперегорілої породи, суданської трави та крес-салату за впливу попелу ТЕС і гумату Калію.....	103
5.2.1. Актуальна кислотність субстрату неперегорілої породи за впливу попелу ТЕС, гумату Калію та вирощування суданської трави.....	103
5.2.2. Вміст Плюмбуму та Хрому в субстраті неперегорілої породи та органах суданської трави за впливу попелу ТЕС і гумату Калію.....	105
5.2.3. Вміст Кальцію, Калію та Фосфору в субстраті неперегорілої породи та органах суданської трави за впливу попелу ТЕС і гумату Калію.....	110
5.2.4. Вміст Нітрогену та Карбону в субстраті неперегорілої породи та органах суданської трави за впливу попелу ТЕС і гумату Калію.....	116
5.2.5. Вміст пластидних пігментів і морфометричні параметри суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і гумату Калію.....	124
5.2.6. Біотестування потенційного алелопатичного впливу суданської трави з використанням крес-салату.....	134
ВИСНОВКИ.....	139
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	142
Додатки.....	169

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Car T – сумарний вміст каротиноїдів (каротинів і ксантофілів)

Chl *a* – хлорофіл *a*

Chl *b* – хлорофіл *b*

N-NH<sub>4</sub> – амонійний Нітроген

N-NO<sub>2</sub> – нітритний Нітроген

N-NO<sub>3</sub> – нітратний Нітроген

Pheo *a* – феофітин *a*

A – антоціани

ВГ – вермигумат

ВП – висота пагону

ВС – висота стебла

ГДК – гранично допустима концентрація

ГК – гумат Калію

ГПР – гірничопромисловий район

ГР – гумінові речовини

ДК – довжина коренів

ЕПН – енергія проростання насіння

КВП – кам'яновугільний попіл

МК – маса коренів

ПЛ – площа листків

СН – схожість насіння

ТЕС – теплоелектростанція

ФС – фенольні сполуки

ЦЗФ – центральна збагачувальна фабрика



## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Породні відвали вуглевидобутку негативно впливають на здоров'я людей і стан екосистем прилеглих територій, оскільки виділяють у довкілля високі концентрації токсичних хімічних елементів і їх сполук [227; 219]. Під час горіння цих відвалів у повітря виділяються гази, які спричиняють отруєння біоти, утворення кислотних дощів, руйнування озонового шару та підсилення парникового ефекту [144; 225; 133]. Вони також впливають на стан економіки регіону і розвитку соціуму, оскільки розташовані поблизу великих населених пунктів на територіях з високою комерційною цінністю в якості земель потенційного сільськогосподарського чи промислового призначення [26].

Рекультивация антропогенно порушених територій з утворенням гумусового шару та рослинного покриву призводить до нейтралізації чи іммобілізації токсичних сполук [181; 129], однак субстрати породних відвалів Червоноградського ГПР (гірничопромислового району) пригнічують ріст більшість рослин внаслідок низького рН, провальної водопроникності, несприятливих мікрокліматичних умов, дефіциту макроелементів та високих концентрацій токсичних хімічних елементів і їх сполук [5; 161; 15; 48]. За сучасних економічних умов оптимальним способом рекультивации породних відвалів є фітомеліорація з використанням стійких і водночас швидкорослих рослин, які утворюють значну біомасу. Для підвищення ефективності фітомеліорації, а також збільшення видового асортименту фітомеліорантів проводять спеціальну підготовку субстратів, яка полягає у нейтралізації кислотності за допомогою промислових відходів з лужною реакцією, внесенні меліорантів, добрив і використанні стимуляторів росту рослин [142].

В періодичній науковій літературі є чимало праць про застосування кам'яновугільного попелу теплоелектростанцій (ТЕС) [183; 213; 148] і

гумінових препаратів для зниження фітотоксичності [46; 63], а також використання рослин роду *Sorghum* для фітомеліорації породних відвалів гірничовидобувної промисловості [216; 169; 142]. Однак не знайдено публікацій щодо оцінки ефективності використання попелу ТЕС разом з гуміновими препаратами.

Вирішення цих актуальних питань стало підставою для виконання досліджень за темою дисертації.

**Мета і завдання досліджень.** З'ясування впливу кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС і гуматів Калію (вермигумату та «ГКВ-45») на фітостресорність субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» з використанням суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) в якості біотесту.

Для досягнення мети поставлені наступні завдання:

1. Виміряти морфометричні параметри суданської трави за росту на субстратах породного відвалу з додаванням попелу ТЕС і гуматів Калію.
2. Оцінити вплив попелу ТЕС і гуматів Калію на вміст пластидних пігментів у листках суданської трави за росту на субстратах породного відвалу.
3. Виявити вплив субстратів породного відвалу з додаванням попелу ТЕС і гуматів Калію на вміст фенольних сполук в рослинах суданської трави.
4. Виміряти актуальну кислотність субстратів породного відвалу за впливу попелу ТЕС і гумату Калію.
5. Визначити вміст важких металів і макроелементів у субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС і гумату Калію.
6. Оцінити вплив попелу ТЕС і гумату Калію на вміст важких металів і макроелементів у органах суданської трави за росту на субстратах породного відвалу.
7. Провести кореляційний аналіз між параметрами субстратів породного відвалу та рослин суданської трави.

*Об'єкт дослідження* – субстрати породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» за впливу кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС і гуматів (вермигумату та «ГКВ-45») Калію.

*Предмет дослідження* – зміна фітостресорності (негативного впливу на екофізіологічні параметри рослин) субстратів породного відвалу за впливу попелу ТЕС і гуматів Калію з використанням суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) в якості біотесту.

**Методи дослідження.** Актуальну кислотність (рівень рН) субстратів вимірювали на іонометрі «ЭВ-74» [91]. Визначення рухомих форм важких металів у попелі Добротвірської ТЕС і субстратах проводили в буферних ацетатно-амонійних екстрактах з рН 4,8, а валового вмісту в рослинному матеріалі в екстрактах, одержаних мокрим озоленням нітратною кислотою. Далі вміст Плюмбуму і Хрому у відповідних екстрактах вимірювали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С115 М1 [82].

Вміст амонійного Нітрогену в субстратах для вирощування рослин визначали в екстрактах, екстрагованих 1 М розчином КСІ фотоколориметрично на КФК-3 за реакцією з реактивом Неслера. Вміст нітратного Нітрогену визначали фотоколориметрично методом Грандвалія-Ляжу [78]. Вміст нітритного Нітрогену визначали фотоколориметрично за реакцією з реактивом Гріса [3]. Валовий вміст Нітрогену в рослинному матеріалі визначали фотоколориметрично за реакцією з реактивом Неслера після мокрого озолення згідно методу Піневич-Куркаєвої [81]. Екстракти для визначення рухомих форм Калію, Кальцію і Фосфору в субстраті одержували методом Кірсанова, а валового вмісту цих макроелементів у рослинному матеріалі мокрим озоленням сульфатною кислотою за Піневич в модифікації Куркаєва. Вміст Фосфору в екстрактах вимірювали фотоколориметричним методом на фотоколориметрі КФК-3 за методом Деніже, а Калію і Кальцію методом полум'яної фотометрії на апараті ПФМ [3].

Біохімічні параметри суданської трави, яку вирощували в умовах

чашок Петрі визначали після 21, мікрокосмів – 68, а в напівпольових умовах – 95 діб росту.

Вміст хлорофілів у листках рослин, які вирощували в чашках Петрі та мікрокосмах визначали в етанольних екстрактах. Оптичну густина вимірювали на фотоколориметрі КФК-3 за довжини хвиль 665 нм для хлорофілу *a* та 649 нм для хлорофілу *b*. Вміст цих пігментів обчислювали за формулами Ветштейна [28]. Вміст пігментів фотосинтезу в листках суданської трави, яку вирощували в напівпольових умовах визначали згідно методики Ліхтенталера. Оптичну густина етанольних екстрактів вимірювали на фотоколориметрі КФК-3 за довжини хвиль 665 нм для хлорофілу *a*, 649 нм для хлорофілу *b* і 470 нм для каротиноїдів (суми каротинів і ксантофілів). Вміст цих пігментів обчислювали за формулами Ліхтенталера [168]. Феофітин *a* визначали після підкислення етанольних екстрактів 2 краплями 10 % розчину HCl. Їхню оптичну густина вимірювали за довжини хвилі 665 нм та обчислювали вміст цього пігменту згідно [230].

Сумарний вміст фенольних сполук визначали паралельно в тих самих екстрактах, що й хлорофіли. Оптичну густина вимірювали на фотоколориметрі КФК-3 за довжини хвилі 725 нм. Кількісний вміст фенольних сполук обчислювали згідно даних оптичних густин зразкових розчинів, які готували з пірокатехіну [43].

Антоціани визначали в екстрактах після визначення хлорофілу та фенольних сполук. Для цього в них розчиняли 1 % хлоридної кислоти. Їх оптичну густина вимірювали за довжини хвилі 546 нм [38].

Вміст органічного Карбону в субстратах і рослинному матеріалі визначали фотоколориметричним методом на КФК-3 після двох діб мокрого озолення матеріалу в хромовій суміші за кімнатної температури методом Нікітіна в модифікації Антонової і співавторів [2].

Для біотестування здатності суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* знижувати фітостресорність субстрату породного відвалу ЦЗФ

«Червоноградська» використовували насіння і проростки крес-салату *Lepidium sativum* L. [82].

Для одержаних нами первинних даних обчислювали середнє арифметичне, стандартне відхилення, статистичну достовірність відмінностей між варіантами визначали за *t*-критерієм Стюдента, а для кореляційного аналізу обчислювали коефіцієнти кореляції Пірсона [59].

**Наукова новизна одержаних результатів.** Уперше досліджено сумісність та ефективність одночасного використання кам'яновугільного попелу ТЕС з гуматами Калію для меліорації породних відвалів вуглевидобутку. Встановлено, що застосування попелу в поєднанні з гуматами Калію ефективніше, ніж внесення тільки одного з цих меліорантів. Зокрема виявлено яскраво виражену синергетичну дію попелу Добротвірської ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» на здатність підвищувати рН субстрату сіро-чорної породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська», знижувати у ньому вміст рухомих форм Плюмбуму, а також збільшувати біомасу коренів і вміст хлорофілу *a* в листках суданської трави за росту на субстратах цієї породи. Також знайдено високий вміст рухомих амонійних сполук в субстраті сіро-чорної породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська», що робить непотрібним його підживлення азотними добривами. Крім того, проведено кореляційний аналіз вмісту рухомих форм макроелементів і важких металів у субстраті породного відвалу Червоноградського ГПР з їх валовим вмістом в органах рослин з  $C_4$  типом фотосинтезу (суданської трави) за впливу контрольованих експериментальних умов.

**Практичне значення одержаних результатів.** Адаптовані для субстратів породних відвалів вуглевидобутку та попелу ТЕС методики визначення хімічних елементів використовують студенти кафедри фізіології та екології рослин біологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка для виконання та написання курсових і магістерських робіт. Рекомендації щодо сумісного внесення кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС і гуматів Калію та

вирощування суданської трави для меліорації породних відвалів Центральної збагачувальної фабрики використовує ПАТ «Львівська вугільна компанія».

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертаційної роботи здобувач отримав самостійно. Протягом 2014-2017 років автор особисто виконав основний обсяг експериментальної частини дисертації, статистичну обробку результатів, провів підбір та опрацювання літературних джерел. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, в дисертації використані лише ті ідеї та положення, які є результатом особистої праці здобувача. Права співавторів публікацій при написанні дисертації та автореферату не порушено.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 12 наукових праць, у тому числі 6 статей, з яких: 5 у фахових виданнях України, які входять до переліку МОН України (журнал Львівського національного університету ім. І. Франка «Біостудії/Studia Biologica, Вісник Львівського університету. Серія: біологічна, Вісник Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича «Біосистеми», Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Л. Українки. Серія біологічна; Науково-практичний журнал «Екологічні науки» Міністерства екології та природних ресурсів України та Державної екологічної академії післядипломної освіти); 1 в іноземному виданні «Trajectoriâ Nauki/Path of Science», яке входить до міжнародних наукометричних баз даних «CrossRef», «Copernicus», «DOAJ», «J-Gate», а також 6 тез доповідей.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи було висвітлено у доповідях на XII, XIII, XV Міжнародній науковій конференції студентів і аспірантів «Молодь і поступ біології» (Львів, 2015-2017, 2019 рр.), XI і XII Науковій конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку» (Шацьк 2015, 2016 рр.) і 65-й науково-технічній конференції

«Наукові основи підвищення продуктивності та біологічної стійкості лісових та урбанізованих екосистем» (Львів, 2015 р.)

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано протягом 2014-2017 років під час навчання в аспірантурі на кафедрі фізіології та екології рослин біологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка в межах держбюджетної наукової теми «Використання відходів промислових підприємств Львівської області та бактеріальних препаратів при фітомеліорації породних відвалів вугільних шахь» (№ державної реєстрації 0113U001898).

**Структура та обсяг дисертації.** Обсяг основного змісту кандидатської роботи становить 112 сторінок машинописного тексту. Робота складається зі вступу, огляду літератури, опису методів досліджень і трьох експериментальних розділів, що містять 35 таблиць і 27 рисунків, висновків і списку використаних джерел (237 найменувань). Загальний обсяг дисертації разом зі списком літератури становить 168 сторінок.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1. Вплив породних відвалів вуглевидобутку на довкілля

Значні площі суходолу планети займають породні відвали вугільної промисловості. За формою розрізняють конусні, хребтові, секторні і плоскі відвали. Високі відвали часто насипають терасами. Териконами зазвичай називають конусоподібні відвали [67].

Порода відвалів містить токсичні метали та металоїди, оскільки її вилучають з глибини кілька сотень чи тисяч метрів [123; 152]. Сульфатна кислота утворена життєдіяльністю бактерій, а також взаємодією діоксиду Сульфуру, що виділяється з породних відвалів кам'яновугільних шахт з атмосферною вологою знижує рН свіжовідсипаної нейтральної породи до рівня 2-4, а також утворює рухомі сульфати з токсичними металами і металоїдами. Випадання дощів на високі відвали із стрімкими схилами та провальною водопроникністю, спричиненою крупнофракційним складом призводить до розмивання порід та підсилення забруднення довколишніх ґрунтів і водойм токсичними стоками [158; 227; 92; 219].

Через вимивання, видування чи горіння породних відвалів вугільних шахт відбувається забруднення не лише прилеглих екосистем, а й довколишніх населених пунктів [26]. Крім того, високі відвали зі стрімкими схилами зазнають різких перепадів інсоляції та вітрового режиму, що формує несприятливий мікроклімат для розвитку рослинного покриву [15].

За видобутку однієї тисячі тонн вугілля на поверхню підіймають 110-150 м<sup>3</sup> відвальних порід, а кожну тисячу тонн збагачення вугілля супроводжує складування 100-120 м<sup>3</sup> відходів. Щорічно з поверхні одного відвалу видувається близько 400 т породного пилу і вимивається близько 8



т солей. Процеси пилоутворення і газовиділення шкідливих речовин в атмосферу посилюються у багато разів при горінні такого відвалу [50]. У процесі горіння породних відвалів кам'яновугільних шахт зростає інтенсивність виділення газів, які підсилюють парниковий ефект, руйнують озоновий шар, отруюють біоту, утворюють смог і кислотні дощі [144; 225; 133].

Причиною самозаймання відвалів є реакція піриту  $\text{FeS}_2$  із розчиненим у воді киснем, що підсилюється за присутності аеробних тіонових бактерій *Thiobacillus ferrooxidans* і призводить до повного розкладання піриту. Екзотермічна реакція зумовлює вивільнення елементного Сульфуру, виділення метану та сірководню, що за достатніх температур і концентрацій призводить до їх самозаймання і підпалу вуглевмісної породи [67; 44; 15]. Загалом породні відвали змінюють ландшафт, знижують біорізноманіття, порушують функціонування автохтонних екосистем і забруднюють довкілля. Для зниження негативного впливу відвалів на довкілля в районі їх розташування розробляють екологічні проекти нетрадиційного використання, що спрямовані на використання поверхні для розміщення об'єктів соціальної інфраструктури та різних видів виробничо-господарської діяльності [26].

## **1.2. Фітостресорність і біотестування породних відвалів вуглевидобутку**

Стрес-факторами породних відвалів кам'яновугільних шахт для рослин є низьке значення рН, високий вміст рухомих форм токсичних металів і металоїдів, несприятливі мікрокліматичні умови, дефіцит вологи і поживних макроелементів [5; 152; 163].

Термін «фітотоксичність» утворено від давньогрецьких слів «φυτόν» – рослина і «τοξικός» – отруйний [39; 40]. В енциклопедії [140] англійське слово *phytotoxicity* означає «пошкодження рослин, спричинені впливом

деяких токсичних стресорів», а в словнику [87] російське слово *фитотоксичность* означає «здатність хімічних речовин пригнічувати ріст і розвиток рослин».

Однак цей термін також часто вживають для позначення впливу сукупності стрес-факторів на рослинний організм, якими крім токсичних речовин субстрату можуть бути ще й дефіцит доступної води і поживних елементів, несприятливий гранулометричний склад і т.д. Зокрема, в австрійській публікації [118] термін *phytotoxicity* визначили, як «затримка проростання насіння, пригнічення росту рослин чи будь-який інший несприятливий вплив на рослини, викликаний певними речовинами фітотоксинами, або умовами вирощування».

Для позначення негативного впливу сукупності стрес-факторів різних компонентів середовища, в т.ч. і субстрату породних відвалів на фізіологічні процеси рослин ми запровадили [101] і вживаємо в цьому дослідженні термін *фітострессорність*, щоб не плутати із впливом тільки токсичних речовин. Його вживання виправдане тому, оскільки є окремі терміни *фітострес* та *стрессорність*, які означають стрес рослинного організму і властивість фактору чи сукупності факторів спричиняти стрес відповідно [125; 16].

Для оцінки і прогнозу антропогенного впливу на довкілля та розробки заходів щодо його зниження проводять їх *моніторинг* – систему збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття заходів щодо зниження негативного впливу на довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки. Моніторинг окремих компонентів довкілля із використанням фізико-хімічних методів вимірювання не відображає більшості аспектів взаємодії факторів природного середовища із факторами, які прямо чи опосередковано спричинені діяльністю людини і тому доцільно проводити моніторинг стану біоти – *біомоніторинг*, з використанням спеціально

вибраних живих організмів [68].

Методи біомоніторингу ґрунтуються на визначенні *тест-ознак*, якими називають закономірно виниклі реакції живих організмів на вплив сукупності зовнішніх факторів довкілля. За характером дослідження їх поділяють на активний біомоніторинг – *біотестування*, який полягає у визначенні впливу дослідних факторів на спеціально вибрані організми – **біотестери** в стандартних (експериментальних) умовах із реєстрацією їхніх тест-ознак та пасивний – *біоіндикацію*, який полягає у реєстрації тест-ознак живих організмів – *біоіндикаторів*, що перебувають на території дослідження без прямого втручання людини чи з прямим втручанням людини до початку біомоніторингу. Біотестування за допомогою рослин називають *фітотестуванням*, біоіндикацію – *фітоіндикацією*, а рослини, які використовують для цих методів біомоніторингу – *фітотестерами* та *фітоіндикаторами* відповідно. Фітоіндикація неефективна для біомоніторингу породних відвалів, оскільки характеризує лише місце зростання рослин, а на первинних етапах формування субстрату породних відвалів рослинність фактично відсутня [17;18; 61; 13].

Для прогнозу впливу меліоративних заходів на рівень шкідливості породних відвалів кам'яновугільної промисловості можна застосувати *фізичне моделювання*, яке полягає у створенні матеріальної спрощеної копії реального об'єкта – *фізичної моделі* [20]. Фітотестування субстратів породних відвалів є водночас методом біомоніторингу та фізичним моделюванням, оскільки його проведення в лабораторних, напівпольових і польових умовах дозволяє робити прогнози щодо ефективності перспективних меліоративних заходів [13].

### 1.3. Вплив Плюмбуму та Хрому на біоту

Розвиток промисловості сприяв виведенню важких металів з природного геологічного колообігу і їх включення у біогеохімічний колообіг [72]. Акумуляція живими організмами та переміщення ланцюгом живлення становить загрозу і для здоров'я людини [209]. В літературі здебільшого описано про вплив окремих металів на один чи кілька параметрів рослинного організму. Однак, актуально досліджувати сумісний вплив різних важких металів, оскільки в довкіллі містяться різні хімічні елементи [199].

Ряд важких металів стає більш конкретним, якщо визначення сформулювати таким чином: *Важкі метали – це елементи з металічними властивостями, які мають атомну масу вище 40, густину вище 5 г/см<sup>3</sup> і не відносяться до радіоактивних елементів.* До важких металів належать і мікроелементи, які з одного боку необхідні для рослинних організмів, а з іншого за підвищених концентрацій у довкіллі негативно впливають на їх життєдіяльність [19].

Визначення хімічного складу рослин дозволяє встановити критерії індикаторної здатності видів рослин, а також можливість використовувати їх у якості високочутливих біоіндикаторів і біомоніторів рівнів забрудненості ґрунтів важкими металами [37].

**Плюмбум (Pb)** широко розповсюджений у довкіллі, але він не є есенціальним хімічним елементом для рослинного організму. Цей важкий метал потрапляє у довкілля з автомобільних вихлопних газів, неякісних добрив, внаслідок виробництва і використання іграшок, фарб, кераміки, скла, елементів живлення. Він токсичний для людей та біоти, а його підвищені концентрації вражають нервову систему [217; 195]. В Україні гранично допустима концентрація рухомих форм Плюмбуму в ґрунтах складає 6 мг/кг [30]. Серед важких металів він найменш рухомий. Присутній у ґрунті найчастіше у формі Pb<sup>2+</sup>. Надходження його в

екосистеми значно переважає виніс. Характер локалізації цього важкого металу в ґрунті здебільшого пов'язаний з нагромадженням органічної речовини. Поглинання Плюмбуму рослинами – пасивне, а в тканинах він накопичується на стінках клітин. Його вміст у стеблах нижчий ніж у коренях, а в зерні нижчий, ніж у стеблах і листках [72].

Також відомо, що акумуляція Плюмбуму рослинами підвищує поглинання Мангану рослинами на фоні зниження поглинання Натрію, Кальцію, Фосфору, Магнію, Цинку, Феруму, Купруму та інших хімічних елементів. Дефіцит цих макроелементів спричиняє порушення синтезу проліну та водорозчинних білків. Також Плюмбум пригнічує активність ферментів внаслідок взаємодії з їхніми сульфогідрильними та карбоксильними групами. Присутність Плюмбуму в рослинах призводить до утворення вільних радикалів та активних кисневих молекул, які спричиняють оксидативний стрес. Цей важкий метал знижує інтенсивність фотосинтезу внаслідок пошкодження ультраструктури хлоропластів, пригнічення синтезу хлорофілів, пластохінону і каротиноїдів, блокування транспорту електронів, пригнічення активності ферментів циклу Кальвіна та дефіциту діоксиду Карбону, що зумовлений порушенням функціонування продихів. Візуальними неспецифічними симптомами фітотоксичності Плюмбуму є пригнічення проростання насіння, затримка росту (особливо коренів) та хлороз листків [207; 217].

**Хром (Cr)** є одним з найпоширеніших важких металів у земній корі, що трапляється в різних мінералах, вулканічних газах і попелі. Сполуки цього металу масово потрапляють у довкілля внаслідок людської діяльності, бо широко застосовуються для створення корозостійкого покриття металевих виробів, дублення шкіряних виробів, моріння деревини та фарбування текстилю [130]. Також великі кількості Хрому містяться у попелі та газах ТЕС, що спалюють кам'яне вугілля [11].

Хром існує в кількох станах окиснення, але найбільш стійкими і поширеними формами є Cr (0), тривалентний Cr (III) і шестивалентний Cr

(VI). Cr (0) – це металева форма, що виробляється в промисловості і являє собою тверду речовину з високою температурою плавлення, зазвичай використовується для виготовлення сталі та інших сплавів. Сполуки Cr (VI) у вигляді хромату ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ), біхромату ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) та  $\text{CrO}_3$  вважаються найбільш токсичними формами Хрому, оскільки мають високий окисний потенціал, високу розчинність і рухливість у мембранах живих організмів і довкіллі [178]. Шестивалентний Хром є аніоном хромової кислоти і в складі аніону практично не фіксується ґрунтовими колоїдами, оскільки вони несуть переважно негативний заряд, тобто, у біхроматів сильніше виражений ефект електронегативності порівняно з тривалентними сполуками Хрому. Крім того, іони шестивалентного Хрому рухоміші в організмі рослин, ніж його тривалентної форми та здатні утворювати нестійкі комплексні сполуки з білками [12]. Сполуки Cr (III) у формі оксидів, гідроксидів та сульфатів менш токсичні, оскільки відносно нерозчинні у воді, менш рухливі та здебільшого зв'язані з органікою ґрунту та водного середовища [178].

Присутність в ґрунті окисненого Мангану (Mn) легко окиснює Cr (III) до Cr (VI), який залишається в ґрунті довше і є більш токсичною формою Хрому. Fe (II),  $\text{Sr}^{+2}$ , фульвова кислота і низькомолекулярні органічні сполуки можуть перетворювати сполуки шестивалентного Cr у трьохвалентні. Вапнування, а також внесення Фосфору та органічних речовин, помітно знижує токсичність Хрому для рослин на забруднених ним ґрунтах. Також відмічено, що Pb з Cr утворює хромат Плюмбуму, що зменшує рухливість Хрому. Встановлено, що аніони XI групи ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{SeO}_4^{2-}$ ,  $\text{WO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) інгібують поглинання Cr рослинами, а катіони  $\text{Ca}^{2+}$  стимулюють його [11].

Сполуки Cr (III) мають важливе значення для організму тварин і людей. Не доведено необхідності Хрому для рослинного організму, але відмічено стимуляцію їх росту за низьких концентрацій Cr (III), однак ця форма Хрому токсична для рослин і тварин за підвищених концентрацій. В

свою чергу, сполуки Cr (VI) є сильними канцерогенами [130]. Також вони спричиняють захворювання шлунково-кишкового тракту, печінки, нирок і серцево-судинної системи [195]. В Україні гранично допустима концентрація рухомих форм Хрому в ґрунтах складає 6 мг/кг [235].

Хром поглинається кореневою системою у вигляді аніонних комплексів, які виявлені в тканинах рослин і рідинах ксилеми. Виділено три фази поглинання іонів Хрому. Поглинання починається відразу після занурення коренів в розчин з високою швидкістю. Ця фаза триває трохи більше 6 хвилин. Протягом наступної фази, яка триває 8-10 годин, швидкість поглинання поступово знижується. Через 10 годин поглинання Хрому припиняється. Припускають, що в першій фазі проходить чисто фізико-хімічна адсорбція іонів поверхнею коренів. У другій відбувається хімічна взаємодія іонів Хрому з речовинами, які активно його зв'язують (білки, амінокислоти, вуглеводи). У третій фазі можлива подальша взаємодія Хрому з метаболітами, які утворюються корінням з більш-менш постійною швидкістю. Також слід відмітити, що Хром може надходити в рослинний організм не тільки через кореневу систему, а й через листки [12].

#### **1.4. Роль Кальцію, Калію та Фосфору в рослинному організмі**

**Кальцій (Ca)** є незамінним елементом живлення рослин. Його двовалентний іон виконує структурні функції в клітинній стінці та мембранах, а також є антагоністом неорганічних і органічних аніонів у вакуолях і міжклітинним месенджером у цитозолі. Кальцій поглинається кореневою системою з ґрунтового розчину і транспортується ксилемою до пагона. Також він може проникати з коренів через апопласт чи симпласт. У природі дефіцит Кальцію трапляється на ґрунтах з низьким вмістом лужних і лужноземельних металів, а також за присутності мінералів чи органічних решток з кислим рН [229].

**Калій (K)** не є структурним елементом рослинного організму, але приймає участь в осморегуляції, збереженні тургору клітин, активації ферментів, транспорті цукрів, води та поживних речовин, синтезі білків і крохмалю, регуляції активності протоксидів, а також у тропізмах [189; 184].

Іон Калію  $K^+$  є одним з найпоширеніших катіонів у рослинних клітинах, який у великій кількості поглинається кореневою системою. Більшість вищих наземних рослин одержують  $K^+$  прямо з ґрунтового розчину. Відомо, що Калій дуже рухомий в організмі рослин. Він рухається вздовж ксилеми та флоєми до меристемних тканин. Часті міграції трапляються у ксилемі внаслідок швидкого темпу вибіркового виділення Калію судинами ксилеми. Зворотне переміщення Калію з пагонів до коренів через флоему трапляється коли значна кількість поживних речовин рухається до коріння. Цей процес необхідний для забезпечення живлення і росту апікальних ділянок коренів і врівноваження коливань концентрацій Калію, що трапляються в середовищі росту і розвитку коренів [231; 117].

Поглинання  $K^+$  в однорічних культурах досягає свого піку до цвітіння зі зниженням до зрілості, обмежує період доцільності коригування вмісту Калію в ґрунті. Злаковим культурам доцільно забезпечити належну присутність  $K^+$  у ґрунті перед посівом або на етапі раннього росту, а не планувати коригувальні заходи на пізніших етапах онтогенезу. Недостатнє постачання  $K^+$  негативно впливає на репродуктивні органи, тим самим знижуючи врожайність [159].

**Фосфор (P)** є незамінний макроелементом, що визначає ріст і продуктивність рослин. Він входить до складу нуклеїнових кислот, цукрів і ліпідів. Цей макроелемент також бере участь у процесах розвитку рослин як на клітинному, так і на організмовому рівні рослин, а саме в цвітінні, формуванні і проростанні насіння, морфогенезі коренів, пагонів, фотосинтезі, диханні та азотфіксації. В умовах дефіциту цього макроелементу рослини зазнають значних морфологічних, фізіологічних та



біохімічних відхилень [170]. В ґрунтах часто можна спостерігати дефіцит рухомих форм Фосфору, оскільки більша його частина міститься в мінералах материнської породи, осаждена, адсорбована чи зв'язана в складних органічних сполуках [179].

### **1.5. Значення Нітрогену та Карбону для системи ґрунт-рослина**

**Нітроген (N)** є одним з найважливіших макроелементів для всієї біоти, оскільки входить до складу білків. Хоча це головний складник повітря, доступність N є головним лімітуючим фактором для продуктивності наземних екосистем [202].

Нітроген стимулює поглинання макроелементів, зокрема Калію і Фосфору рослинним організмом. Нормальний онтогенез рослин вимагає оптимального забезпечення Нітрогеном. Нестача цього макроелементу пригнічує морфогенез, спричиняє хлороз і зумовлює появу червоних і багряних плям на листках. Зазвичай, перші симптоми дефіциту проявляються на старих листках, а невдовзі починається прискорене старіння молодих листків. Натомість, надлишок Нітрогену спричиняє надмірний приріст вегетативних органів, забарвлює листки в темно-зелений колір, знижує кількість і якість урожаю. Рослини використовують Нітроген, який знаходиться у вигляді аніонів нітрату ( $\text{NO}_3^-$ ) та катіонів амонію ( $\text{NH}_4^+$ ). Їх поглинання з ґрунтового розчину відбувається за допомогою катіонного обміну, коли коріння нагнітають іони  $\text{H}^+$  у ґрунт протонною помпою. Листки рослин теж поглинають і асимілюють N шляхом відновлення  $\text{NO}_3^-$  та  $\text{NH}_4^+$  до амінокислот. В свою чергу, ксилема і флоема стебел беруть активну участь у транспортуванні сполук Нітрогену. Вода і розчинені сполуки N, які рослини поглинули коренями з ґрунтового розчину переміщується ксилемою висхідним потоком від коренів до листя. В свою чергу білки, які синтезувалися рослинним організмом рухаються у флоемі низхідним потоком від листків до коренів [200].

**Карбон (С)** міститься в ґрунтах в органічній та неорганічній формі. Суму цих двох форм називають загальним Карбоном. Слід зазначити, що ґрунт це природне динамічне тіло в інтерфазі «атмосфера-літосфера», яке насичене біотою. Неорганічний Карбон присутній у вигляді різних мінералів і солей з вивітрюваного породного покриву. Органічний Карбон це складова ґрунтової органіки, яка становить 45-60 % його маси. Ґрунти є найбільшим сховищем органічного Карбону в наземних екосистемах, що містять Карбону втричі більше, ніж рослинність, яку вони підтримують. Кількість, якість і динаміка ґрунтової органіки є визначальними параметрами нормального функціонування наземних екосистем [215; 165]. Крім того, ґрунти є акумуляторами антропогенних викидів діоксиду Карбону, які загрожують стабільності світового клімату, що робить актуальними практичні дослідження оптимізації та підсилення зв'язування Карбону в органічній речовині ґрунту [194; 116].

Відомо, що зелені органи рослин, що містять хлорофіл запасують енергію сонячного світла у вуглеводах, які вони синтезують з води та вуглекислого газу [184]. Більшість Карбону, що використовується судинними рослинами, не використовується на місці його зв'язування, а транспортується до інших метаболічно активних ділянок. Утворені органічні сполуки рухаються до флоєми, що використовує один або комбінацію пасивних та активних механізмів завантаження, які потребують різних градієнтів концентрації цукрів у мезофілі та змінюються в залежності від величини симпластичного потоку між клітинами судин і коренів [110].

## **1.6. Вплив кам'яновугільних ТЕС на довкілля і використання їх попелу**

Теплові електростанції (ТЕС), що спалюють кам'яне вугілля, виділяють в атмосферу оксиди Карбону, Сульфору та Нітрогену, які

підсилюють парниковий ефект і призводять до утворення кислотних дощів, а також токсичного і навіть слаборадіоактивного пилу та аерозолей [108; 186; 232].

Дрібнодисперсну фракцію кам'яновугільної золи з розміром частинок <1 мм, які за впливу повітряних мас невеликої сили здатні переноситися на значні відстані називають *кам'яновугільним попелом* (англ. «coal fly ash»). Цей попіл затримується повітроочисним обладнанням, а у випадку його відсутності чи низької ефективності надходить в атмосферу через димоходи. Вилучений з повітроочисних фільтрів попіл насипають на відвали разом зі шлаком та іншими фракціями золи [213].

При згорянні органічної речовини кам'яного вугілля відбувається випаровування металів, частина з яких конденсується в аерозолях і випарах. Інша частина випаровується з металу та конденсується на частинках летючого попелу. Оскільки дрібні частинки мають найбільшу поверхню, на них відбувається конденсація і трансформація металевих випарів. У зв'язку з цим дрібніший кам'яновугільний попіл, який не затримали пилові фільтри, що надходить з димовими газами в повітря, містить більше перелічених елементів, ніж середня за складом зола вихідного палива. При цьому концентрація мікроелементів в кам'яновугільному попелі зростає на 1-2 степені [55].

Значні території поблизу ТЕС займають відвали твердих відходів, насипані зі шлаків і золи, які залишилися після спалювання кам'яного вугілля, що містять рухомі форми токсичних металів і металоїдів, які за вимивання опадами чи видуванні вітром забруднюють ґрунти і водойми [151]. Зокрема, на відвалі Добротвірської ТЕС, що розташована у Львівській області накопичено більше 10,6 млн т золи та шлаку [237]. На території та поблизу відвалів виявлено перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів, а також перевищення природного радіоактивного фону через наявність радіоактивних ізотопів [89; 186].

Відомо, що кам'яновугільний попіл здатний поглинати оксиди Сульфуру та Нітрогену, що дозволяє його застосовувати в очисних системах біля основного місця утворення [130]. Його також додають у розчини для будівництва будинків, доріг і виготовлення деяких сортів кераміки [156; 104; 35; 224]. Крім того, відвали кам'яновугільного шлаку і золи можуть бути джерелом різноманітних хімічних елементів, оскільки кам'яне вугілля є природним сорбентом, що містить домішки багатьох цінних елементів, включно з рідкоземельними і дорогоцінними металами. Після його згоряння вміст зольних елементів зростає у 5-6 разів і може мати промислове значення [94].

Кам'яновугільний попіл має здебільшого лужне значення рН, що зумовлено присутністю лужних (K, Na, Li) і лужноземельних (Ca, Mg, Sr) металів, які залишаються після згоряння кам'яного вугілля [153; 183; 192; 203]. Внаслідок лужного середовища більшість токсичних металів (Pb, Cr, Al) і металоїдів (Ag, Se), які містяться в попелі знаходяться у малорухомій формі. Він також часто містить мікроелементи Бор, Селен і Молібден [113; 203], а обробка ґрунтів попелом підвищує рН ґрунтового розчину, що призводить до підвищення рухомості Фосфору [204]. В Індії кам'яновугільний попіл використовують в якості добрива, якщо за його додавання не відбувається перевищення допустимих норм рухомих форм токсичних металів і металоїдів у ґрунті [111; 157; 192; 205; 213; 224]. Однак здебільшого попіл використовують для зниження кислотності та пов'язаної з нею фітотоксичності відвалів гірничої промисловості, які мають високі концентрації рухомих форм токсичних металів і металоїдів, що знижуються з підвищенням рН ґрунтового розчину [120; 148; 183; 213; 216; 224; 143; 182].

## 1.7. Роль гумінових речовин у системі ґрунт-рослина та використання препаратів на їх основі

*Гумінові речовини (ГР)* – це високомолекулярні сполуки, які утворюються, трансформуються і розпадаються на проміжних стадіях процесу мінералізації органічної речовини. Їхній синтез має стохастичний характер, що зумовлює нестехіометричний склад і нерегулярну гетерогенну структуру. ГР характеризуються полідисперсністю, нерегулярністю складу та поліфункціональністю внаслідок поєднання в молекулярній структурі ароматичного ядра і гідрофільної периферії. Вони хімічно активні, але досить стійкі до розкладання мікроорганізмами. ГР широко розповсюджені в природі, зокрема вони знаходяться в ґрунтах та осадових відкладах. Крім, того гумінові речовини є макрокомпонентами гумусу, сапропелю, торфу, сланців і бурого вугілля [36; 127].

Після вдосконалення аналітичних методів було виділено ряд нових фракцій і зроблено спроби відокремити гумінові речовини від інших компонентів ґрунтової органіки [122].

Утворення і накопичення ГР є найприроднішим і найбільш термодинамічно-стійким способом збереження органічних речовин в біосфері. Гумінові речовини є кінцевим продуктом специфічного біосинтезу. У гумінових речовинах міститься зв'язана фотосинтезом та іншими шляхами сонячна енергія, яка значною мірою зумовлює активність біохімічних процесів, що протікають в біокосних тілах. ГР біокосних тіл здатні концентрувати в своєму складі Нітроген і поступово вивільняти у вигляді різноманітних хімічних сполук. Гумінові речовини є не тільки джерелами елементів живлення рослин і фізіологічно активних речовин, але й регуляторами найважливіших фізико-хімічних і біологічних властивостей ґрунту, що зумовлюють сприятливість його водно-повітряних і поживних властивостей для рослин [77].

**Гумінові кислоти** – це фракція гумінових речовин, яка нерозчинна у воді з  $\text{pH} < 2$ , але розчинна за його вищих значень. Гумінові кислоти мають забарвлення від темно-коричневого до чорного кольору. Довгий час цими кислотами вважали тільки важкі сполуки з великою кількістю молекул. Однак, нещодавні дослідження показали, що це можуть бути і сполуки менших молекул [122]. Типова гумінова кислота може складатися з шести вуглецевих ароматичних кілець на основі ди- або тригідроксильних фенолів, що зв'язані з О-, -NH-, -N-, -S- і містити гідроксильну ОН- чи хінонну ( $\text{O}^- \text{C}_6\text{H}_4\text{-O}^-$ ) групу. Ці кислоти мають циклічну структуру, високу молекулярну масу, довгі ланцюги та активну карбоксильну (-COOH) і гідроксильну (-OH) групи. Активні групи гумінових кислот зв'язують аніони та катіони в залежності від рН середовища [109].

**Фульвові кислоти** це фракція гумінових речовин, яка розчинна у воді за всього діапазону значень рН. Ці речовини змінюють забарвлення в залежності від кислотності середовища. За дуже сильної кислотності вони солом'яно-жовтого кольору. Коли рН зростає до 3 вони стають помаранчевими і бордовими за його подальшого зростання. Здебільшого вважають, що фульвові кислоти мають меншу молекулярну масу, ніж гумінові. Однак немає одностайних стандартів розрізнення ГР, що ґрунтуються на молекулярній масі [122]. Фульвові кислоти є складними високомолекулярними сполуками, що складаються з ароматичних гідроксидних карбонових кислот. Ці кислоти утворюються з багатьох різних джерел, але вони є незамінним компонентом органічної частини ґрунту, які необхідні для повноцінної родючості ґрунтів. Також фульвові кислоти є біологічно-активними речовинами, що позитивно впливають на кількість і якість врожаю, фізико-хімічні та біологічні характеристики ґрунту. Завдяки хелатним властивостям фульвові кислоти утримують та вивільняють іони поживних речовин згідно потреб рослинного організму [139].

*Гумін* – це нерозчинний у воді за будь яких значень рН залишок гумінових речовин. Про гумін відомо дуже мало. Це найдавніша з трьох фракцій і знаходиться в точці колообігу Карбону, де рослинні рештки перетворюються на нескам'янілий осад. На гумін припадає більше половини органічного Карбону ґрунтів, але ця речовина мало досліджена через її нерозчинність за класичних методів виділення. Деякі науковці стверджували, що недоцільно виділяти гумін в якості окремої фракції. Також на початку 90-х років вважали, що нерозчинність гуміну може бути пов'язана з дуже тісним зв'язком з мінеральною речовиною в ґрунті і що це може бути просто артефактом процесу фракціювання. Нещодавні дослідження комплексної екстракції гуміну показали, що він складається з рослинних та мікробних компонентів на дрібнодисперсній глинистій матриці [122].

Слід зазначити, що одержані різними способами з різної сировини препарати на основі гумінових речовин часто називають «гумати», що спричиняє плутанину і призводить до їхнього неправильного застосування [52]. Препарати на основі гумінових речовин позитивно впливають на структуру, водно-повітряний режим, обмінну катіонну ємність, буферність щодо рН і вміст рухомих форм макроелементів [122]. Зокрема, відмічено стимулюючу дію гумату Натрію на морфогенез листків рослин. Роль гумінової кислоти в сприянні морфогенезу повністю невизначена, але дослідниками запропоновано кілька пояснень, такі як підвищення проникності клітинної мембрани, транспортування та доступність мікроелементів, поглинання поживних речовин, стимулювання проростання та життєздатності насіння, подовження корневих клітин, процесів дихання і фотосинтезу. Позитивний вплив ГР на онтогенез рослин описано в багатьох дослідженнях і тому гумати часто є частиною різних препаратів для стимуляції росту рослин [52; 127]. Вони також зв'язують важкі метали в малорухомі комплексні сполуки, що перешкоджає їх міграції ланцюгом живлення [180; 226; 112; 206].

Завдяки здатності гумінових препаратів зв'язувати важкі метали, підвищувати рухомість поживних макроелементів та покращувати фізико-механічні властивості субстратів їх застосовують для меліорації фітостресорних субстратів. Зокрема, виявлено збільшення значень морфометричних параметрів рослин вівса, вирощеного на субстраті породних відвалів, оброблених гуматом. Гумінові препарати у вигляді суспензій здатні збагачувати субстрати відвалів поживними речовинами, оскільки частинки суспензії поглинаються дрібними фракціями породи, накопичуються на стику граней більших фракцій і затримуються кореневою системою рослин [46; 63].

### **1.8. Самозаростання та фітомеліорація породних відвалів вуглевидобутку**

Утворення ґрунту з гумусовим шаром та рослинним покривом знижує негативний вплив субстратів забруднених антропогенною діяльністю через взаємодію полютантів із компонентами системи ґрунт-рослина, але без втручання людини воно триває десятки і навіть сотні років [181; 129].

Формування рослинності відвалів Червоноградського ГПР залежить від фізико-хімічних властивостей субстрату, мікроклімату місцевості та ступеня деструкції девастованого ландшафту [29].

На відвалах Червоноградського ГПР трапляються мохи родин *Polytrichaceae* (*Polytrichum piliferum* Hedw., *P. juniperinum* Hedw.) і *Leucobryaceae* (*Campylopus introflexus* (Hedw.) Brid.). Їх поширення значною мірою пов'язане з рекультиваційними заходами – засипання шахтних порід піщаними ґрунтами. Автохтонний вид *Polytrichum piliferum* є прямим конкурентом адвентивного виду моху *Campylopus introflexus*, їхні екологічні ніші дуже подібні, але не тотожні. *Polytrichum piliferum* поширюється підземними ризоїдами і тому має переваги на рухомих



субстратах (пісковиках, кам'янистих розсипах), тоді як *Campylopus introflexus* розмножується переважно наземними виводковими пропагулами здебільшого на осілих, збагачених органікою пісках, використовуючи ресурси нового середовища, недоступні для аборигенних видів, проявляє підвищену конкурентну спроможність, істотно впливає на розвиток рослинних угруповань і гомеостаз екосистеми [62].

Загалом, на нерекультивованих породних відвалах шахт Червоноградського ГПР спочатку відбувається самозаростання деревними породами-піонерами, переважно за участі берези повислої *Betula pendula* Roth., осики *Populus tremula* L. та сосни звичайної *Pinus sylvestris* L. Згодом під наметом дерев поступово формуються трав'яні та чагарникові угруповання. При заростанні породних відвалів Червоноградського ГПР не спостерігається повного домінування одного виду – рослинність фрагментарно вкриває породні відвали шахт та швидше заселяє північні схили [29].

Піонерними рослинами є види, які володіють широкою еколого-фітоценотичною амплітудою, їм властиві ксероморфні ознаки – потужна коренева система, що глибоко проникає у ґрунт, подушкоподібна надземна частина або прикоренева розетка листків, опушення або восковий наліт на листках і стеблах [15].

На субстратах нерекультивованих відвалів Червоноградського ГПР у нижніх частинах схилів північної і східної експозиції утворюються природні угруповання *Betula pendula* – *Calamagrostis epigeios* – *Poa pretensis*, *Populus tremula* – *Calamagrostis epigeios*, *Betula pendula* – *Populus tremula* – *Calamagrostis epigeios* – *Achillea millefolium* – *Chamaerion angustifolium*. На пологих схилах нерекультивованих субстратів відвалів формуються мікроасоціації *Betula pendula* – *Populus tremula* – *Pinus sylvestris* – *Calamagrostis epigeios*, *Betula pendula* – *Populus tremula* – *Pinus sylvestris* – *Polytrichum commune*. На субстратах перегорілої і неперегорілої породи верхніх плато нерекультивованих відвалів утворюються

мікроасоціації *Pinus sylvestris* – *Calamagrostis epigeios*, *Betula pendula* – *Populus tremula* – *Calamagrostis epigeios* [8].

Також у літературі описане самозаростання породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» вербою козячою *Salix caprea* L. та акацією білою *Robinia pseudoacacia* L. [24].

Еволюція угруповань спрямована на утворення стабільної та стійкої систем, яка може сформуватись лише за умови постійної диференціації популяцій за екологічними нішами. Конкуренція є одним з найголовніших чинників, що підсилює диференціацію популяцій за екологічними нішами в угрупованнях, визначає рівень їхньої організації та стабільності. Обмеженість екологічних ніш стимулює на популяційному рівні вдосконалення спеціалізації та пристосувань до використання ресурсу, що, своєю чергою, корегується потенціями конкуруючих популяцій. Еволюційний процес спрямований не лише на повніше освоєння існуючих ніш, але й на формування нових ніш, чим забезпечується ефективніше використання ресурсів. Конкурентні відносини призводять до формування нових трофічних ланцюгів, зміни стратегії популяцій щодо просторового розподілу, сезонного розвитку, зміни життєвих форм, біоморф тощо. Таким чином відбувається формування нових популяцій та екосистем. Відповідно, на темпи еволюції має істотний вплив потенціал можливостей популяцій формувати більше чи менше число екологічних ніш [64].

Для швидшого зниження негативного впливу породних відвалів на довкілля необхідно здійснювати їх *рекультивацию*, яка є сукупністю заходів щодо відновлення ґрунтового і рослинного покриву. Планування рекультивациі територій порушених діяльністю гірничо-видобувної промисловості повинно базуватися на дослідженні флори окремих породних відвалів і гірничопромислового району загалом [8; 42]. Зазвичай перед озелененням проводять механічне перепрофілювання відвалів і засипають їхню поверхню шаром привозного родючого ґрунту, що вимагає значних фінансових витрат [80].

Породні відвали ліквідованих шахт у межах Львівсько-Волинського вугільного басейну переформатовують із конічної форми у плоску з метою запобігання горінню відвальної породи та подальшої їх рекультивації.

Підготовчий етап рекультивації териконів ліквідованих шахт передбачає згрібання зрізаного або викорчуваного середнього чагарничка і дрібнолісся з переміщенням до 20 м, облаштування дороги на відвал бульдозерами з переміщенням ґрунту до 10 м, планування поверхні дороги механізованим способом. Технічний етап передбачає подрібнення породи, розчищення кам'яно-ловильної канами, транспортування ґрунту на відвал, розроблення породи на відвалі, розрівнювання породи переміщенням ґрунту, розроблення потенційно родючого ґрунту і водовідвідних канав. Біологічний етап рекультивації передбачає підготовку механізованим способом стандартних місць для садіння дерев-саджанців, висівання багаторічних трав і догляд за культурними фітоценозами [75].

Економічно доцільнішим є покращення стану антропогенно порушених території завдяки вирощуванню рослин – *фітомеліорації* [1]. Для цього використовують стійкі, швидкорослі види, що утворюють значну біомасу – *фітомеліоранти*. Крім того, важливим критерієм підбору фітомеліорантів є здатність знижувати негативний вплив поллютантів, яке називають *фіторемедіацією*, а види придатні для фіторемедіації – *фіторемедіантами* [147; 7].

Виділяють наступні механізми фіторемедіації [85]:

- фітостабілізація – акумуляція чи іммобілізація поллютантів;
- фітодеградація – руйнування поллютантів до поглинання за впливу корневих виділень чи після поглинання під час метаболізму;
- фітовипаровування – виведення поглинутих рослинами поллютантів у процесі транспірації;
- ризодеградація – розкладання поллютантів мікроорганізмами ризосфери.

Перед озелененням породних відвалів проводять підвищення рН їх субстратів за допомогою хімічних меліорантів із лужними властивостями,

піскування для покращення гранулометричного складу і внесення добрив. Для нейтралізації кислотності породних відвалів застосовують такі гірські породи, як вапняк, що містить Кальцій і доломіт, який крім нього містить ще й Магній. Ці лужноземельні метали здатні знижувати кислотність відвалів внаслідок зв'язування сульфатної кислоти з утворенням сульфатів [126]. Крім вищезгаданих мінералів Кальцій і Магній містяться в кам'яновугільному попелі ТЕС, який є економічно раціональним заміником вапняку і доломіту [216].

Правила біологічної рекультивації в Україні вимагають підживлення добривами і вирівнювання тільки вершин відвалів [80], але після такого перепрофілювання залишаються досить високі стрімкі схили. Використання поширених швидкорозчинних мінеральних добрив на схилах для підживлення рослин неефективне через вимивання їх компонентів водними стоками з великих площ відвалів і тому доцільно використовувати капсульовані добрива із пролонгованим виділенням компонентів, які стимулюють фізіологічні процеси рослин в умовах дефіциту макроелементів [6].

В літературі описано дослідження впливу таких нетрадиційних добрив, як глауконіт та відходи дріжджового заводу. Встановлено, що додавання глауконіту та відходів дріжджової промисловості позитивно впливає на морфо-фізіологічні параметри рослин родини *Brassica*, а також підвищує інтенсивність фітоекстракції важких металів із субстрату породних відвалів [79].

Для меліорації відвалів у Бразилії випробовували шлак сталеливарного заводу та висушений осад стічних вод очисних споруд. Встановлено, що їхнє додавання до субстрату породних відвалів позитивно впливає на параметри системи субстрат-рослина, а також екологічно та економічно доцільніше за умови близького розташування відвалів, металургійних заводів і очисних споруд [142].

У процесі озеленення доцільним є застосування регуляторів росту

(біостимуляторів), які підвищують стійкість рослин до едафічних стрес-факторів. Виявлено позитивний вплив препаратів «Івін», «Агростимулін», «Емістим С», «Біосил», «Трептолем» і гіберелової кислоти на морфометричні параметри, вміст пігментів фотосинтезу та аскорбінової кислоти у рослин тифону (гібриду родини *Brassica*) за росту на субстратах породних відвалів Червоноградського ГПР [4].

Для підвищення рухомості макроелементів субстрату, утворення гумусового шару та фіксації атмосферного Нітрогену проводять інокуляцію субстратів породних відвалів спеціальними мікроорганізмами ризосфери рослин, що позитивно впливає на швидкість та ефективність фітомеліорації [114; 228].

На основі критеріїв дослідників із США [173] можна виділити наступні параметри успішної фітомеліорації породних відвалів:

- Ботанічні та фітофізіологічні параметри (наближення біомаси та площі рослинного покриву до показників довколишніх незабруднених територій, самостійне розмноження і поширення штучно вирощених рослин, самозаростання дикорослими видами з довколишніх територій, відсутність перевищення межі токсичності металів і металоїдів для тварин у надземній частині рослин);
- Мікробіологічні параметри (підвищення чисельності гетеротрофних бактерій та грибів, зниження чисельності залізо- і сіркоокиснювальних автотрофних бактерій);
- Едафічні параметри (покращення гранулометричного складу і водно-фізичних властивостей, зниження ерозії, наближення кислотності до значень прилеглих території, збільшення вмісту гумусу, підвищення доступності біофільних макроелементів, зниження біодоступності токсичних металів і металоїдів).

\*\*\*

Отже, породні відвали вуглевидобутку, зокрема ЦЗФ «Червоноградська», негативно впливають на довкілля і здоров'я людей. Для зниження їх шкідливості необхідно проводити рекультивацію, яка в Україні згідно офіційних рекомендацій вимагає нанесення суцільного шару привозного родючого ґрунту, що робить її практично неможливою за сучасних економічних умов. Фітомеліорація економічно доступніший спосіб зниження шкідливості породних відвалів. Для підвищення ефективності меліорації фізико-хімічні властивості субстратів породних відвалів покращують за допомогою економічно рентабельних меліорантів, зокрема кам'яновугільним попелом ТЕС і гуміновими препаратами.

## РОЗДІЛ 2

### ОБ'ЄКТИ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Характеристика району дослідження

Львівсько-Волинський вугільний басейн являє собою приклад одного з техногенно перевантажених, екологічно небезпечних районів України. Його географічні межі проходять по таких населених пунктах: Устилуг - Володимир-Волинський - Городок - Радехів - Буськ - Львів - Рава Руська. На цій території сформувалися три вугленосні райони: Південно-Західний (Львів, Жовква), Нововолинський (Володимир-Волинський, Нововолинськ, Устилуг), Червоноградський (Червоноград, Сокаль, Соснівка). Червоноградський гірничопромисловий район (ГПР) є основним вугледобувним районом басейну. На нього припадає практично найбільше екологічно небезпечне навантаження, оскільки тут на відносно невеликій площі (180 км<sup>2</sup>) розташовано дванадцять вугільних шахт і 211 га відведено під породні відвали. До 80 % техногенного навантаження припадає на площу приблизно в 30 км<sup>2</sup>, яка лежить у межиріччі річок Бугу і Рати (рис. 2.1), де проживає більшість населення району й одночасно розташовано сім вугільних шахт і основний відстійник шахтних вод [5].

Територія Червоноградського ГПР належить до Рава-Русько-Радехівсько-Бродівського геоботанічного району Малополіського округу. Рослинний покрив на основній площі однорідний за складом лісів, лук і боліт. Тут переважають соснові, дубово-соснові, грабово-дубово-соснові ліси, поширені переважно заплавні луки, менше материкові. Серед заплавних лук переважають справжні різнотравно-злакові луки. Болота займають в основному широкі долини алювіально-недіяльних річок і приток головних річок [65].

Клімат у межах Червоноградського ГПР атлантично-континентальний. Він характеризується значною кількістю опадів, м'якими зимами з частими відлигами і нестійким сніговим покривом, помірно теплим літом, відсутністю стійких посух і суховіїв. Гідрологічна мережа регіону утворена річкою Західний Буг та її лівими притоками Ратою та Солокією, що перебувають у зоні негативного впливу підприємств Червоноградського ГПР [15].

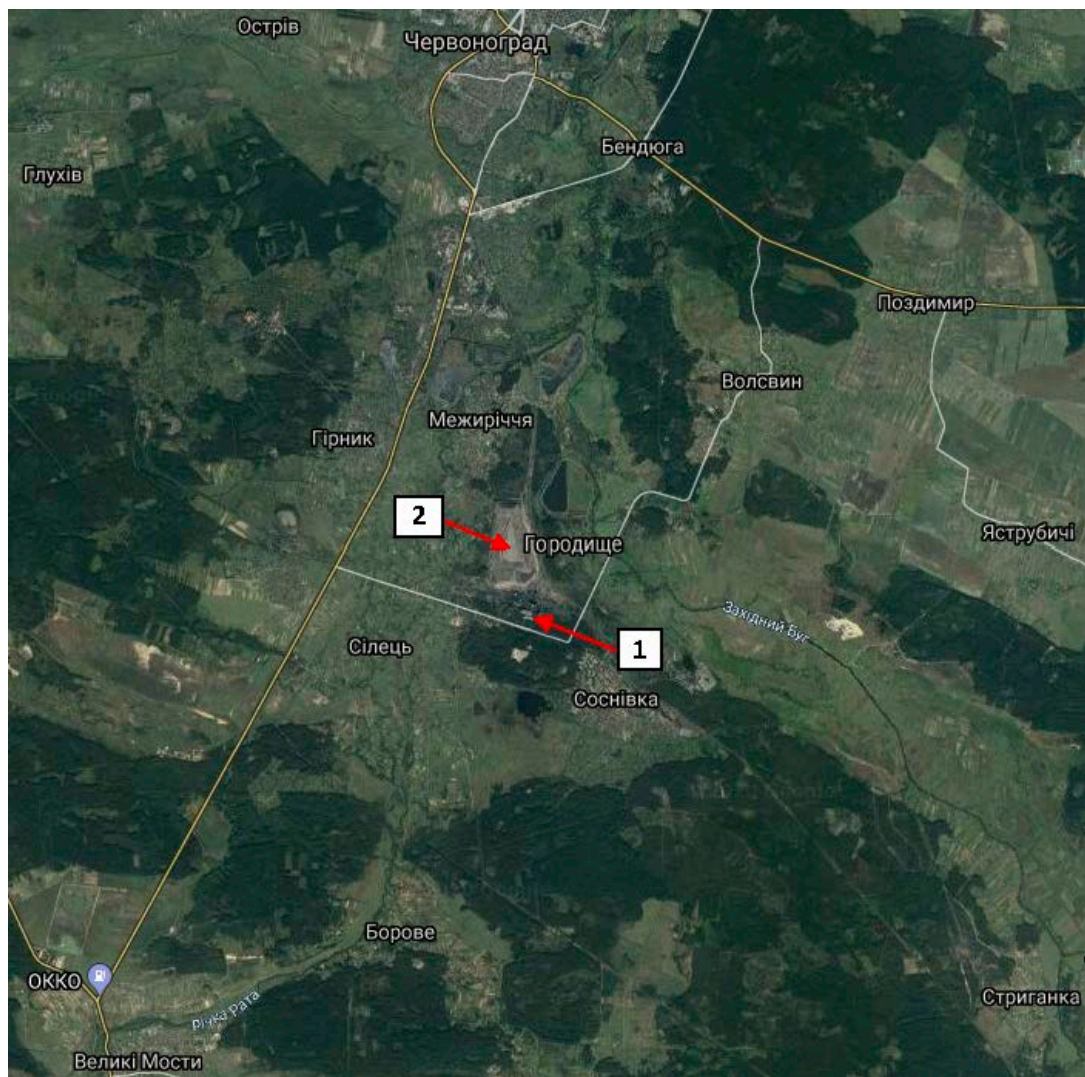


Рис. 2.1. Супутникове зображення ЦФЗ «Червоноградська» (1) та її породного відвалу (2). Джерело: [www.google.com/maps](http://www.google.com/maps)



Для територій у межах Червоноградського ГПР, (які не зайняті промисловими об'єктами) характерними є дерново-підзолисті піщані ґрунти світло-сірого забарвлення з низьким умістом гумусу (0,6-1,3 %), слабким насиченням основами, слабо-кислим рН ґрунтового розчину (5,33-6,14) і незначним умістом рухомих форм поживних речовин. На глибині 1,0-1,5 м вони часто підстелені крейдянним мергелем чи суглинками. Ґрунтовий профіль не має чіткої диференціації на горизонти. Гумусовий горизонт має потужність 15-18 см, ясно-сіре забарвлення. Може бути пухким, розсипчастим чи безструктурним. Елювіальний горизонт виражений слабо, трапляється у вигляді ясно-жовтого піску з білястими плямами кремнезему. Ілювіальний горизонт теж виражений слабо та представлений зцементованим жовтим піском із червоно-бурими псевдофібрами. Ґрунотворні відклади починаються на глибині 85-105 см у вигляді однорідного піску [65].

Вугілля Червоноградського ГПР має високу зольність ( $\approx 45\text{--}55\%$ ). З огляду на це його доводять до кондиційних вимог на центральній збагачувальній фабриці (ЦЗФ) «Червоноградська» (рис. 2.2), де більшість видобутого вугілля іде у відходи [67].



Рис. 2.2. ЦЗФ «Червоноградська». Джерело: echo80100.info

ЦЗФ «Червоноградська» збудована у 1979 р. і знаходиться приблизно в трьох кілометрах від смт Соснівка. Річний видобуток вугілля становить близько 3,2 млн. т, фабрика переробляє 2,0 млн. т. У результаті технологічного процесу утворюються тверді та рідкі відходи. Тверді відходи становлять 1,8 млн. т/рік, рідкі відходи - 1,35 млн. т/рік. Відходи належать до 4 класу небезпеки [5]. Загалом на території Червоноградського ГПР накопичено понад 85 млн. м<sup>3</sup> породних відвалів вугільних шахт, 14 млн м<sup>3</sup> крупних та 12 млн м<sup>3</sup> дрібних фракцій хвостів збагачення [237].

Породний відвал ЦЗФ «Червоноградська» (рис. 2.3) має загальну масу більше 70 млн тонн, площу понад 76 га та максимальну висоту 65 м, при загальному об'ємі більше 12 млн т. Він відсипався як трапецієподібний і схили першого ярусу мають понад 20 років, пізніше на ньому почали формувати тераси. Площа відвалу розбита на 5 терас, шириною приблизно 6-8 м, які утворилися за рахунок доріг, по яких їздять важковантажні машини. Між дорогами-терасами розташовані схили висотою 10-12 м, під кутом приблизно 45° [5].



Рис. 2.3. Породний відвал ЦЗФ «Червоноградська»

Часткове досипання породи проводять і досі. Велика площа відвалу та наявність стрімких схилів зумовлюють великі об'єми водних стоків – до  $0,118 \times 10^6$  м<sup>3</sup>/рік, що призводить до забруднення підземних і поверхневих вод. Навколо відвалу сформована дренажна канава глибиною та шириною понад 1 м [15].

Токсичні води технічних водойм об'єктів вугільної промисловості Червоноградського ГПР забруднюють ґрунти і підземні води, оскільки роботи з їхньої ізоляції не проведені у повному обсязі. Відкачування підземних вод призводить до пересихання боліт, а закриття шахт спричиняє підйом підземних вод, які затоплюють, заболочують і засолюють значні території під якими проводять вуглевидобуток, що робить неможливим їх цільове використання [31]. Результати вивчення розподілу важких металів у ґрунтах населених пунктів Червоноградського ГПР, де виявлено підвищену захворюваність дітей на гіпоплазію й аналізу характеру нагромадження цих металів у продуктах харчування, волоссі, зубах, крові, м'язах, кістках дітей показують, що до 70 % важких металів надходить в організм людей із водою та продуктами харчування [90].

Відходи вуглезбагачення ЦЗФ «Червоноградська» мають фракції 0,5–150 мм із зольністю 78,4–79,3 % і вмістом Сульфуру 3,1 %. До їх складу входять аргіліти (54-97 %), алевроліти (17-28), пісковики (2,0-20,7 %), вугілля (до 17 %) [67]. Основну масу породи породного відвалу становлять алевритисті та алевритові аргіліти. Аргілітами називають осадові породи з групи глин, які не мають явних слідів метаморфізму, не розмокають/дуже слабо розмокають у воді. Ці породи утворилися у водоймі, з'єднаній з морем і на кшталт піщаників, з якими вони перешаровуються є основними складовими частинами Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. Наявність піриту (до 1-2 %) в аргілітах відвалу свідчить про те, що водний басейн мав у своєму складі значну кількість сірководню. Аргіліти здебільшого від темно-сірого до чорного кольору, інколи попелясто-сірі [5].

Більшу частину відвалу (близько 70 %) складає сіро-чорна неперегоріла порода. Також на ньому поширена оранжево-червона перегоріла порода з різними відтінками, яка має чітко виражені структурно-текстурні відмінності, що свідчить про складні літологічні й петрографічні перетворення внаслідок термального «метаморфізму». Вона містить більше мікроелементів, ніж неперегоріла. Наприклад, із 166 виявлених перевищень рівня кларків для усіх мікроелементів 99 властиві перегорілим породам (60 % від загалу) і 67 – неперегорілим. Основною причиною концентрування металів у перегорілих породах вочевидь є підвищення їхньої зольності внаслідок вигорання органіки [92]. Крім того, на субстратах можна побачити виходи солей різного забарвлення (рис. 2. 4).



Рис. 2. 4. Вихід солей Сульфуру та Феруму на поверхню породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська»

Субстрати породних відвалів вугільних шахт Червоноградського ГПР мають високий вміст крупнозернистих фракцій, що зумовлює їх провальну водопроникність, низьку вологоємність та водопіднімальну здатність [8; 69]. Також слід зазначити, що низьке альbedo неперегорілої породи спричиняє сильне нагрівання поверхні відвалу в сонячну погоду, що призводить до википання води з поверхневого шару субстратів і прямих термічних опіків рослин [15].

Найменша температура субстрату в липні (найспекотнішому місяці року) зафіксована в субстраті перегорілої породи підніжжя відвалу і становила 30,7°C. Найбільші значення польової вологості виявлено в субстраті підніжжя відвалу – 7,2%. Її значення зменшувалося в напрямку вершини відвалу, причому найменша було зафіксована на схилі під сіро-чорною породою - 1,7%. Це свідчить про те, що відбувається стікання води по схилу та терасах до підніжжя відвалу, а також просочування в глибинні шари породи, про що згадувалося раніше [14].

Загалом для породних відвалів Червоноградського ГПР характерний підвищений валовий вміст Li, V, B, P, Zn, Pb, Bi, Co [161]. Біля підніжжя породного відвалу виявлено максимальні валові концентрації Co, Ni, Mo, V, Ba, Pb у ґрунтах, а максимальні концентрації у ґрунтах As, Zn, Cd, Hg поширені навіть на відстані 1-3 км. Найбільший вміст Cr зафіксовано безпосередньо біля териконів і на відстані 1-2 км від них. Серед рухомих форм хімічних елементів у ґрунтах виявлено максимально аномальні концентрації Pb, Zn, Cr на відстані 50-300 м від породного відвалу. Найвіддаленіші від породного відвалу максимальні концентрації в субстраті мали Ni і Mn. Максимальні концентрації рухомих форм Co і Cu зареєстрували на відстані до 1-3 км від породного відвалу. Встановлено, що найвищий коефіцієнт транслокації порода-ґрунт валового вмісту мали Pb, Ni та Mn. Рівень забруднення ґрунтів для більшості елементів на окремих ділянках у 5-7 разів перевищував гранично допустимі концентрації [92].

Внаслідок самозагоряння порід відвалу в повітря потрапляють токсичні пил і газу (рис. 2.5). Визначено, що під час горіння 1 м<sup>3</sup> відвалу Червоноградського ГПР протягом доби в середньому виділяється: по 0,6 кг сірководню та оксидів Нітрогену; 6,3 кг сірчаного ангідриду та 10 кг оксиду Карбону [51]. Встановлено, що на відстані 150 м від породного відвалу кількість пилу досягає 10-15 мг/м<sup>3</sup>. Дослідження повітря на території санітарно-захисної зони ЦЗФ «Червоноградська» виявили перевищення ГДК пилу в 5,2-7,3; сажі – у 1,5-2,1, а діоксиду Нітрогену – в 1,5-1,8 разів [27].



Рис. 2. 5. Горіння породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська»

На терасах відвалу виявлено дернини моху *Polytrichum piliferum* Hedw. [62]. З трав'янистих рослин трапляються куничник наземний *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth., а з дерев сосна звичайна *Pinus sylvestris* L. На підніжжі північного схилу відвалу сформувалось рослинне угруповання з берези бородавчастої *Betula pendula* Roth., осики звичайної *Populus tremula* L. з домішкою сосни звичайної, поодинокі трапляється дуб звичайний *Quercus robur*, а у трав'яному ярусі домінантом є куничник наземний [15].

## **2.2. Відбір і підготовка матеріалів**

Зразки сіро-чорної неперегорілої та оранжево-червоної перегорілої породи відбирали у 2015 році з підніжжя південного схилу головного терикону відвалу ЦЗФ «Червоноградська», а кам'яновугільний попіл 2016 року з відвалу Добротвірської ТЕС, розташованої в селищі міського типу Добротвір Кам'янка-Бузького району Львівської області. Попіл із відвалів Добротвірської ТЕС, як із більшості кам'яновугільних теплоелектростанцій має лужне значення рН, що завдяки невеликій відстані та хорошему транспортному (зокрема залізничному) сполученню між смт Добротвір і населеними пунктами Сокальського району робить його перспективним меліорантом для розкислення і зниження фітотоксичності породних відвалів Червоноградського ГПР [89].

Для проведення хімічного аналізу проби субстратів та органів рослин сушили за кімнатної температури до повітряно-сухого стану, подрібнювали і ретельно перемішували [3]. Перерахунок результатів аналізу на абсолютно суху масу здійснювали згідно [78].

## **2.3. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС і гуматів Калію**

### **2.3.1. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС і вермигумату Калію в умовах чашок Петрі**

В якості *біотесту* та потенційного фітомеліоранта субстратів породних відвалів Червоноградського ГПР за впливу хімічних меліорантів (кам'яновугільного попелу ТЕС і вермигумату) обрали суданську траву *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) тому, що рослини роду *Sorghum*, застосовують для фітомеліорації відходів гірничої промисловості з низькими значеннями рН в Бразилії, ПАР [142], Індії [169; 216] та Італії

[196] завдяки толерантності до посухи, низького рН [135; 137] та високих концентрацій токсичних металів [196; 76; 188].

Дослідження проводили з проростками/рослинами, які 11 діб вирощували в чашках Петрі у термостаті за температури +23 °С, а потім ще 10 діб за 12-ти годинного штучного освітлення і температури +20±2 °С (загалом 21 добу). Для дослідження в чашки Петрі, поміщали по 25 насінин, взятих у 3-х кратній повторюваності. В якості еталону використовували проростки, які росли в чашках Петрі з піском, який наситили 15 мл поживного розчину Гельрігеля [34]. Контролем були проростки/рослини суданської трави, вирощені на субстраті сіро-чорної неперегорілої та оранжево-червоної перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» без додавання меліорантів. Дослідні рослини вирощували на субстраті породного відвалу з додаванням попелу Добротвірської ТЕС, вермигумату чи обох меліорантів разом. Вермигумат, одержували екстракцією розчином гідроксиду Калію з копролітів дощових черв'яків породи «Старатель», які згідно літературних даних в середньому мають значення рН близько 6,8-7,2; вміст сухої органічної речовини 40-60 % та наступний хімічний склад: гумус 10-12%; N -0,9-3%; P-1,3-2,5; K - 1,2-2,5 %; Ca - 4,5-8 %; Mg - 0,5-2,3 %; Fe - 0,5-2,5 %; Cu - 3,5-5,1 %; Mn - 60-80 мг/кг; Zn - 28-35 мг/кг [45].

Субстрати готували за наступною схемою: Еталон – пісок (5 г)+розчин Гельрігеля (15 мл); Контроль 1 – перегоріла порода (5г)+дистильована вода (15 мл); Дослід 1 А – перегоріла порода (4,75 г)+попіл (0,25г)+дистильована вода (15 мл); Дослід 1 Б – перегоріла порода (5 г) + 0,01 % розчин вермигумату (15 мл); Дослід 1 В –перегоріла порода (4,75 г)+попіл (0,25 г)+0,01 % розчин вермигумату (15 мл); Контроль 2 – неперегоріла порода (5г)+дистильована вода (15 мл); Дослід 2 А – неперегоріла порода (4,75 г)+попіл (0,25г)+ дистильована вода (15 мл); Дослід 2 Б – неперегоріла порода (5 г)+0,01 % розчин вермигумату (15 мл);



Дослід 2 В – неперегоріла порода (4,75 г)+попіл (0,25 г)+0,01 % розчин вермигумату (15 мл).

Вплив дослідних субстратів на енергію проростання насіння *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* визначали через 4 доби, а на схожість через 10 діб згідно [32]. Морфометричні параметри рослин визначали на 21 добу після посіву.

### **2.3.2. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС в умовах мікрокосмів**

Дослідження впливу попелу ТЕС на фітостресорність субстратів породного відвалу (з використанням суданської трави в якості біотесту) проводили в *екологічних мікрокосмах*, які є зменшеними та спрощеними копіями для моделювання та прогнозування змін реальних екосистем. Застосовують здебільшого частково відкриті мікрокосми, що прямо взаємодіють з атмосферою, але ізольовані від прямого впливу гідросфери, літосфери та біосфери «зовнішнього світу», оскільки складно створювати самодостатні штучні екосистеми малого розміру. Мікрокосми дозволяють ефективно досліджувати багато основних процесів, що відбуваються в природних екосистемах, але різноманіття та розміри компонентів мікрокосмів обмежені. Основними перевагами пляшкових мікрокосмів є доступність матеріалів, простота будови та можливість оперативної адаптації конструкції до специфіки дослідних об'єктів [84; 66; 210].

Нашу модель на основі мікрокосму «земноводна колона» будували з водного (пляшки, обрізаної нижче «плеча») та наземного (пляшки без дна, оберненої «шийкою» вниз) модулів з прозорих пластикових пляшок об'ємом 5 л. Для стабільного зволоження субстрату використовували нейлоновий гніт товщиною 4 мм, який притискали до стінок і протягували через отвір кришечки від дна водного модуля до поверхні субстрату наземного модуля (рис. 2.6).

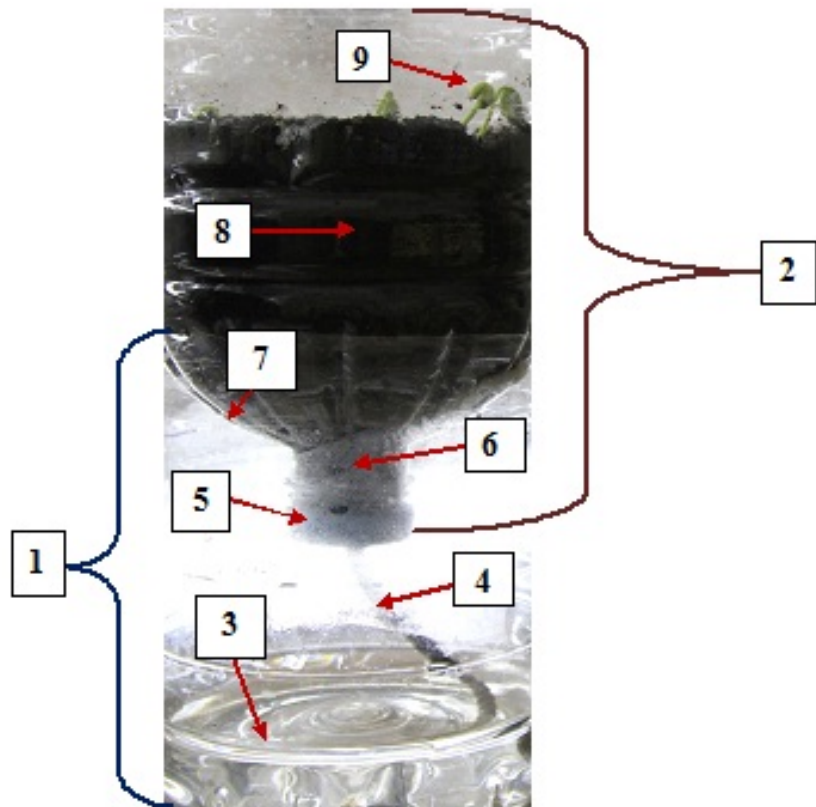


Рис. 2.6. Схема будови мікрокосму «Земноводна колона»:  
 1 – водний модуль; 2 – наземний модуль; 3 – вода; 4 – гніт;  
 5 – кришечка; 6 – шийка; 7 – плече; 8 – ґрунт; 9 – рослини.

У наземні модулі земноводних колон, взятих у 4-х кратній повторюваності висаджували по 15 проростків суданської трави, які 4 доби пророщували у термостаті за температури 25 °С. Далі рослини вирощували в теплиці за природного освітлення з відкритим наземно-повітряним модулем. Морфометричні параметри (висоту пагона і довжину коренів) суданської трави вимірювали після 68 діб росту. В якості еталону для порівняння використовували рослини вирощені за впливу едафічних факторів умовно чистої ґрунтосуміші. Контролем слугували рослини, вирощені на субстраті сіро-чорної неперегорілої та оранжево-червоної перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» без додавання попелу. Для дослідів використовували рослини, вирощені на субстратах, які

містили 5 % кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС від загальної маси субстрату [101].

Субстрати готували за наступною схемою: Еталон – 1500 г ґрунтосуміші з торфу (25 %), листового перегною (50 %) та піску (25 %); Контроль 1 – перегоріла порода (1350 г)+ґрунтосуміш (150 г); Дослід 1 – перегоріла порода (1200 г)+ґрунтосуміш (150 г)+попіл (150 г); Контроль 2 – неперегоріла порода (1350 г)+ґрунтосуміш (150 г); Дослід 2 – неперегоріла порода (1200 г)+ґрунтосуміш (150 г)+попіл (150 г).

### **2.3.3. Вирощування суданської трави на субстратах породного відвалу за впливу попелу ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» в напівпольових умовах**

Для еталону (умовно чистого субстрату) використовували субстрат, який виготовляли змішуванням торфу, листового перегною і піску в пропорції 1:2:1. Для виготовлення субстратів контролю сіро-чорну неперегорілу та оранжево-червону перегорілу породу з відвалу змішували з субстратом еталону в пропорції 9:1 для запобігання ранньої загибелі проростків суданської трави. Субстрати досліду виготовляли із субстрату контролю, обробленого тільки одним чи обома дослідними меліорантами. Попіл Добротвірської ТЕС додавали до субстратів породних відвалів у концентрації 5 % за масою, щоб досягти компромісу між ефективністю підвищення рН і потенційними фінансовими витратами у випадку практичного застосування результатів дослідження. Гумат Калію «ГКВ-45», який екстрагований з торфу застосовували у робочій концентрації 0,5 % за рекомендацією його виробника – ТЗОВ «ПАРК» (Україна, Львівська область). Гумінові речовини за даними виробника склали 42 % від маси нетто, а валовий вміст макроелементів був наступним: С – 166,3; К<sub>2</sub>О – 69,3 ; N – 2,4 та Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> – 0,4 г/кг.

Субстрати готували за наступною схемою: Еталон – ґрунтосуміш

(1500 г); Контроль 1 – перегоріла порода (1350 г)+грунтосуміш (150 г); Дослід 1 А–перегоріла порода (1200 г)+грунтосуміш (150 г)+попіл (150 г); Дослід 1 Б –перегоріла порода (1350 г)+грунтосуміш (150 г)+гумат (150 мл); Дослід 1 В–перегоріла порода (1200 г)+грунтосуміш (150 г)+попіл (150 г)+гумат (150 мл); Контроль 2 – неперегоріла порода (1350 г)+грунтосуміш (150 г); Дослід 2 А – неперегоріла порода (1200 г)+грунтосуміш (150 г)+попіл (150 г); Дослід 2 Б – неперегоріла порода (1350 г)+грунтосуміш (150 г)+гумат (150 мл); Дослід 2 В – неперегоріла порода (1200 г)+грунтосуміш (150 г)+попіл (150 г)+гумат (150 мл).

Проростки суданської трави 4 доби пророщували у темряві за температури 23 °С. Далі у горщики об'ємом 2 л висаджували по 15 проростків, які вирощували під відкритим небом на території Львівського національного університету імені Івана Франка з липня по жовтень 2016 року. Морфометричні параметри (висоту стебла, площу листків і масу коренів) рослин визначали після 95-ти діб росту.

#### **2.4. Визначення пластидних пігментів і фенольних сполук**

Вміст пластидних пігментів і фенольних сполук у листках суданської трави, яку вирощували в умовах чашок Петрі визначали після 21, мікрокосмів – 68, а в напівпольових умовах – 95 діб росту.

**Вміст хлорофілів** у листках рослин, які вирощували в *чашках Петрі* та *мікрокосмах* визначали в етанольних екстрактах. Оптичну густину вимірювали на фотоколориметрі КФК-3 за довжини хвиль 665 нм для хлорофілу *a* та 649 нм для хлорофілу *b*. Вміст хлорофілів обчислювали за формулами Ветштейна для 95 % етанолу [28].

**Вміст хлорофілів і каротиноїдів (суми каротинів і ксантофілів)** у листках суданської трави, яку вирощували в *напівпольових умовах* визначали згідно методики Ліхтенталера. Оптичну густину етанольних екстрактів вимірювали на КФК-3 за  $\lambda=665$  нм для хлорофілу *a*, 649 нм для

хлорофілу  $b$  і 470 нм для каротиноїдів. Вміст цих пігментів обчислювали за формулами для 95 % етанолу [168]. **Феофітин  $a$**  визначали після підкислення етанольних екстрактів 2 краплями 10 % розчину HCl. Їхню оптичну густина вимірювали за  $\lambda=665$  нм та обчислювали вміст цього пігменту згідно [230].

**Сумарний вміст фенольних сполук** визначали паралельно в тих самих екстрактах, що й хлорофіли. Для цього в пробірку відбирали 1 мл екстракту, приливали до нього 5 мл дистильованої води та 1 мл реактиву Фоліна-Деніса, а через 3 хвилини 1 мл 20 % розчину  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , перемішували, доводили водою до мітки, відстоювали 30 хвилин і фільтрували через паперовий фільтр «червона стрічка». Оптичну густина вимірювали на КФК-3 за  $\lambda=725$  нм. Кількісний вміст фенольних сполук розраховували згідно калібрувального графіку, який будували за пірокатехіном [43].

Вміст суми фенольних сполук обчислювали за формулою:

$$\text{ФС} = \frac{C \cdot V_a}{V_b \cdot P}, \text{ де}$$

ФС – сумарний вміст фенольних сполук, мг/г сирової маси;  $V_a$  – загальний об'єм гомегенату, мл;  $C$  – концентрація фенольних сполук в екстракті згідно калібрувального графіку, мг/л;  $V_b$  – об'єм екстракту пігментів, відібраний для реакції, мл;  $P$  – наважка сирого рослинного матеріалу, г.

**Антоціани** визначали в екстрактах після визначення хлорофілу та фенольних сполук. Для цього в них розчиняли 1 % хлоридної кислоти. Їх оптичну густина вимірювали на КФК за  $\lambda=546$  нм. Вміст антоціанів у листках (мг/г сирової маси) обчислювали за формулою:

$$A = \frac{D \cdot V \cdot 10}{P \cdot 100}, \text{ де}$$

$A$  – вміст антоціанів, мг/г;  $D$  – оптична густина екстракту; 10 – коефіцієнт для перерахунку в мг/г;  $V$  – об'єм екстракту, мл;  $P$  – наважка сирого рослинного матеріалу, г; 100 – питомий показник поглинання антоціанів у використаному екстрагенті [38].

## 2.5. Визначення актуальної кислотності субстратів

Актуальну кислотність (рівень рН) субстратів вимірювали на іонометрі «ЭВ-74» [91] у 5-ти кратній повторюваності за температури води +18,5 °С, рН дистильованої води 5,5 та вмісті твердої речовини 100 г/л.

## 2.6. Визначення Плюмбуму та Хрому в субстратах і рослинах

*Рухомі форми важких металів* у субстратах і кам'яновугільному попелі Добротвірської ТЕС проводили в буферних ацетатно-амонійних екстрактах з рН 4,8. Це зумовлено тим, що відповідний рівень рН підтримується в ризосфері більшості рослин і саме за цього значення метали потрапляють у біогеохімічний колообіг. Для цього 10 г повітряно-сухого субстрату переносили в колби об'ємом 100 мл, наливали в неї до мітки ацетатно-амонійний буфер і ретельно збовтували, відстоювали суспензію протягом доби, потім фільтрували суспензію і збирали фільтрат в колбу.

*Валовий вміст важких металів* у рослинному матеріалі визначали в екстрактах, одержаних після мокрого озолення нітратною кислотою. Для цього в колби об'ємом 50 мл поміщали 5 г повітряно-сухих зразків, наливали 25 мл  $\text{HNO}_3$  (1:1), нагрівали протягом 10 хвилин, доливали 5 мл  $\text{H}_2\text{O}_2$  і знову нагрівали впродовж 5-10 хвилин. Далі суміш охолоджували, відфільтровували крізь беззольні фільтри в мірні колби на 50 мл, фільтри із залишками проб переносили в склянки, доливали 20 мл  $\text{HNO}_3$  (1М) і знову нагрівали за температури 100°C, охолоджували, відфільтровували крізь беззольні фільтри в ті ж мірні колби об'ємом 50 мл і доводили до мітки дистильованою водою.

Вміст, як рухомих так і валових форм важких металів у фільтратах проводили на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С115 М1 за допомогою відповідних ламп для Плюмбуму і Хрому [82]. Вміст кожного

з металів обчислювали за формулою:

$$X = \frac{A \cdot V \cdot Kh}{P}, \text{ де}$$

X – вміст металу в перерахунку на абсолютно-суху масу, мг/кг; A – вміст металу, визначений в екстракті, мг/л; V – об'єм екстрагенту, мл; Kh – коефіцієнт гігроскопічності; P – маса повітряно-сухої проби, г.

Для визначення валових вмістів Нітрогену, Фосфору, Калію і Кальцію у рослинному матеріалі проводили мокре озолення за методом Піневич у модифікації Куркаєва. Для цього зважували 0,2-0,5 г повітряно-сухого рослинного матеріалу і поміщали в термостійку колбу об'ємом 100 мл, доливали в колбу 4 мл концентрованої H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (d=1,84), перемішували, залишали закриті колби відстоюватись на ніч до обвуглення рослинного матеріалу. Далі по стінках приливали в колби по 3 мл 30 %-го H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> й одразу накривали скляними лійками. Після закінчення скипання вміст колби нагрівали протягом 25 хвилин, а після охолодження додавали 2-4 краплі H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> до знебарвлення розчину. Нагрівання продовжували до інтенсивного виділення білих випарів за яких рідина залишилася безбарвною. Після охолодження вміст розчинів доводили до мітки дистильованою водою [81].

## 2.7. Визначення Кальцію, Калію та Фосфору в субстратах і рослинах

*Рухомі форми Кальцію, Калію та Фосфору* визначали в екстрактах, які готували за методом Кірсанова [78]. Для цього зважували 1 г повітряно-сухого субстрату, переносили в пробірку, заливали наважку 10 мл 0,2 н розчину HCl, збовтували протягом хвилини, відстоювали протягом 15 хвилин і фільтували суспензію в пробірку через паперовий складчастий фільтр.

*Кальцій і Калій* вимірювали в екстрактах методом полум'яної фотометрії на апараті ПФМ без внесення додаткових реактивів, а їхній

вміст у фільтратах обчислювали згідно шкали зразкових розчинів, яку готували з хлоридів Калію та Кальцію і калібрувальних графіків, за формулою:

$$X = \frac{A \cdot V \cdot Kh}{P}, \text{ де}$$

X – вміст макроелементу, г/кг абсолютно сухої маси; A – вміст макроелементу, знайдений за калібрувальним графіком, г/л; V – об'єм суспензії до фільтрування розчину HCl в пробірці, мл; Kh – коефіцієнт гігроскопічності; P – наважка повітряно-сухої проби, г.

**Валовий вміст Кальцію та Калію** визначали в екстрактах, одержаних після озолення за методом Піневич в модифікації Куркаєва. Для цього замість 1 г субстрату відбирали 1 мл екстракту, одержаного після мокрого озолення рослинного матеріалу, а валовий вміст обчислювали, додавши у чисельник формули значення об'єму розчинів у колбі після озолення і доведення розчинів до мітки.

**Вміст рухомого Фосфору** в екстрактах, одержаних методом Кірсанова визначали після додавання відповідних реактивів за методом Деніже. Для цього у пробірки відбирали по 5 мл фільтрату, додавали 2 мл розчину молібдату амонію, збовтували, додавали 1 мл розчину хлористого олова і ще раз збовтували. Через 15 хвилин вимірювали оптичну густину проти холостої проби на КФК-3 за  $\lambda=650$  нм. Зразкові розчини для приготування шкали і побудови калібрувального графіку готували з дигідрофосфату Калію.

Вміст рухомих форм Фосфору в субстраті обчислювали за формулою:

$$X = \frac{A \cdot V \cdot Kh}{P}, \text{ де}$$

X – вміст Фосфору, г/кг абсолютно сухої маси; A – вміст Фосфору знайдений за калібрувальним графіком, г/л; V – об'єм суспензії до фільтрування, мл; Kh – коефіцієнт гігроскопічності; P – наважка повітряно-сухої проби, г.



**Валовий вміст Фосфору** визначали в екстракті, одержаному після озолення за методом Піневич в модифікації Куркаєва замість 1 г субстрату відбирали 1 екстракту, одержаного після мокрого озолення рослинного матеріалу, а валовий вміст в 1 г сухого матеріалу обчислювали, додавши у чисельник формули для визначення вмісту рухомих форм Фосфору значення об'єму розчинів у колбі після озолення і доведення до мітки [81].

## **2.8. Визначення Нітрогену в субстратах і рослинах**

**Нітратний Нітроген** визначали за реакцією із дисульфофеноловою кислотою методом Грандвалія-Ляжу [78]. Нітрати з субстрату вилучали водою за співвідношенні субстрату до води 1:5. Для цього 20 г сухого субстрату переносили у колбу об'ємом 250 мл, всипали для осадження колоїдів 10мг алюмокалієвого галуноу, приливали 100 мл води і збовтували протягом 3-х хвилин. Далі розчин фільтрували. Потім у фарфорову чашку для випарювання переносили 25 мл фільтрату і випарювали на водяній бані. Після висушування осаду в чашку приливали 1 мл дисульфофенолової кислоти. За допомогою скляної палички цією кислотою змочували сухий осад на всій внутрішній поверхні чашки. Її поверхню протягом 10 хвилин періодично обробляли дисульфофеноловою кислотою, яку раніше приливали в чашку. Далі в чашку приливали 10 мл води, перемішували і нейтралізували 20 % розчином NaOH. Далі розчин з чашки кількісно переносили у мірну колбу на 50 мл і доводили до мітки дистильованою водою. Через 30 хвилин вимірювали оптичну густину на КФК-3 за  $\lambda=420$  нм. Паралельно в фарфорові чашки приливали зразковий розчин, який готували з нітрату Калію. Далі виконували ті самі операції, що й з досліджуваними зразками. За оптичними густинами зразкових розчинів будували калібрувальний графік.

Вміст нітратного Нітрогену обчислювали за формулою:

$$X = \frac{A \cdot V \cdot K_h}{P} * 1000, \text{ де}$$

X — вміст нітратного Нітрогену, мг/кг абсолютно сухої маси; A — вміст нітратного Нітрогену згідно калібрувального графіку, г/л; V — об'єм суспензії до фільтрування, мл; K<sub>h</sub> — коефіцієнт гігроскопічності; P — маса повітряно-сухої проби, г; 1000 — коефіцієнт для перерахунку з г/кг в мг/кг.

**Нітритний Нітроген** визначали за реакцією з реактивом Грісса [3]. Для цього зважували 1 г субстрату і переносили у колбу об'ємом 100 мл, заливали наважку 50 мл дистильованої води, збовтували суспензію протягом 20 хвилин і доводили її водою до мітки, фільтрували і паралельно готували холостий розчин. Далі вносили у пробірку 2 мл реактиву Грісса і 5 мл фільтрату. Зразкові розчини для побудови калібрувального графіку готували з нітриту Натрію. За 20 хвилин вимірювали оптичну густину на КФК-3 за λ=540 нм проти холостого розчину.

Вміст нітритного Нітрогену обчислювали за формулою:

$$X = \frac{A \cdot V \cdot K_h}{P} * 1000, \text{ де}$$

X — вміст нітритного Нітрогену, мг/кг абсолютно сухої маси; A — вміст нітритного Нітрогену згідно калібрувального графіку, г/л; V — об'єм суспензії до фільтрування, мл; K<sub>h</sub> — коефіцієнт гігроскопічності; P — маса повітряно-сухої проби, г; 1000 — коефіцієнт для перерахунку з г/кг в мг/кг.

**Амонійний Нітроген** визначали за реакцією із реактивом Неслера [78]. Для цього зважували 1 г свіжого субстрату і переносили в пробірку, заливали його 10 мл 1 М розчину КСІ і збовтували протягом 60 хвилин. Далі суспензію фільтрували у пробірку в яку відбирали 5 мл фільтрату, додавали 1 мл 10 % розчину сегнетової солі, закривали і ретельно збовтували. Далі додавали 1 мл 20 % розчину реактиву Неслера, закривали пробкою і ретельно збовтували. Паралельно готували холостий розчин. Через 15 хвилин вимірювали оптичну густину на КФК-3 проти холостого розчину за λ=420 нм. Зразкові розчини для побудови калібрувального

графіку готували з сульфату амонію.

Вміст амонійного Нітрогену обчислювали за формулою:

$$X = \frac{A \cdot V \cdot Kh}{P}, \text{ де}$$

X – вміст амонійного Нітрогену, г/кг абсолютно сухої маси; A – вміст амонійного Нітрогену знайдений за калібрувальним графіком, г/л; V – об'єм суспензії до фільтрування, мл; Kh – коефіцієнт гігроскопічності; P – наважка повітряно-сухої проби, г.

**Валовий вміст Нітрогену** в рослинному матеріалі визначали аналогічно до вмісту Нітрогену амонійних сполук в субстраті, тому, що мокре озолення в сульфатній кислоті призводить до переходу сполук Нітрогену в амонійну форму. Для визначення Нітрогену замість 1 г субстрату відбирали 1 мл екстракту, одержаного після озолення рослинного матеріалу за Піневич і Куркаєвим, а валовий вміст в 1 г сухого матеріалу обчислювали, додавши в чисельник формули для визначення амонійного Нітрогену значення об'єму розчинів у колбі після озолення і доведення до мітки.

## 2.9. Визначення органічного Карбону в субстратах і рослинах

**Органічний Карбон** у субстратах і рослинному матеріалі визначали фотоколориметричним методом на апараті КФК-3 після двох діб мокрого озолення матеріалу в хромовій суміші за кімнатної температури методом Нікітіна в модифікації Антонової і співавторів [2]. Для цього 50 мг повітряно-сухої проби поміщали в пробірки і заливали 10 мл 0,4 н біхромату Калію. Далі проби перемішували і відстоювали протягом двох діб. Після відстоювання проби фільтрували і вимірювали оптичну густина при  $\lambda=590$  нм проти холостої проби (0,4 н біхромату Калію). Вміст органічного Карбону визначали за калібрувальним графіком. Для побудови

графіку у 5 термостійких колб об'ємом 50 мл наливали 2; 4; 6; 8 та 10 мл 1 М розчину глюкози в дистильованій воді, випарювали досуха, перемішували та через дві доби вимірювали їх оптичну густину. Потім будували калібрувальний графік і визначали вміст органічного Карбону в екстрактах. Вміст органічного Карбону в субстратах/рослинах визначали за формулою:

$$X = \frac{A * Kh}{P}, \text{ де}$$

X – вміст органічного Карбону в сухій наважці, г/кг; A – вміст органічного Карбону за калібрувальним графіком, г/л; Kh – коефіцієнт гігроскопічності; P – наважка повітряно-сухої проби, г.

## **2.10. Біотестування потенційного алелопатичного впливу суданської трави з використанням крес-салату**

Для виявлення можливого негативного впливу вирощування суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* на інші види рослин використовували насіння і проростки крес-салату *Lepidium sativum* L. Для цього в чашки Петрі поміщали фільтрувальний папір, насипали 10 г субстрату і додавали 10 мл води. Далі на кожний субстрат посіяли по 25 насінин крес-салату в 5-ти кратній повторюваності і помістили чашки Петрі в термостат з температурою +23 °С.

Згідно [32] енергію проростання насіння крес-салату визначають на 3-тю, а його схожість на 5-ту добу. Для біотестування рекомендують визначати схожість насіння і морфометричні параметри його проростків на 10 добу після посіву [82]. Дані щодо енергії проростання та схожості нами не наведено, оскільки на 3-тю добу зійшли всі насінини незалежно від варіанту експерименту. Морфометричні параметри вимірювали на 7-му добу росту внаслідок інтенсивного росту біомаси крес-салату.

## 2.11. Обчислення меліораційного ефекту

Для візуального узагальнення впливу меліорантів на фітостресорність субстрату породного відвалу будували пелюсткові діаграми за допомогою програми MS Excell 2007. Оптимальність значень екофізіологічних параметрів рослин, вирощених на субстраті породного відвалу за впливу меліорантів обчислювали за формулою:

$$\text{ОЕП} = \frac{\sum y_i}{M_x * n_y} * 100, \text{ де}$$

ОЕП – оптимальність екофізіологічного параметру, %;  $M_x$  – середнє арифметичне значення екофізіологічного параметру рослин еталону, вирощених за впливу оптимальних екологічних факторів;  $\sum y_i$  – сума значень екофізіологічного параметру кожної повторюваності варіанту дослідження, який порівнюють відносно еталону;  $n_y$  – чисельність вибірки варіанту дослідження, який порівнюють відносно еталону; 100 – коефіцієнт для перерахунку на %.

Значення оптимальності фізіологічних процесів програма візуалізувала у вигляді багатокутників пелюсткової діаграми відносно значень фізіологічних параметрів еталону, які приймали за 100 %. Подібну візуалізацію з використанням пелюсткових діаграм застосовували для зображення зон екологічного оптимуму різних видів рослин [86].

Фітомеліораційний ефект вирощування суданської трави на хімічний склад субстрату породного відвалу/морфометричні параметри крес-салату обчислювали за наступною формулою:

$$\text{ФЕ} = \frac{M_y}{M_x} * 100, \text{ де}$$

ФЕ – фітомеліораційний ефект, %;  $M_x$  – середнє арифметичне значення вмісту рухомих форм хімічного елементу в субстраті/морфометричні параметри біотестера (крес-салату) за росту на субстраті без вирощування фітомеліорантів;  $M_y$  – середнє арифметичне значення вмісту рухомих

форм хімічного елементу в субстраті/морфометричні параметри крес-салату за росту на субстраті після вирощування фітомеліорантів; 100 – коефіцієнт для перерахунку на %.

## 2.12. Статистичний аналіз результатів

Для статистичного аналізу результатів дослідження розраховували наступні показники згідно [59].

Середнє арифметичне (M) обчислювали за формулою:

$$M = \frac{\sum x}{N}, \text{ де}$$

$\sum x$  – сума значень кожної повторюваності варіанту дослідження;

N – чисельність вибірки.

Стандартне відхилення ( $\sigma$ ), яке характеризує варіювання сукупності об'єктів обчислювали за формулою:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum (X_i - M)^2}{N - 1}}, \text{ де}$$

$\sum (X_i - M)$  – сума різниць кожної повторюваності від середнього арифметичного; N – чисельність вибірки.

Парний критерій Стьюдента (t) для обчислення ступеня достовірності різниці двох незалежних сукупностей з однаковою чисельністю вибірки обчислювали за формулою:

$$t = \frac{|M_x - M_y|}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}, \text{ де}$$

$|M_x - M_y|$  – різниця за модулем між середньоарифметичними значеннями першої та другої сукупностей;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – стандартні відхилення першої та другої сукупностей.

Коефіцієнти кореляції, що показують ступінь зв'язку між двома параметрами, який лежить у межах від -1 до +1 обчислювали за формулою:

$$R_{xy} = \frac{\sum (x_i - M_x) * (y_i - M_y)}{\sqrt{\sum (x_i - M_x)^2 * \sum (y_i - M_y)^2}}, \text{ де}$$

x, y – параметри, які порівнюють;  $x_i, y_i$  – окремі повторюваності параметрів;  $\sum$  – сума; M – середнє арифметичне.

Кореляційний аналіз здійснювали в програмі Statistica 10. Для цього брали значення параметрів повторюваностей варіантів, які містили субстрат породних відвалів.

\*\*\*

Отже, дослідження фітостресорності субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» за впливу попелу ТЕС і гуматів Калію проводили загальноприйнятими методиками, які використовують в екології, ґрунтознавстві та фізіології рослин з урахуванням особливостей об'єктів дослідження.

## РОЗДІЛ 3

### ВПЛИВ ПОПЕЛУ ДОБРОТВІРСЬКОЇ ТЕС І ВЕРМИГУМАТУ КАЛІЮ НА ФІТОСТРЕСОРНІСТЬ СУБСТРАТІВ ПОРОДНОГО ВІДВАЛУ ЦЗФ «ЧЕРВОНОГРАДСЬКА»

Оцінку стійкості суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* до впливу стрес-факторів субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» починали з пророщування насіння і подальшого вирощування рослин в чашках Петрі з метою визначення найбільш легкодоступних та експресивних біопараметрів, які дозволяють на ранніх етапах дослідження «відкинути» непридатні для фітомеліорації види рослин.

#### **3.1. Екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті оранжево-червоної перегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і вермигумату Калію**

Зазначимо, що значну частину породних відвалів вуглевидобутку складає оранжево-червона порода різних відтінків, що утворюється внаслідок самозаймання і горіння відвалів. Вона має структурні особливості внаслідок складних літологічних перетворень, які відбувалися у процесі термального «метаморфізму». Перегоріла порода містить більший валовий вміст важких металів, ніж свіжовідсипана, що зумовлено підвищенням зольності після вигорання органіки [95; 92; 208].

В роботі [25] відмічено високу схожість насіння суданської трави на субстраті перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська». Наші дослідження також показали високий рівень енергії проростання і схожості насіння *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* на субстраті перегорілої породи, що дозволяє пояснити відсутність статистично достовірного впливу



меліорантів на проростання суданської трави, а також робить доцільними подальші дослідження цього біооб'єкта в якості потенційного фітомеліоранта (рис. 3.1).

Також в літературі описано пригнічення морфогенезу рослин роду *Sorghum* за росту на субстраті перегорілої породи відвалів Червоноградського ГПР [79; 25].

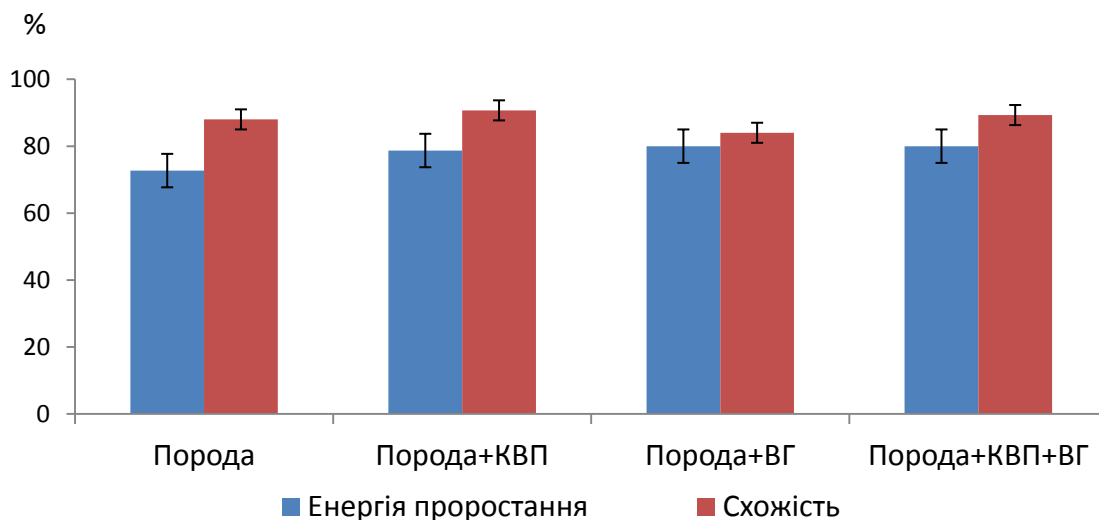


Рис. 3.1. Енергія проростання (4 доба) і схожість (10 доба) насіння суданської трави за впливу субстрату перегорілої породи з додаванням попелу і вермигумату (n=75), %

Умовні скорочення (тут і далі): КВП – кам'яновугільний попіл; ВГ – вермигумат.

В свою чергу, наші дослідження виявили сильне пригнічення росту кореня і пагона суданської трави, яку вирощували на субстраті перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська». Зазначимо, що додавання попелу Добротвірської ТЕС до субстрату перегорілої породи спричиняє достовірне збільшення довжини кореня рослин, яке можна пояснити зниженням фітостресорності. Натомість, застосування тільки вермигумату та його внесення разом з попелом не вплинуло на морфометричні параметри суданської трави відносно контрольного субстрату перегорілої породи без додавання меліорантів (рис. 3.2).

Відомо, що хлорофіл *a* є чутливішим до впливу стрес-факторів, ніж хлорофіл *b*, що зумовлює зниження співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* за їхнього впливу [49; 53; 21].

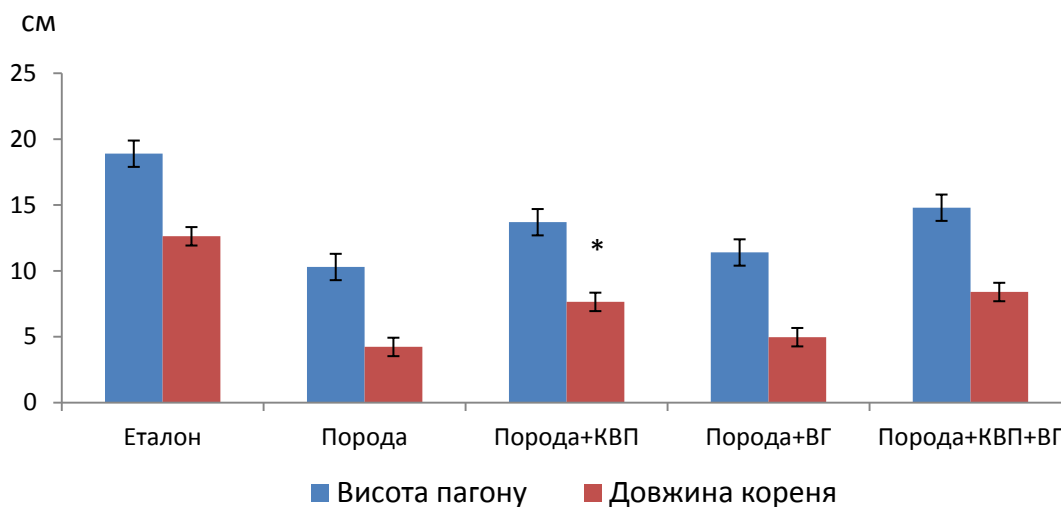


Рис. 3.2. Морфометричні параметри суданської трави після 21 доби росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу ТЕС та вермигумату (n=15), см

Примітка «\*» (тут і далі): достовірна відмінність значень субстрату/рослин досліджу (породи з додаванням попелу/вермигумату) відносно контролю (породи без додавання попелу/гумату) при  $p \leq 0,05$ .

У листках суданської трави, яку вирощували на субстраті перегорілої породи ми виявили знижений вміст хлорофілу *a* і хлорофілу *b*. Також за росту на цьому субстраті виявлено зменшене співвідношення вмісту хлорофілу *a* до хлорофілу *b*. Додавання попелу Добротвірської ТЕС спричинило збільшення вмісту хлорофілу *a*, що можна пояснити зниженням фітостресорності субстрату. В свою чергу, внесення вермигумату до субстрату перегорілої породи спричинило достовірне підвищення вмісту хлорофілу *a* і хлорофілу *b*, що зумовило збільшення співвідношення хлорофіл *a*/хлорофіл *b*. Застосування обох дослідних меліорантів теж спричинило підвищення вмісту хлорофілу *a* і збільшення співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* (табл. 3.1).

Вміст і співвідношення хлорофілів у листках суданської трави після 21 доби росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу ТЕС і вермигумату (n=3)

Варіант	Вміст, мг/г сухої маси		Хлорофіл <i>a</i> / Хлорофіл <i>b</i>
	Хлорофіл <i>a</i>	Хлорофіл <i>b</i>	
Еталон	2,63±0,04	0,99±0,02	2,66±0,02
Порода	1,53±0,02	0,77±0,05	1,99±0,10
Порода+КВП	1,81±0,02*	0,86±0,03	2,11±0,04
Порода+ВГ	1,78±0,03*	0,62±0,03*	2,89±0,11*
Порода+КВП+ВГ	2,07±0,04*	0,90±0,03	2,31±0,02*

Відомо, що фенольні сполуки здатні захищати рослинний організм від впливу несприятливих чинників. У багатьох роботах відмічено підвищення вмісту більшості рослинних фенолів в стресових умовах [162; 185]. Рослинні феноли мають ароматичні кільця, а також карбоксильні та гідроксильні групи, які зв'язують рухомі форми важких металів у малорухомі комплексні сполуки. Також фенольні сполуки володіють антиоксидантними властивостями, зокрема сповільнюють переоксидне окиснення ліпідів завдяки здатності зв'язувати алкоксильні радикали та можуть виступати донорами атомів Гідрогену [197]. У літературі описано підвищення вмісту фенольних сполук в рослинах суданської трави, які вирощували на субстраті перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» і його зниження за впливу поверхнево-активних речовин біологічного походження [25].

Наші дослідження виявили збільшення сумарного вмісту цих сполук в листках суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи відносно еталону (табл. 3.2), яке можна пояснити фітостресом, що крім літератури можна підтверджує негативний кореляційний зв'язок вмісту фенольних сполук із вмістом хлорофілу *a* (табл. 3.3).

Слід зазначити, що внесення тільки попелу чи вермигумату до перегорілої породи не вплинуло на сумарний вміст фенольних сполук. Натомість показано, що сумісне застосування обох вищезгаданих меліорантів достовірно знижує вміст цих сполук у рослинах суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи відвалу (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Вміст антоціанів і суми фенольних сполук у рослинах суданської трави після 21 доби росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу ТЕС та вермигумату (n=3), мг/г сухої маси

Варіант	Феноли	Антоціани
Еталон	510±25	8,93±0,27
Порода	763±40	15,5±0,3
Порода+КВП	647±17	13,7±0,3*
Порода+ВГ	702±15	14,4±0,3
Порода+КВП+ВГ	581±17*	11,8±0,2*

Відомо, що за впливу стрес-факторів у вакуолях рослин підвищується вміст антоціанів – фенольних сполук класу флавоноїдів, які мають хелатні властивості щодо важких металів, виконують функцію антиоксидантів і «світлофільтру» за умов інтенсивної інсоляції [166]. Здатність антоціанів до зв'язування металів дозволяє розглядати ці сполуки як потенційні ендogenousні хелатори за токсичної дії металів на рослини. Антоціани в рослинах здатні до одночасної асоціації з декількома металами і за фіторекультивациі відвалів, де спостерігається перевищення ГДК за декількома металами, утворення антоціанів є одним із захисних механізмів, які зумовлюють стійкість рослин [23].

Ми виявили підвищений вміст антоціанів у рослинах суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська». Зазначимо, що наявність фітостресу підтверджує

виявлена нами негативна кореляція вмісту цих сполук із вмістом хлорофілу *a*. Внесення вермигумату до субстрату перегорілої породи не спричинило достовірного впливу на вміст антоціанів. Натомість додавання попелу ТЕС і його додавання разом з вермигуматом достовірно зменшило вміст цих сполук в листках суданської трави, що свідчить про зниження фітостресу внаслідок чинників, які описані для пояснення нормалізації морфогенезу та вмісту хлорофілів (табл. 3.2, 3.3).

Таблиця 3.3

Коефіцієнти кореляції фізіологічних параметрів суданської трави  
за росту на субстраті перегорілої породи  
з додаванням попелу ТЕС і вермигумату (n=12)

	ЕПН	СН	ВП	ДК	Chl a	Chl b	А	ФС
ЕПН		-0,19	0,28	-0,08	0,39	0,12	-0,37	-0,44
СН	-0,19		0,51	0,52	0,17	0,58#	-0,33	-0,32
ВП	0,28	0,51		0,85	0,37	0,47	-0,46	-0,40
ДК	-0,08	0,52	0,85#		0,13	0,28	-0,20	-0,09
Chl a	0,39	0,17	0,37	0,13		0,39	-0,97#	-0,92#
Chl b	0,12	0,58#	0,47	0,28	0,39		-0,54	-0,54
А	-0,37	-0,33	-0,46	-0,20	-0,97#	-0,54		0,95#
ФС	-0,44	-0,32	-0,40	-0,09	-0,92#	-0,54	0,95#	

Примітка «#» – наявність достовірного кореляційного зв'язку при  $p \leq 0,05$ .

Умовні скорочення: ЕПН – енергія проростання насіння; СН – схожість насіння; ВП – висота пагону; ДК – довжина кореня; Chl a – хлорофіл *a*; Chl b – хлорофіл *b*; А – антоціани; ФС – фенольні сполуки.

Дані щодо визначення впливу попелу і вермигумату на фітостресорність субстрату перегорілої породи візуально узагальнені сторонами багатокутників пелюсткової діаграми (див. методику в розділі 2.11). Показано, що значення екофізіологічних параметрів суданської трави, яку вирощували на субстраті породного відвалу утворюють неправильний багатокутник, що за формою сильно відхиляється від рівносторонньої фігури, яку утворено значеннями рослин, що виростили за впливу сприятливих едафічних факторів. Також на рисунку можна побачити, що форма багатокутників, які побудовані за даними варіантів з додаванням до породи попелу чи вермигумату наближається до фігури

еталону. Зазначимо, що фігура, яка утворена значеннями варіанту із внесенням обох дослідних меліорантів більше подібна до багатокутника еталону, ніж ті, що побудовані за даними варіантів із внесенням тільки попелу чи гумату (рис. 3.3).

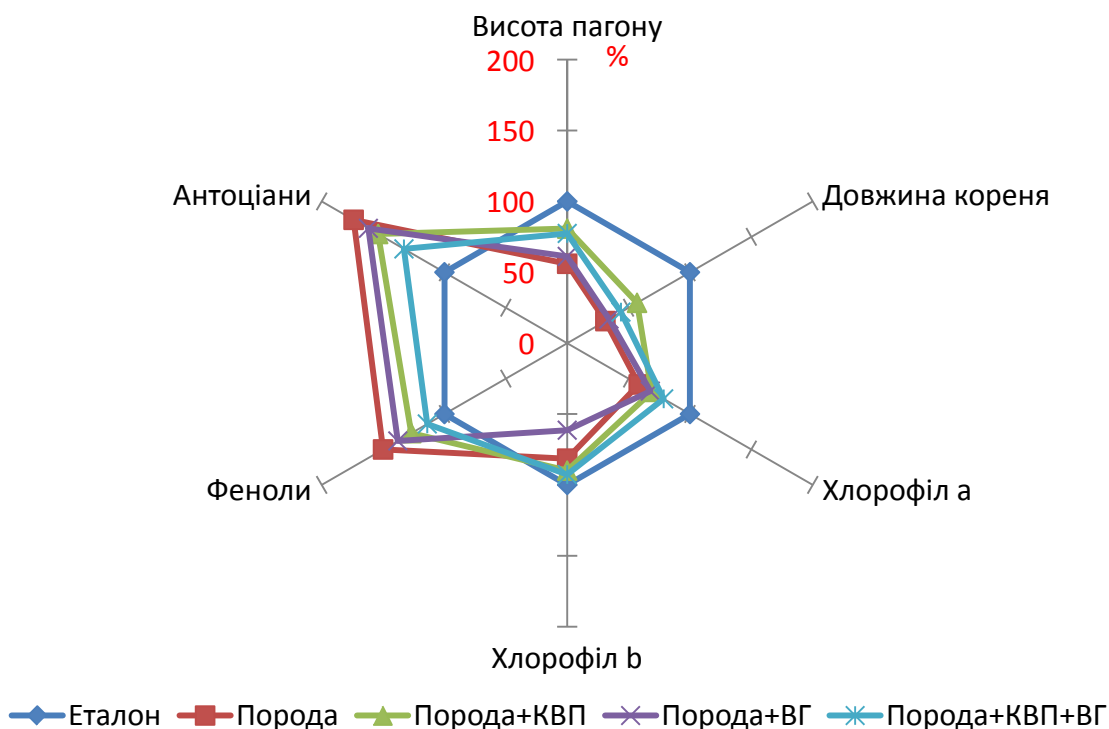


Рис. 3.3. Вплив попелу і вермигумату на екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи, %

Отже, субстрат перегорілої породи спричиняє значний фітострес рослин суданської трави, який проявляється в пригніченні морфогенезу, порушенні вмісту пігментів фотосинтезу і фенольних сполук. Додавання попелу і вермигумату призвело до оптимізації екофізіологічних параметрів. Встановлено, що сумісне застосування обох меліорантів знижує фітострес ефективніше, ніж тільки одного з них.

### 3.2. Морфометричні параметри, вміст хлорофілів і фенольних сполук суданської трави за росту на субстраті сіро-чорної неперегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і вермигумату Калію

У Південноафриканській республіці проводили дослідження, які показали високу стійкість насіння зернового сорго (*Sorghum bicolor* subsp. *bicolor* Moench) до стрес-факторів породних відвалів родовищ різних корисних копалин [175]. Наші дослідження теж показали високий рівень енергії проростання і схожості насіння суданської трави (*Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* Nees ex Steud) на субстраті неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська», що пояснює відсутність достовірного впливу меліорантів на його проростання (рис. 3.4).

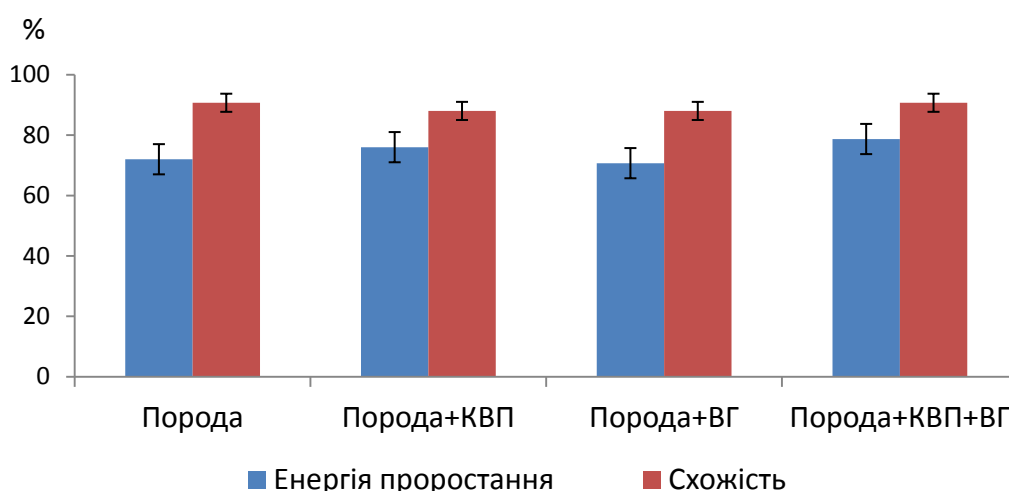


Рис. 3.4. Енергія проростання (4 доба) і схожість (10 доба) насіння суданської трави за впливу субстрату неперегорілої породи з додаванням попелу і вермигумату (n=75), %

Умовні скорочення (тут і далі): КВП – кам'яновугільний попіл; ВГ – вермигумат.

У літературі відмічено [106; 211] значне пригнічення росту пагонів і особливо коренів різних сортів зернового сорго *Sorghum bicolor* L. за впливу підвищених концентрацій важких металів. Зазначимо, що дослідження сіро-чорної неперегорілої породи відвалів Червоноградського ГПР виявили пригнічення морфогенезу рослин сорго алепського *Sorghum*

*halepense* L. [79] та суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* [25]. Наші дослідження також виявили значне пригнічення росту пагонів суданської трави у висоту та її коренів у довжину за вирощування на субстраті неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська». Внесення вермигумату не вплинуло на морфогенез суданської трави. В свою чергу додавання попелу спричинило достовірне збільшення висоти пагонів і довжини коренів, а його застосування разом з вермигуматом призвело до збільшення висоти пагона і довжини кореня рослин (рис. 3.5).

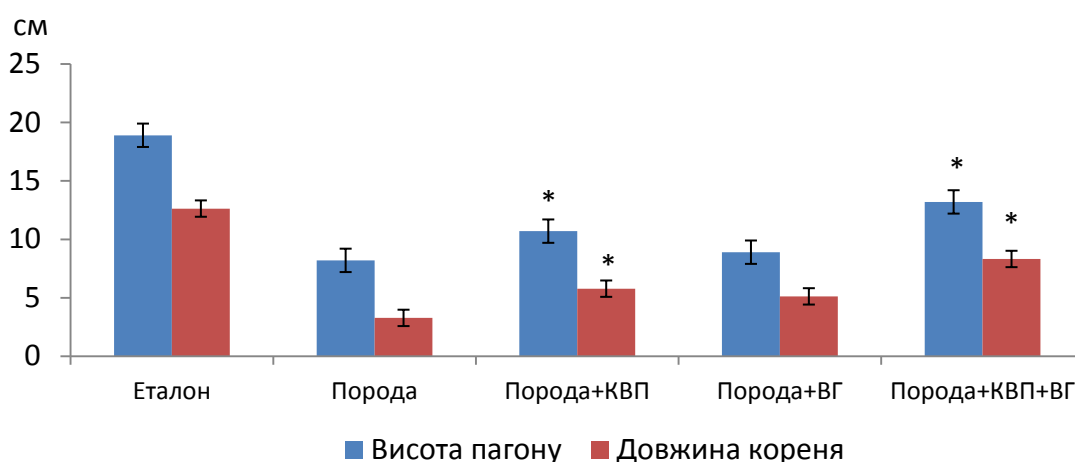


Рис. 3.5. Морфометричні параметри рослин суданської трави після 21 доби росту на субстраті неперегорілої породи за впливу попелу та вермигумату (n=15), см

Примітка «\*» (тут і далі): достовірна відмінність значень субстрату/рослин досліджу (породи з додаванням попелу/вермигумату) відносно контролю (породи без додавання попелу/гумату) при  $p \leq 0,05$ .

У роботі [233] відмічено зниження співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* в листках міскантусу гігантського за впливу високих концентрацій Цинку. Також описано хлороз листків і руйнування хлорофілів у рослин роду *Sorghum* за впливу підвищених концентрацій Кадмію та Цинку [106]. Дослідження, які проводили в Індії виявили, що додавання кам'яновугільного попелу ТЕС до стерилізованого ґрунту призводить до збільшення загального вмісту хлорофілів у листках кукурудзи. Відмічено, що найбільш оптимальна концентрація попелу – це



60 %, а при концентраціях більше 80 % відбувається пригнічення фотосинтезу і морфогенезу рослин [221]. У роботі [138] показано, що внесення лігногумату спричиняє підвищення вмісту хлорофілів у листках кукурудзи.

Наші дослідження показали, що в рослинах суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» відбувається значне зменшення вмісту хлорофілу *a* та незначне більшення вмісту хлорофілу *b*, що зумовило значне зниження співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b*. Додавання попелу до неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» збільшило вміст хлорофілу *a* та його співвідношення до вмісту хлорофілу *b*. В свою чергу, внесення вермигумату спричинило підвищення вмісту хлорофілу *a* та співвідношення хлорофіл *a*/хлорофіл *b* в листках суданської трави, яку вирощували на субстраті неперегорілої породи. Також відмічено, що сумісне застосування обох дослідних меліорантів підвищує вміст хлорофілу *a* та співвідношення хлорофіл *a*/хлорофіл *b* (табл. 3.4).

Таблиця 3.4

Вміст і співвідношення хлорофілів у рослинах суданської трави після 21 доби росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням попелу і вермигумату (n=3)

Варіант	Вміст, мг/г сухої маси		Хлорофіл <i>a</i> / Хлорофіл <i>b</i>
	Хлорофіл <i>a</i>	Хлорофіл <i>b</i>	
Еталон	2,63±0,04	0,83±0,01	3,17±0,02
Порода	0,95±0,02	0,97±0,03	0,98±0,04
Порода+КВП	1,16±0,03*	0,98±0,03	1,18±0,05*
Порода+ВГ	1,40±0,02*	0,56±0,04*	2,49±0,15*
Порода+КВП+ВГ	1,52±0,03*	0,71±0,02*	2,15±0,04*

У літературі описано підвищення вмісту антоціанів у пагонах двомісячних рослин гірчаку сахалінського *Polygonum sachalinensis* за росту

на чорній неперегорілій породі відвалів Червоноградського ГПР [23]. Наші дослідження виявили підвищений вміст антоціанів у рослинах суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи. Внесення вермигумату не вплинуло на вміст цих сполук. Натомість додавання попелу призвело до зниження вмісту антоціанів. Відмічено, що рослини, які виростили на субстраті породного відвалу із внесенням обох меліорантів містять менше антоціанів, ніж рослини, які вирощували на породі з додаванням тільки попелу чи вермигумату (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Вміст антоціанів і суми фенольних сполук у проростках суданської трави після 21 доби росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням попелу і вермигумату (n=3), мг/г сухої маси

Варіант	Антоціани	Феноли
Еталон	8,93±0,27	510±25
Порода	17,2±0,4	860±24
Порода+КВП	15,4±0,3*	780±16*
Порода+ВГ	16,6±0,3	762±17*
Порода+КВП+ВГ	14,0±0,3*	624±13*

Підвищення вмісту антоціанів і сумарного вмісту фенольних сполук внаслідок фітостресу крім літературних джерел [197; 166] підтверджує негативна кореляція вмісту цих сполук із вмістом хлорофілу *a* (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

Коефіцієнти кореляції фізіологічних параметрів рослин суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і вермигумату (n=12)

	ЕПН	СН	ВП	ДК	Chl a	Chl b	А	ФС
ЕПН		0,59#	0,07	0,01	0,22	0,11	-0,43	-0,44
СН	0,59#		0,10	-0,27	-0,06	0,06	-0,02	-0,05
ВП	0,07	0,10		0,86#	0,48	-0,38	-0,21	-0,49
ДК	0,01	-0,27	0,86#		0,43	-0,30	-0,20	-0,42
Chl a	0,22	-0,06	0,48	0,43		-0,79#	-0,68#	-0,90#
Chl b	0,11	0,06	-0,38	-0,30	-0,79#		0,16	0,51
А	-0,43	-0,02	-0,21	-0,20	-0,68#	0,16		0,89#
ФС	-0,44	-0,05	-0,49	-0,42	-0,90#	0,51	0,89#	

Примітка «#» – наявність достовірного кореляційного зв'язку при  $p \leq 0,05$ .

Умовні скорочення: ЕПН – енергія проростання насіння; СН – схожість насіння; ВП – висота пагону; ДК – довжина кореня; Chl a – хлорофіл a; Chl b – хлорофіл b; А – антоціани; ФС – фенольні сполуки.

Додавання попелу і вермигумату спричинило зниження вмісту фенольних сполук у рослинах суданської трави. Відмічено, що рослини суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням обох меліорантів утворюють менше фенольних сполук, ніж за додавання тільки попелу чи вермигумату (див. табл. 3.5).

На пелюстковій діаграмі (рис. 3.6) візуалізовано значне відхилення екофізіологічних параметрів суданської трави, яку вирощували на субстраті неперегорілої породи щодо показників рослин еталону. Сильне відхилення параметрів від оптимальних значень чітко відображає неправильний багатокутник, що відрізняються довжиною, співвідношеннями і положенням сторін щодо рівносторонньої фігури еталону. Показано, що дані варіантів з додаванням попелу і вермигумату утворюють фігури, які певною мірою наближаються до рівностороннього багатокутника еталону. Зазначимо, що багатокутник, який візуалізовує параметри суданської трави за росту на субстраті породи з додаванням обох дослідних меліорантів подібніший на фігуру еталону, ніж ті, що

відображають показники варіантів досліду з додаванням тільки попелу чи вермигумату.

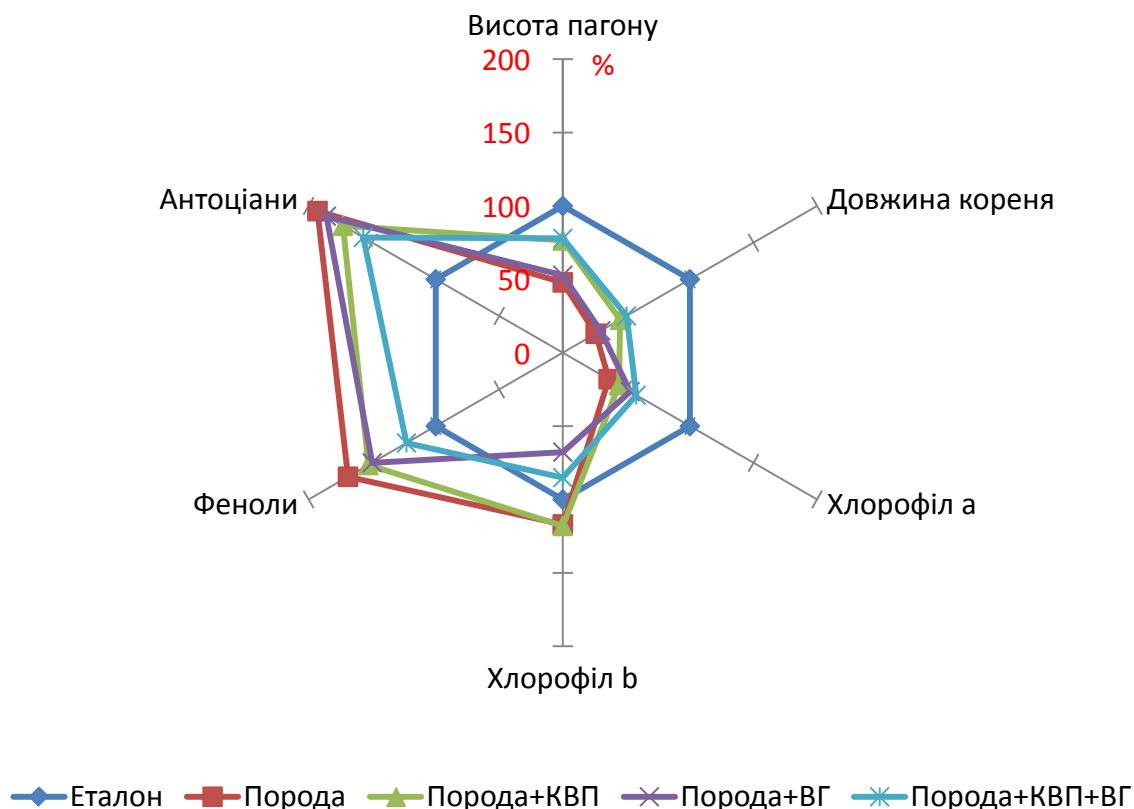


Рис. 3.6. Вплив попелу і вермигумату на екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи, %

Отже, рослини суданської трави за росту субстраті сіро-чорної неперегорілої породи зазнають сильного фітостресу, що проявився у пригніченні росту, змінах вмісту хлорофілів, антоціанів і суми фенольних сполук. Внесення попелу ТЕС і вермигумату Калію призводить до оптимізації екофізіологічних параметрів рослин. З'ясовано, що застосування обох меліорантів разом знижує фітострес в більшій мірі, ніж тільки одного з них.

**Обговорення розділу 3.** Фітостресорність субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» можна пояснити низьким рН [15],

дефіцитом макроелементів [48] і високим вмістом важких металів [161]. Оптимізацію екофізіологічних параметрів суданської трави за впливу попелу Добротвірської ТЕС можна пояснити наявністю в його складі лужних і лужноземельних металів [89], які знижують актуальну кислотність субстратів [119], що призводить до зниження рухомості важких металів [128]. Позитивний вплив вермигумату на екофізіологічні параметри досліджуваних рослин можна пояснити біологічною активністю гумінових і фульвових кислот, які містяться в гуматах [127].

**Висновок до розділу 3.** Субстрат сіро-чорної неперегорілої породи більш фітостресорний для суданської трави, ніж оранжево-червоної перегорілої. Внесення кам'яновугільного попелу ТЕС і вермигумату оптимізує екофізіологічні параметри завдяки зниженні фітостресорності субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська». Застосування обох дослідних меліорантів ефективніше, ніж тільки одного з них.

#### **Основні публікації дисертанта за матеріалами розділу:**

1. **Шпак Я. В.** Вплив біогумату на морфометричні параметри та вміст пігментів фотосинтезу в листках сорго за умов росту на субстратах породних відвалів вугільних шахт / Я. В. Шпак, В. І. Баранов, О. І. Терек. // Збірник тез 65-ї науково-технічної конференції «Наукові основи підвищення продуктивності та біологічної стійкості лісових та урбанізованих екосистем». – Львів, 2015. – С. 131-133.
2. **Шпак Я.** Фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу кам'яновугільного попелу та вермигумату / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Біологічні системи. – 2017. – №1. – Т. 9. – С. 138-143.

## РОЗДІЛ 4

### ФІТОСТРЕСОРНІСТЬ СУБСТРАТІВ ПОРОДНОГО ВІДВАЛУ ЗА ВПЛИВУ ПОПЕЛУ ТЕС В УМОВАХ МІКРОКОСМУ «ЗЕМНОВОДНА КОЛОНА»

Дослідивши стійкість суданської трави до впливу стрес-факторів субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» в умовах чашок Петрі, біотестування меліоративної здатності кам'яновугільного попелу Добровірської ТЕС проводили також в умовах мікрокосмів за впливу штучно обмеженої кількості екологічних факторів, що впливають на онтогенез.

#### 4.1. Морфометричні параметри, вміст пігментів фотосинтезу і фенольних сполук суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи з додаванням попелу ТЕС

У розділі 3.1 наші дослідження показали, що субстрат перегорілої породи пригнічує морфогенез суданської трави (див. рис. 3.3). За вирощування рослин на субстраті цієї породи в умовах мікрокосмів теж відмічено пригнічення росту пагонів у висоту, а коренів у довжину (рис. 4.1).

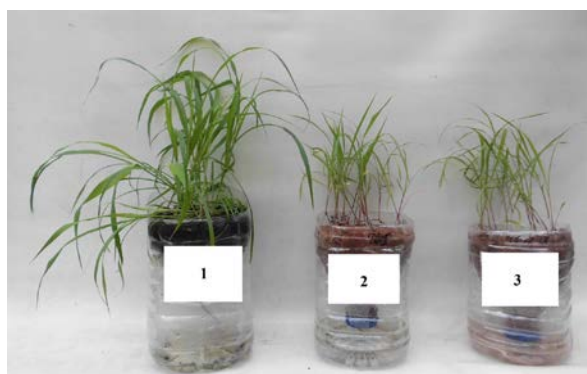


Рис. 4.1. Рослини суданської трави після 68 діб росту на субстраті еталону (1), перегорілої породи (2) та з додаванням до неї попелу ТЕС (3)

Внесення кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС до субстрату перегорілої породи спричинило достовірне збільшення довжини коренів суданської трави (рис. 4.2).

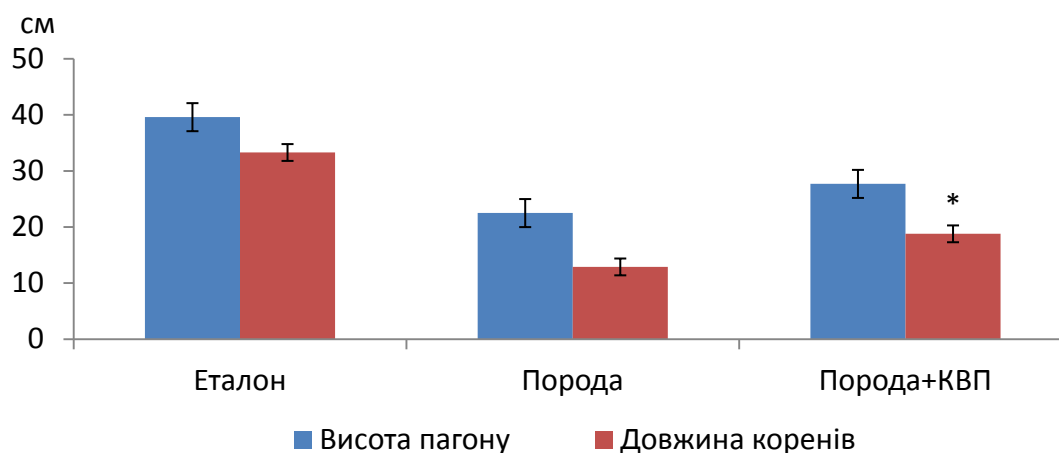


Рис. 4.2. Морфометричні параметри суданської трави після 68 днів росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу ТЕС (n=20)

Примітка «\*» (тут і далі): достовірна відмінність значень субстрату/рослин досліджу (породи з додаванням попелу) відносно контролю (породи без додавання попелу) при  $p \leq 0,05$ .

У листках суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи відмічено зниження вмісту хлорофілу *a* і підвищення вмісту хлорофілу *b*, що зумовлює зниження співвідношення хлорофіл *a*/хлорофіл *b*. Внесення попелу ТЕС до породи підвищило вміст хлорофілу *a*, що призвело до певної оптимізації співвідношення цих пігментів фотосинтезу (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Вміст і співвідношення хлорофілів у листках суданської трави після 68 днів росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу ТЕС (n=4)

Варіант	Вміст, мг/г сухої маси		Хлорофіл <i>a</i> /
	Хлорофіл <i>a</i>	Хлорофіл <i>b</i>	Хлорофіл <i>b</i>
Еталон	3,53±0,03	1,41±0,08	2,50±0,11
Порода	2,26±0,06	1,86±0,05	1,21±0,05
Порода+Попіл	2,64±0,06*	1,67±0,11	1,59±0,12*

Також за росту суданської трави на субстраті перегорілої породи виявлено підвищення вмісту антоціанів і сумарного вмісту фенольних сполук щодо рослин, які вирощували на ґрунтосуміші еталону. З'ясовано, що внесення кам'яновугільного попелу зменшує сумарний вміст фенольних сполук, а також антоціанів у листках суданської трави (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Вміст антоціанів і суми фенольних сполук в листках суданської трави після 68 діб росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу ТЕС (n=4), мг/г сухої маси

Варіант	Антоціани	Феноли
Еталон	8,08±0,27	558±25
Порода	13,6±0,6	1025±45
Порода+Попіл	10,8±*0,4	795±83*

Також відмічено наявність негативної кореляції вмісту антоціанів і сумарного вмісту фенолів із вмістом хлорофілу *a*, що можна пояснити фітостресом (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Коефіцієнти кореляції фізіологічних параметрів суданської трави, вирощеної на субстраті породного відвалу за впливу попелу ТЕС (n=8)

	ВП	ДК	Chl a	Chl b	A	ФС
ВП		0,15	0,37	-0,54	-0,49	-0,24
ДК	0,15		0,42	-0,33	-0,24	-0,10
Chl a	0,37	0,42		-0,84#	-0,90#	-0,85#
Chl b	-0,54	-0,33	-0,84#		0,64	0,71#
A	-0,49	-0,24	-0,90#	0,64		0,84#
ФС	-0,24	-0,10	-0,85#	0,71#	0,84#	

Примітка «#» – наявність достовірного кореляційного зв'язку при  $p \leq 0,05$ .

Умовні скорочення: ВП – висота пагону; ДК – довжина кореня; Chl a – хлорофіл *a*; Chl b – хлорофіл *b*; А – антоціани; ФС – фенольні сполуки.



На пелюстковій діаграмі у формі неправильного багатокутника, що значно відрізняється від рівносторонньої фігури еталону візуально узагальнено вплив субстрату оранжево-червоної перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» на морфометричні та біохімічні показники суданської трави. На рисунку чітко видно, що фігура, яка побудована за даними варіанту з додаванням до породи кам'яновугільного попелу за формою наближається до рівностороннього багатокутника еталону, що вказує на зменшення фітостресорності субстрату (рис. 4.3).

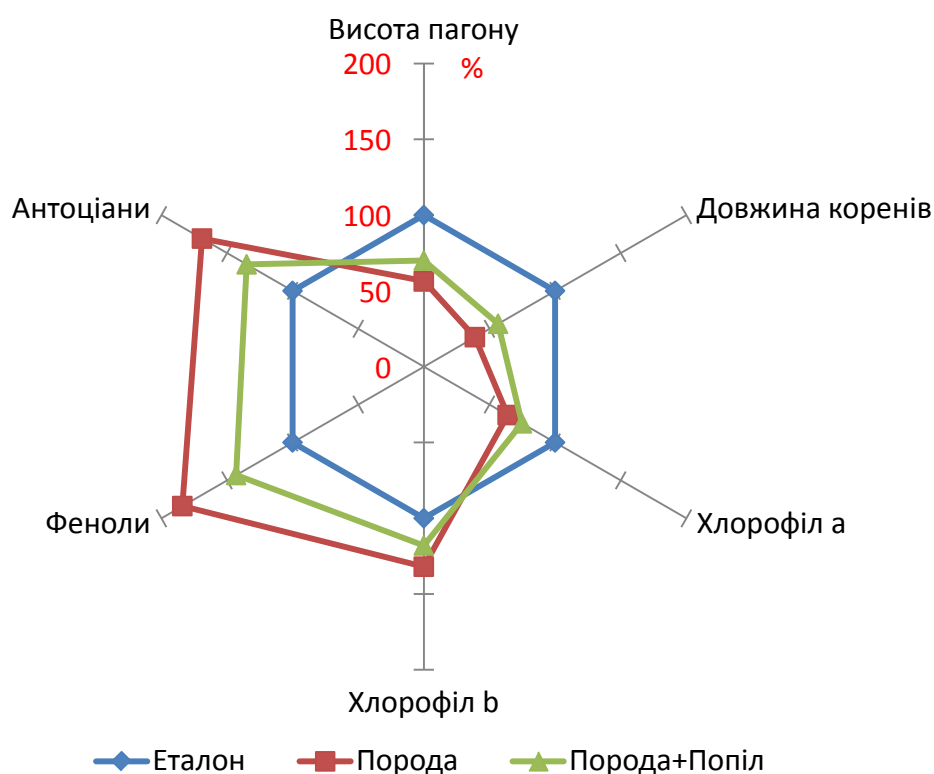


Рис. 4.3. Вплив попелу на екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи, %

Отже, рослини суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) протягом 68 діб росту в мікрокосмах на субстраті оранжево-червоної перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» зазнають сильного фітостресу, що проявляється в пригніченні їхросту, змінах вмісту пігментів фотосинтезу, антоціанів і суми фенольних сполук. Встановлено, що внесення кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС

знижує фітостресорність перегорілої породи, що призводить до значної нормалізації екофізіологічних параметрів досліджуваних рослин.

#### **4.2. Екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням попелу ТЕС**

У розділі 3.2 наші дослідження показали, що субстрат сіро-чорної неперегорілої породи сильно пригнічує морфогенез суданської трави, яку вирощували в чашках Петрі (див. рис. 3.5). За її росту на субстраті цієї породи в умовах мікрокосмів теж виявлено значне пригнічення росту коренів у довжину, а пагонів у висоту (рис. 4.4). Додавання кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС до субстрату породного відвалу призвело до збільшення довжини коренів суданської трави (рис. 4.5).

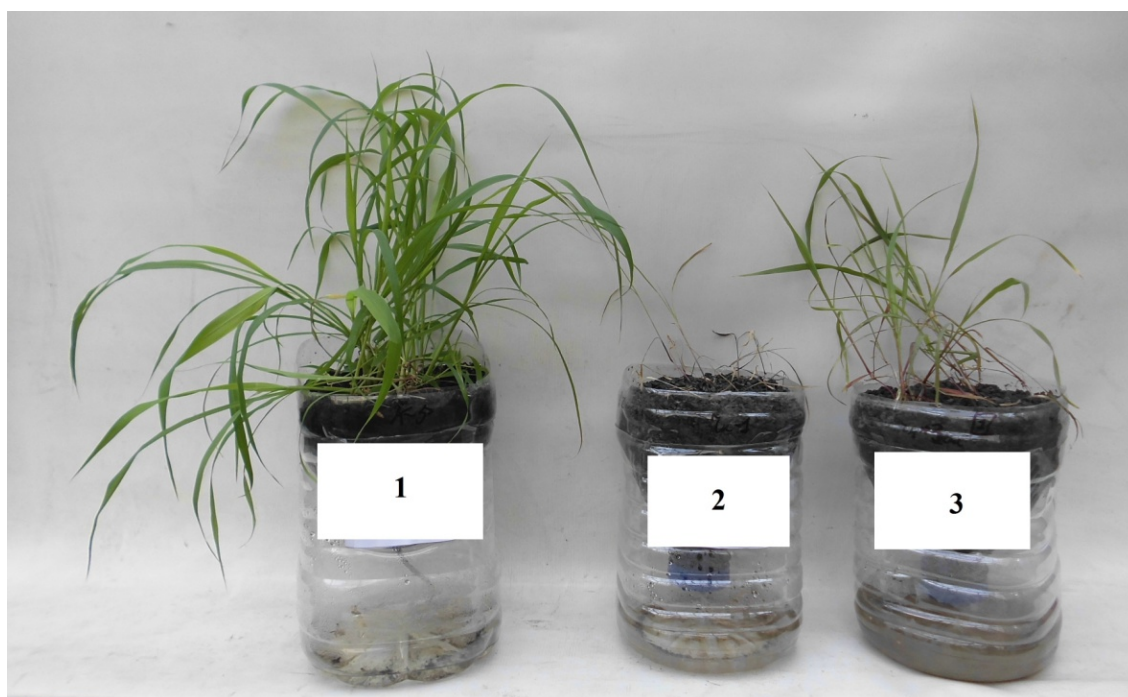


Рис. 4.4. Рослини суданської трави після 68 діб росту на субстраті еталону (1), неперегорілої породи (2) та з додаванням до неї попелу ТЕС (3)

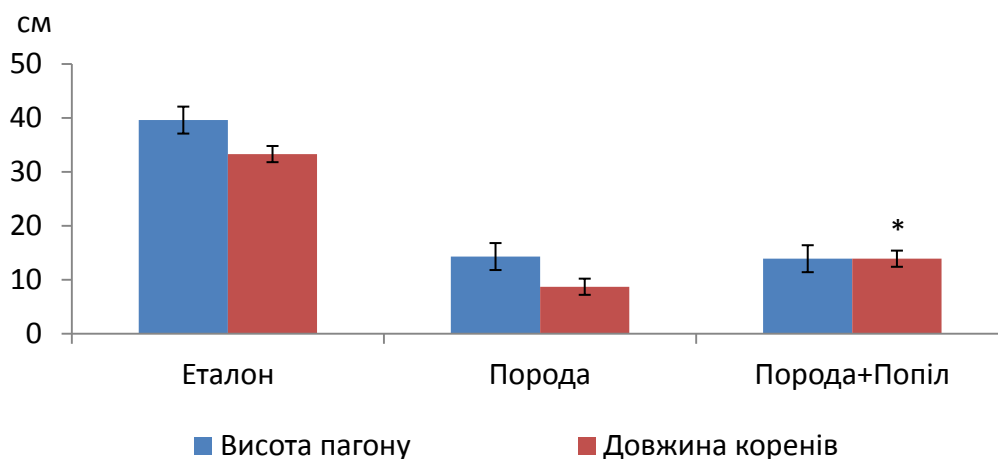


Рис. 4.5. Морфометричні параметри суданської трави після 68 днів росту на субстраті неперегорілої породи за впливу попелу ТЕС (n=20)

Примітка «\*» (тут і далі): достовірна відмінність значень субстрату/рослин досліджу (породи з додаванням попелу) відносно контролю (породи без додавання попелу) при  $p \leq 0,05$ .

У листках суданської трави після росту на субстраті породного відвалу виявлено знижений вміст хлорофілу *a*, підвищений вміст хлорофілу *b*, що зменшило співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* (табл. 4.4). Додавання попелу ТЕС до субстрату неперегорілої породи збільшило вміст хлорофілу *a*, зменшило вміст хлорофілу *b*, що спричинило підвищення співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Вміст і співвідношення хлорофілів у листках суданської трави після 68 днів росту на субстраті неперегорілої породи за впливу попелу ТЕС (n=4)

Варіант	Вміст, мг/г сухої маси		Хлорофіл <i>a</i> / Хлорофіл <i>b</i>
	Хлорофіл <i>a</i>	Хлорофіл <i>b</i>	
Еталон	3,53±0,03	1,41±0,08	2,50±0,11
Порода	1,65±0,05	2,08±0,15	0,80±0,04
Порода+Попіл	2,53±0,04*	1,52±0,08*	1,67±0,99*

У листках суданської трави, яку вирощували на субстраті неперегорілої породи виявлено збільшення вмісту антоціанів і сумарного вмісту фенольних сполук щодо рослин еталону. Також з'ясовано, що внесення до неї попелу ТЕС знижує вміст цих сполук у листках суданської трави (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Вміст антоціанів і суми фенольних сполук в листках суданської трави після 68 діб росту на субстраті неперегорілої породи за впливу попелу ТЕС (n=4), мг/г сухої маси

Варіант	Антоціани	Феноли
Еталон	8,08±0,27	558±25
Порода	15,3±0,3	1284±28
Порода+Попіл	12,7±0,4*	1106±30*

Крім того, знайдено негативний кореляційний зв'язок вмісту антоціанів і сумарного вмісту фенольних сполук із вмістом хлорофілу *a*, що свідчить про фітострес (табл. 4.6).

Таблиця 4.6

Коефіцієнти кореляції фізіологічних параметрів суданської трави, вирощеної на субстраті неперегорілої породи за впливу попелу ТЕС (n=8)

	ВП	ДК	Chl a	Chl b	A	ФС
ВП		0,58	-0,06	-0,03	0,08	0,09
ДК	0,58		0,31	-0,32	-0,36	-0,43
Chl a	-0,06	0,31		-0,93#	-0,98#	-0,96#
Chl b	-0,03	-0,32	-0,93#		0,89#	0,89#
A	0,08	-0,36	-0,98#	0,89#		0,96#
ФС	0,09	-0,43	-0,96#	0,89#	0,96#	

Примітка «#» – наявність достовірного кореляційного зв'язку при  $p \leq 0,05$ .

Умовні скорочення: ВП – висота пагону; ДК – довжина кореня; Chl a – хлорофіл *a*; Chl b – хлорофіл *b*; A – антоціани; ФС – фенольні сполуки.

На пелюстковій діаграмі за допомогою фігури, що за формою значно відхиляється від рівностроннього багатокутника еталону

відображено негативний вплив субстрату сіро-чорної неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» на розмір органів, вміст пігментів фотосинтезу та фенольних сполук у рослинах суданської трави. Видно, що фігура, яка побудована згідно даних варіанту з додаванням попелу ТЕС до субстрату породного відвалу наближається до рівностороннього багатокутника еталону, що свідчить про зниження фітостресу (рис. 4.6).

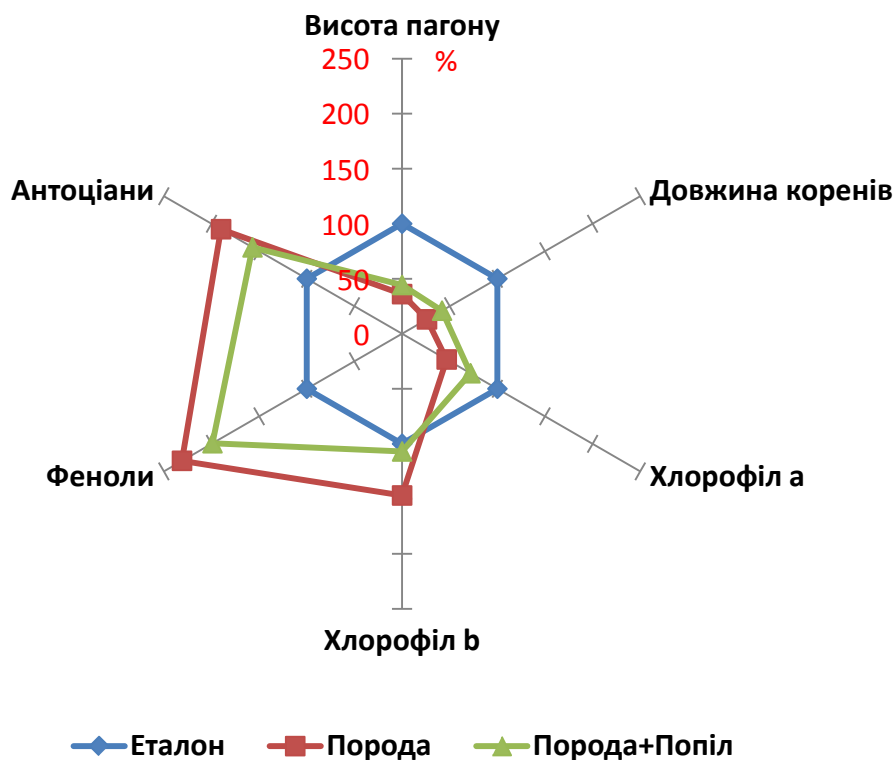


Рис. 4.6. Вплив попелу на оптимальність екофізіологічних параметрів суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи, %

Отже, рослини суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.) протягом 68 діб росту в умовах мікрокосмів на субстраті сіро-чорної неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» зазнають сильного пригнічення росту та відхилень вмісту хлорофілів і фенольних сполук внаслідок його високої фітостресорності. З'ясовано, що кам'яновугільний попіл Добротвірської ТЕС знижує фітостресорність

неперегорілої породи, що спричиняє нормалізацію екофізіологічних параметрів досліджуваних рослин.

**Обговорення розділу 4.** Морфометричний аналіз [79], а також відхилення від норми вмісту хлорофілів [212], антоціанів [166] і суми фенольних сполук [162; 185] в листках суданської трави свідчить про високу фітостресорність субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська». Негативний вплив оранжево-червоної перегорілої і свіжовідсипаної сіро-чорної породи відвалу на екофізіологічні параметри суданської трави можна пояснити низьким рН [15], високим вмістом токсичних металів [161] і низьким вмістом макроелементів [48]. Певну нормалізацію екофізіологічних процесів суданської трави, яку вирощували на субстратах породного відвалу з додаванням попелу Добротвірської ТЕС можна пояснити присутністю Кальцію і Калію в його складі [89], які підвищують рН [119], що призводить до зниження рухомості важких металів [128] і покращення доступності Фосфору для кореневої системи рослин [204].

**Висновок до розділу 4.** В умовах мікрокосмів субстрат сіро-чорної неперегорілої породи фітостресорніший для рослин суданської трави, ніж оранжево-червоної перегорілої породи. Внесення кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС до породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» значно оптимізує екофізіологічні параметри *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Nees ex Steud.)

#### **Основні публікації дисертанта за матеріалами розділу:**

1. **Шпак Ю.** Modeling of chromium effect on ecophysiological parameters of soil-plant system / Y. Shpak, S. Rudenko. // *Studia Biologica*. – 2015. – №2. – V. 11. – P. 115-124.
2. **Шпак Я.** Стійкість сорго трав'янистого (*Sorghum vulgare* var. *sudanense* Hitch.) до умов породних відвалів породних відвалів кам'яновугільних шахт / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Матеріали XI Наукової

конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку». – Шацьк, 2015. – С. 115-116.

3. **Шпак Я.** Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу додавання кам'яновугільного попелу / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – 2016. – №74. – С. 127-135.
4. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Моделювання впливу золи Добротвірської ТЕС на фітотоксичність породних відвалів вугільних шахт за допомогою сорго трав'янистого / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Збірник тез XII Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології». – Львів, 2016. – С. 346-347.

## РОЗДІЛ 5

### **ВПЛИВ ПОПЕЛУ ДОБРОТВІРСЬКОЇ ТЕС І ГУМАТУ КАЛІЮ «ГКВ-45» НА ФІТОСТРЕСОРНІСТЬ СУБСТРАТІВ ПОРОДНОГО ВІДВАЛУ**

Після біотестування впливу фізико-хімічних меліорантів на фітостресорність субстратів породних відвалів в умовах чашок Петрі та мікрокосмів ми провели напівпольовий дослід з вирощування суданської трави у горщиках під відкритим небом для надходження атмосферних опадів і прямого сонячного світла в систему субстрат-рослина.

#### **5.1. Вміст пластидних пігментів і морфометричні параметри суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і гумату Калію**

У попередніх розділах показано пригнічення росту суданської трави за впливу субстрату перегорілої породи (див. рис. 3.1, 4.2), що можна пояснити високим вмістом важких металів [161] і дефіцитом макроелементів [48] у породних відвалах Червоноградського ГПР.

Крім того, в літературі описано негативний вплив дефіциту макроелементів на ріст стебел озимої пшениці [41], підвищених концентрацій Плюмбуму на онтогенез рослин вівса та ячменю [47], а також Хрому на фізіологічні параметри кукурудзи [132].

Наші дослідження виявили зменшення площі листків, довжини і маси коренів та незначне підвищення висоти стебла суданської трави за росту на субстраті оранжево-червоної перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» щодо рослин, які вирощували на умовно чистій ґрунтосуміші еталону в напівпольових умовах (рис. 5.1).





Рис. 5.1. Корені суданської трави після 95 діб росту на субстраті перегорілої породи (1), з додаванням до нього попелу ТЕС (2), гумату Калію (3) та їх обох разом (4)

Внесення кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС до субстрату перегорілої породи ЦЗФ «Червоноградська» спричинило достовірне збільшення маси коренів і зниження висоти стебла суданської трави за межу стандартного відхилення щодо рослин еталону.

В літературі описано позитивний вплив гумінових препаратів на акумуляцію біомаси кукурудзи за росту на засоленому ґрунті [160], а також на площу листової поверхні вівса за росту на породному відвалі вуглевидобутку [63]. Ми показали, що внесення гумату Калію «ГКВ-45» у субстрат породного відвалу спричиняє достовірне зниження висоти стебла на фоні збільшення довжини та маси коренів досліджуваних рослин. Слід зазначити, що внесення до породи попелу ТЕС разом з гуматом Калію сильніше збільшує довжину й масу коренів суданської трави, ніж застосування тільки одного з цих меліорантів (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Морфометричні параметри суданської трави після 95діб росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу і гумату (n=25)

Варіант	Довжина коренів, см	Маса сухих коренів, мг	Висота стебла, см	Площа листків, см <sup>2</sup>
Еталон	19,7±1,1	296±23	49,8±2,0	78,2±4,1
Порода	10,6±0,6	101±10	55,4±1,7	33,6±1,8
Порода+КВП	10,9±0,4	132±10*	50,7±1,7	34,4±1,6
Порода+ГК	14,4±0,7*	188±11*	48,1±2,2*	33,7±1,6
Порода+КВП+ГК	16,5±0,6*	282±9*	46,7±1,7*	71,8±2,0*

Примітка «\*» (тут і далі): достовірна відмінність значень субстрату/рослин досліду (породи з додаванням попелу/гумату) відносно контролю (породи без додавання попелу/гумату) при  $p \leq 0,05$ .

З літератури відомо, що забарвлення хлорофілів зумовлене чотирма атомами Нітрогену, що утворюють центральну металозв'язувальну структуру з тетрапірольними макрокільцями, які зазвичай зайняті іоном  $Mg^{2+}$ . Центральний іон металу та периферичні групи сильно впливають на параметри основного та збудженого стану, перетворення сонячної енергії та фотостабільності пігментів [193].

**Феофітини** – це молекули хлорофілу, які не мають  $Mg^{2+}$  в центрі, а процес заміщення його іонів двома іонами  $H^+$  називається феофітинізація. Утворення феофітинів є першою стадією руйнування хлорофілу внаслідок старіння з подальшим вивільненням фітольних груп. Спека, сильна кислотність, надмірна інсоляція і високий вміст важких металів спричиняють феофітинізацію хлорофілів. Перетворення феофітину *a* на хлорофіл *a* відбувається в 2,5-10 разів швидше, ніж хлорофілу *b* на феофітин *b*, що зумовлює зниження співвідношення хлорофіл *a*/хлорофіл *b* [212; 218].

**Каротиноїди** – це необхідні та незамінні пігменти фотосинтезу. Вони поглинають енергію синьо-зеленого світла, яку передають хлорофілам, що дозволяє розширити діапазон довжини хвиль для потреб фотосинтезу [149]. Також відомо, що синглетний Оксиген, який утворюється у хлоропластах за впливу стрес-факторів окиснює каротиноїди, що зумовлює утворення альдегідів, кетонів, ендопереоксидів і лактонів. Деякі з цих каротиноїдів, зокрема  $\beta$ -циклоцетрал, який виникає внаслідок окиснення  $\beta$ -каротину є біологічно активною сполукою, що індукує експресію генів, які відповідають за адаптацію до умов стресу [150].

За росту суданської трави на субстраті перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» ми виявили значне підвищення вмісту феофітину *a* та суми каротиноїдів на фоні зниження вмісту хлорофілу *a* та хлорофілу *b*, яке зумовило зниження співвідношень хлорофіл *a*/хлорофіл *b*, хлорофіл *a*/феофітин *a* та суми хлорофілів до суми каротиноїдів.

Додавання попелу ТЕС до субстрату перегорілої породи спричинило достовірне зниження вмісту феофітину *a* та суми каротиноїдів на фоні достовірного підвищення вмісту хлорофілу *a*, що зумовило достовірне збільшення співвідношень хлорофіл *a*/феофітин *a* та суми хлорофілів до суми каротиноїдів.

У роботі [138] відмічено позитивний вплив гумінових препаратів на вміст хлорофілу в листках кукурудзи. В листках суданської трави, яку вирощували на субстраті перегорілої породи з додаванням гумату ми також виявили підвищення вмісту хлорофілу *a* на фоні зниження вмісту феофітину *a* та суми каротиноїдів. Це зумовило достовірне підвищення співвідношень хлорофіл *a*/хлорофіл *b* і хлорофіл *a*/феофітин *a*. Внесення гумату разом з попелом до субстрату перегорілої породи призвело до підвищення вмісту хлорофілу *a*, зниження вмісту феофітину *a*, що зумовило збільшення співвідношень: хлорофіл *a*/хлорофіл *b*, хлорофіл *a*/феофітин *a* і суми хлорофілів до суми каротиноїдів (рис. 5.2; табл. 5.2).

Вміст пластидних пігментів у листках суданської трави  
після 95 діб росту на субстраті перегорілої породи  
за впливу попелу і гумату (n=5), мг/г сухої маси

Варіант	Хлорофіл <i>a</i>	Феофітин <i>a</i>	Хлорофіл <i>b</i>	Сума Каротиноїдів
Еталон	7,81±0,05	1,75±0,03	3,29±0,08	2,43±0,03
Порода	5,72±0,06	3,62±0,10	2,99±0,09	3,90±0,09
Порода+КВП	6,63±0,04*	2,48±0,06*	2,96±0,07	3,39±0,03*
Порода+ГК	6,21±0,08*	2,99±0,02*	2,93±0,07	3,85±0,10
Порода+КВП+ГК	6,87±0,04*	2,13±0,12*	2,97±0,06	3,83±0,10

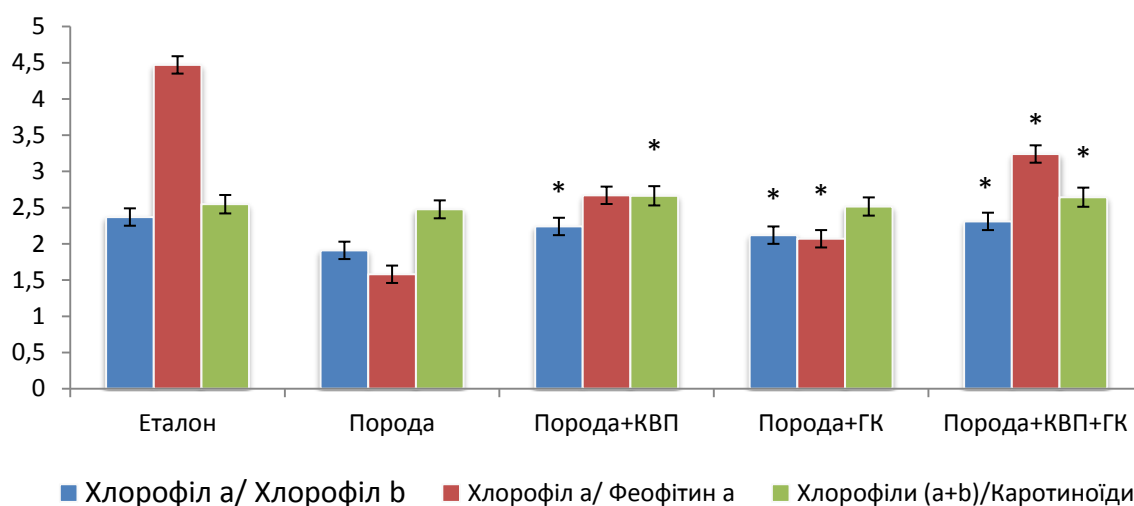


Рис 5.2. Співвідношення вмісту пластидних пігментів у листках суданської трави після 95 діб росту на субстраті перегорілої породи за впливу попелу і гумату (n=5)

Крім того знайдено негативний кореляційний зв'язок вмісту феофітину *a* та суми каротиноїдів із вмістом хлорофілу *a*, що свідчить про фітостресорність субстрату перегорілої породи (табл. 5.3).

Коефіцієнти кореляції екофізіологічних параметрів суданської трави,  
вирощеної на субстраті перегорілої породи  
за впливу попелу і гумату (n=20)

	ДК	МК	ВС	ПЛ	Chl a	Pheo a	Chl b	Car T
ДК		-0,39	0,28	0,34	-0,22	0,20	0,45#	-0,19
МК	-0,39		-0,05	0,23	0,38	-0,39	-0,36	0,05
ВС	0,28	-0,05		0,04	-0,05	0,05	0,41	0,07
ПЛ	0,34	0,23	0,04		0,06	-0,10	0,11	-0,14
Chl a	-0,22	0,38	-0,05	0,06		-0,99#	-0,07	-0,45#
Pheo a	0,20	-0,39	0,05	-0,10	-0,99#		0,03	0,43
Chl b	0,45#	-0,36	0,41	0,11	-0,07	0,03		-0,14
Car T	-0,19	0,05	0,07	-0,14	-0,45#	0,43	-0,14	

Примітка «#» – наявність достовірного кореляційного зв'язку при  $p \leq 0,05$ .

Умовні скорочення: ДК – довжина коренів; МК – маса коренів; ВС – висота стебла;  
ПЛ – площа листків; Chl a – хлорофіл *a*; Pheo a – феофітин *a*; Chl b – хлорофіл *b*;  
Car T – сума каротиноїдів.

Нормалізацію вмісту пігментів фотосинтезу і морфометричних параметрів рослин, вирощених на субстраті породних відвалів з додаванням попелу Добротвірської ТЕС можна пояснити можливим підвищенням рН, яке знижує рухомість більшості токсичних металів [128], що негативно впливають на ріст, перебіг різних фізіологічних процесів, зокрема фотосинтезу [74; 129; 176; 130]. Крім того, підвищення рН збільшує вміст доступного для рослин Фосфору [204], який необхідний для утворення ферментів і високоенергетичних сполук, які беруть участь в процесі фотосинтезу [54; 184; 117]. В свою чергу зниження фітостресорності субстратів породних відвалів за впливу гумату Калію «ГКВ-45» можна пояснити присутністю гумінових речовин, які підвищують стресостійкість, покращують рухомість більшості макроелементів, а також зв'язують токсичні метали в малорухомі комплексні сполуки [180; 226; 187; 206].

На пелюстковій діаграмі (рис. 5.3) у вигляді фігури, що за формою значно відхиляється від рівностороннього багатокутника даних еталону відображено відхилення екофізіологічних параметрів суданської трави від

оптимальних показників внаслідок фітостресорності субстрату перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська». Показано, що дані варіантів з додаванням попелу і гумату утворюють фігури, які певною мірою наближаються до рівностороннього багатокутника еталону. Зазначимо, що багатокутник, який візуалізовує параметри суданської трави за росту на субстраті породи з додаванням обох дослідних меліорантів подібніший на фігуру еталону, ніж ті, що відображають показники варіантів з додаванням тільки попелу чи гумату.

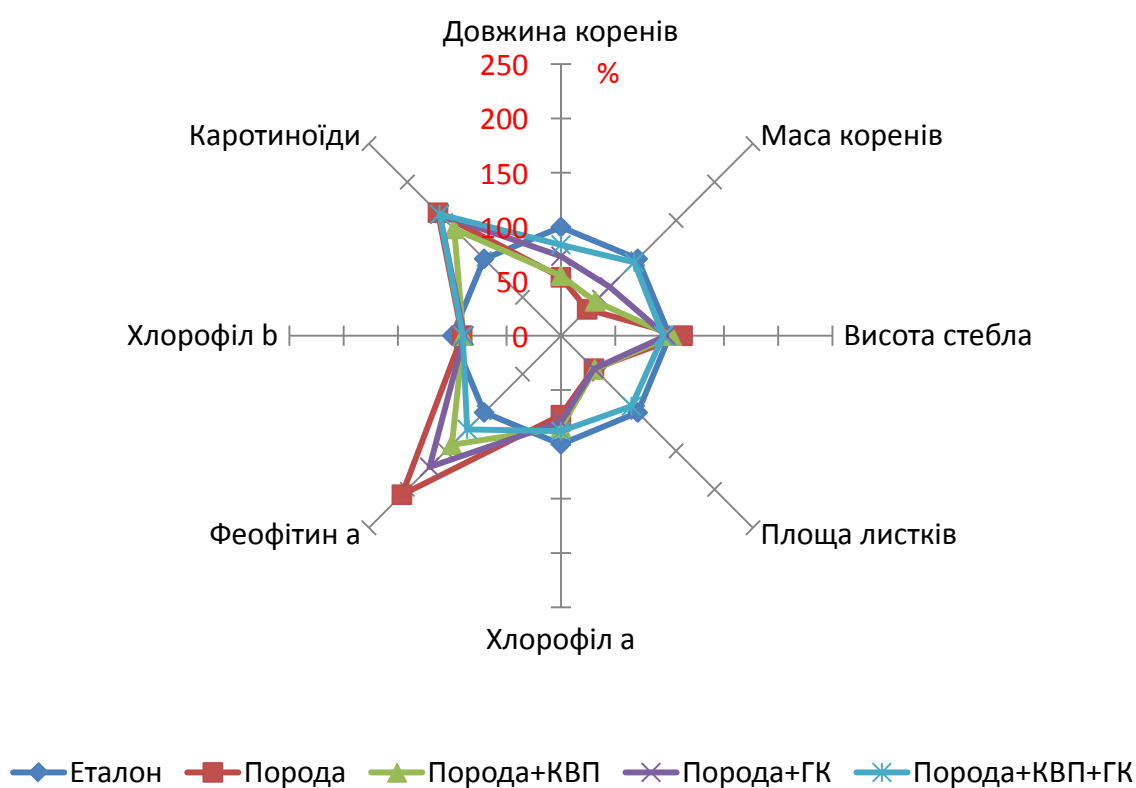


Рис. 5.3. Вплив попелу і гумату на екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті перегорілої породи, %

Отже, рослини суданської трави, які протягом 95 діб вирощували на субстраті перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» в напівпольових умовах зазнають значного пригнічення росту і порушень вмісту пластидних пігментів внаслідок його фітостресорності. Внесення

кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» до перегорілої породи значно нормалізує екофізіологічні параметри досліджуваних рослин, а їх сумісний вплив ефективніший, ніж роздільний.

## **5.2. Екофізіологічні параметри субстрату неперегорілої породи, суданської трави та крес-салату за впливу попелу ТЕС і гумату Калію**

### **5.2.1. Актуальна кислотність субстрату неперегорілої породи за впливу попелу ТЕС, гумату Калію та вирощування суданської трави**

Актуальна кислотність більшою мірою впливає на адсорбцію гідролізованих форм металів, ніж їх вільних іонів. Крім того, рН ґрунтового розчину – це важливий параметр, що безпосередньо впливає на сорбцію/десорбцію, осадження/розчинення, утворення комплексних сполук та окисно-відновні реакції [136].

Відомо, що кам'яновугільний попіл ТЕС має здебільшого лужне значення рН і використовуються для нейтралізації кислотності відвалів вуглевидобутку [216; 107].

Наші дослідження показали, що додавання 5 % попелу Добротвірської ТЕС до субстрату неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» спричиняє достовірне підвищення його рН. Також у цьому попелі виявлено  $22,0 \pm 1,9$  мг/кг рухомого Калію і  $237 \pm 14$  мг/кг рухомого Кальцію [97], які нейтралізують кислотність [198]. Крім того, знайдено позитивну кореляцію вмісту цих макроелементів з актуальною кислотністю субстрату породного відвалу (див. табл. 5.10, 5.11).

Слід зазначити, що препарати на основі гумату Калію є водночас хелатними добривами, стимуляторами росту рослин і меліорантами ґрунтів [122]. У літературі описано підвищення рН кислих субстратів, за впливу гумінових препаратів [154; 109].

У процесі наших досліджень також виявлено підвищення рН субстрату неперегорілої породи внаслідок внесення гумату Калію «ГКВ-45». З'ясовано, що субстрати неперегорілої породи з додаванням обох меліорантів мають вищий рівень рН, ніж із додаванням тільки попелу чи гумату (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Актуальна кислотність субстрату неперегорілої породи за впливу попелу ТЕС, гумату Калію і 95 діб вирощування суданської трави (n=5), рН

Субстрат	Вирощування суданської трави	
	До	Після
Еталон	6,22±0,06	6,47±0,05
Порода	3,63±0,06	4,23±0,04
Порода+Попіл	4,34±0,05*	4,85±0,05*
Порода+Гумат	3,95±0,05*	4,52±0,06*
Порода+Попіл+Гумат	4,44±0,04*	5,23±0,05*

Примітка «\*» (тут і далі, якщо не зазначено інше): достовірна відмінність значень субстрату/рослин дослідів (породи з додаванням попелу ТЕС/гумату Калію) відносно контролю (породи без додавання попелу/гумату) при  $p \leq 0,05$ .

Крім того, відмічено підвищення рН субстрату породного відвалу після 95 діб росту *S. bicolor* subsp. *drummondii*, яке можна пояснити корневими виділеннями рослин [171]. З'ясовано, що вирощування суданської трави підвищує рН субстрату неперегорілої породи більшою мірою, ніж ґрунтосуміші еталону (рис. 5.4).

Між вмістом металів у ґрунтах і рослинах не завжди можна спостерігати пряму кореляцію, оскільки їх надходження до рослин зумовлено не тільки валовим вмістом, а й концентрацією їхніх рухомих форм. Деякі фізико-хімічні властивості ґрунту теж суттєво впливають на доступність важких металів для рослин. До них зокрема належать: механічний склад, рН, вміст органічної речовини, катіоннообмінна здатність. Перехід рухомих іонів важких металів у малорухомий стан



можливий внаслідок ізоморфного заміщення в реакціях іонного обміну та хелатування. Під час надходження до ґрунту полютантів у аніонній формі поглинальна роль ґрунту менш ефективна. Це зумовлено незначною адсорбційною здатністю глинистих мінералів щодо аніонів, бо вони містять мало реакційних груп, що несуть позитивний заряд [22].

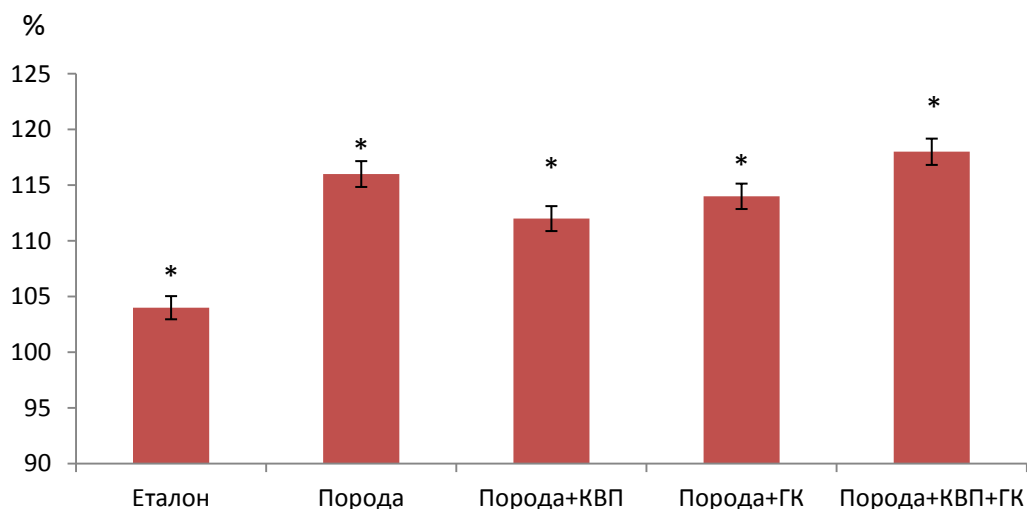


Рис. 5.4. Вплив вирощування суданської трави

на актуальну кислотність субстратів неперегорілої породи (n=5), %

Умовні скорочення (тут і далі): КВП – кам’яновугільний попіл;  
ГК – гумат Калію.

### 5.2.2. Вміст Плюмбуму та Хрому

**в субстраті неперегорілої породи та органах суданської трави  
за впливу попелу ТЕС і гумату Калію**

У субстраті неперегорілої породи ми виявили перевищення ГДК рухомих форм Pb і Cr (табл. 5.5), яке можна пояснити високим валовим вмістом цих токсичних металів у породних відвалах Червоноградського ГПР [235; 161].

Підвищені концентрації рухомих форм Плюмбуму і Хрому в субстраті неперегорілої породи можна також пояснити низьким рН, що підтверджує наявність негативної кореляції вмісту рухомих форм

Плюмбуму і Хрому (табл. 5.7) з рН субстрату. В літературі теж описано негативну кореляцію між вмістом важких металів і рН ґрунтів [223].

Таблиця 5.5

Вміст рухомих форм Плюмбуму та Хрому  
в субстраті неперегорілої породи  
за впливу попелу, гумату і 95 діб вирощування суданської трави  
(n=5), мг/кг сухої маси

Хімічний елемент	Субстрат	Вирощування суданської трави	
		До	Після
Pb	Еталон	4,41±0,32	3,57±0,26
	Порода	14,5±1,0	11,3±0,9
	Порода+Попіл	12,4±0,9	10,7±0,7
	Порода+Гумат	10,4±0,7*	8,17±0,44*
	Порода+Попіл+Гумат	8,30±0,55*	6,65±0,47*
Cr	Еталон	8,32±0,49	5,43±0,40
	Порода	44,5±3,2	32,5±1,4
	Порода+Попіл	30,3±2,4*	22,1±1,1*
	Порода+Гумат	38,7±2,7	24,2±1,2*
	Порода+Попіл+Гумат	26,6±1,1*	19,1±1,1*

Концентрації деяких хімічних елементів у вугіллі можуть значно перевищувати їх середній вміст у земній корі. Також відомо, що у відходах кам'яновугільних ТЕС вміст зольних хімічних елементів в декілька разів вищий, ніж їх початковий вміст у вихідному вугіллі [55]. Однак, досліджений нами попіл Добротвірської ТЕС мав нижчий вміст рухомих форм Pb – 2,39±0,08 і Cr – 17,3±0,2 мг/кг сухої маси [97], ніж субстрат перегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська», що можна пояснити спалюванням цієї ТЕС вугілля не тільки з шахт Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну [236].

Наші дослідження не виявили впливу попелу ТЕС на вміст рухомих форм Плюмбуму в субстраті породного відвалу. Водночас показано, що внесення попелу знижує валовий вміст цього важкого металу в стеблах і листках суданської трави, а внесення гумату знижує вміст Плюмбуму в її листках і субстраті неперегорілої породи. Відмічено, що сумісне внесення обох вищезгаданих меліорантів знижує вміст цього важкого металу в субстраті, а також коренях, стеблах і листках суданської трави (табл. 5.6).

Таблиця 5.6

Валовий вміст Плюмбуму та Хрому в органах суданської трави після 95 діб росту на субстраті неперегорілої породи (n=5), мг/кг сухої маси

Хімічний Елемент	Субстрат	Орган суданської трави		
		Корінь	Стебло	Листок
Pb	Еталон	1,26±0,11	0,78±0,08	0,67±0,07
	Порода	6,44±0,42	1,76±0,14	1,38±0,10
	Порода+Попіл	5,72±0,46	1,25±0,12*	0,68±0,08*
	Порода+Гумат	5,62±0,35	1,41±0,18	0,63±0,05*
	Порода+Попіл+Гумат	4,35±0,32*	1,33±0,12*	0,61±0,05*
Cr	Еталон	4,29±0,32	3,53±0,30	2,68±0,25
	Порода	14,2±1,1	8,44±0,50	11,7±0,7
	Порода+Попіл	12,1±0,9	6,82±0,41*	7,44±0,62*
	Порода+Гумат	12,4±0,9	7,52±0,43	8,34±0,68*
	Порода+Попіл+Гумат	10,4±0,6*	6,12±0,37*	6,63±0,45*

Також з'ясовано, що додавання попелу Добротвірської ТЕС знижує вміст рухомих форм Хрому в субстраті неперегорілої породи, що можна пояснити підвищенням його рН [128]. Внесення гумату не змінило вміст цього важкого металу в субстраті до вирощування рослин, але спричинило зниження його вмісту в субстраті після вирощування суданської трави.

Крім того, застосування гумату призвело до зниження вмісту Хрому в листках суданської трави. Встановлено, що внесення обох меліорантів знижує вміст цього важкого металу в субстраті породного відвалу та органах суданської трави ефективніше, ніж тільки попелу чи гумату. В літературі описано наступну тенденцію акумуляції Хрому злаковими рослинами: корені>листки>стебла>зерна [105]. Також відомо, що їх пагони накопичують менше важких металів, ніж корені внаслідок присутності фізіологічного бар'єру між кореневою шийкою і стеблом [72]. Ми встановили, що вирощування суданської трави спричиняє достовірне зниження вмісту рухомих форм Хрому в субстратах всіх варіантів досліду. Натомість достовірне зниження вмісту Плюмбуму після росту суданської трави виявлено тільки в субстратах породного відвалу без додавання меліорантів та з додаванням лише гумату (рис. 5.5).

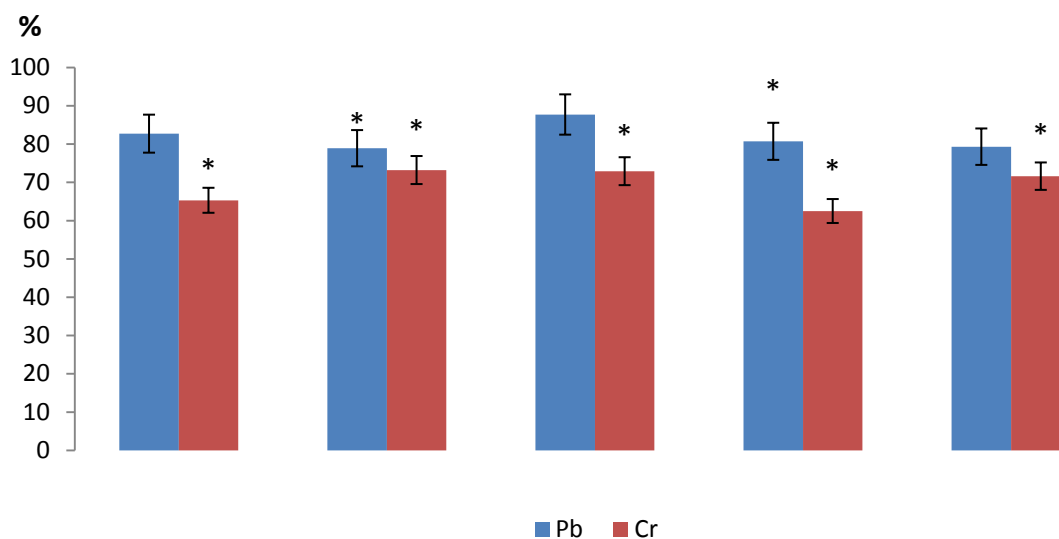


Рис. 5.5. Вплив вирощування суданської трави на вміст рухомих форм Плюмбуму та Хрому в субстраті неперегорілої породи (n=5), %

Примітка «\*»: достовірна відмінність значень субстрату після росту рослин відносно субстрату без вирощування рослин (100 %) при  $p \leq 0,05$ .

Коефіцієнти кореляції вмісту Плюмбуму та Хрому в органах рослин з рН і їх вмістом у субстраті неперегорілої породи до і після вирощування суданської трави (n=20)

	рН До	рН Після	Pb До	Pb Після	Pb Корені	Pb Стебла	Pb Листки	Cr До	Cr Після	Cr Корені	Cr Стебла	Cr Листки
рН До		0,95#	-0,68#	-0,52#	-0,73#	-0,74#	-0,79#	-0,93#	-0,92#	-0,78#	-0,87#	-0,91#
рН Після	0,95#		-0,75#	-0,64#	-0,83#	-0,69#	-0,74#	-0,92#	-0,91#	-0,85#	-0,90#	-0,88#
Pb До	-0,68#	-0,75#		0,94#	0,83#	0,44	0,76#	0,70#	0,80#	0,69#	0,70#	0,73#
Pb Після	-0,52#	-0,64#	0,94#		0,79#	0,35	0,63#	0,56#	0,65#	0,62#	0,62#	0,60#
Pb Корені	-0,73#	-0,83#	0,83#	0,79#		0,52#	0,65#	0,77#	0,80#	0,81#	0,75#	0,80#
Pb Стебла	-0,74	-0,69#	0,44	0,35	0,52#		0,75#	0,66#	0,80#	0,76#	0,74#	0,79#
Pb Листки	-0,79#	-0,74#	0,76#	0,63#	0,65#	0,75#		0,72#	0,92#	0,75#	0,73#	0,90#
Cr До	-0,93#	-0,92#	0,70#	0,56#	0,77#	0,66#	0,72#		0,88#	0,74#	0,82#	0,84#
Cr Після	-0,92#	-0,91#	0,80#	0,65#	0,80#	0,80#	0,92#	0,88#		0,88#	0,87#	0,93#
Cr Корені	-0,78#	-0,85#	0,69#	0,62#	0,81#	0,76#	0,75#	0,74#	0,88#		0,86#	0,84#
Cr Стебла	-0,87#	-0,90#	0,70#	0,62#	0,75#	0,74#	0,73#	0,82#	0,87#	0,86#		0,85#
Cr Листки	-0,91#	-0,88#	0,73#	0,60#	0,80#	0,79#	0,90#	0,84#	0,93#	0,84#	0,85#	

Примітка «#» (тут і далі) – наявність достовірного кореляційного зв'язку при  $p \leq 0,05$ .

### **5.2.3. Вміст Кальцію, Калію та Фосфору в субстраті неперегорілої породи та органах суданської трави за впливу попелу ТЕС і гумату Калію**

Використання для екстрагування рухомих [3] і валових форм [81] Кальцію (Ca), Калію (K) і Фосфору (P) методів, що дозволяють визначати ці приблизно співрозмірні за концентраціями в органах рослин макроелементи [117] в спільних екстрактах стало для нас підставою для розміщення даних щодо їх вмісту в спільні таблиці та рисунки. Крім того, вміст Ca, K [119] і P [204; 170] позитивно корелює з рівнем рН ґрунтового розчину, що зумовило потребу проведення кореляційного аналізу вмісту рухомих форм цих макроелементів з актуальною кислотністю субстрату породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська».

Попіл ТЕС здебільшого містить більше лужних і лужноземельних елементів, ніж породні відвали, завдяки концентруванню зольних елементів внаслідок спалювання кам'яного вугілля [216; 55]. Крім того, Добротвірська ТЕС спалює вугілля, яке надходить не тільки з шахт Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну [236]. Ми виявили, що попіл цієї ТЕС містить наступні концентрації досліджених рухомих форм досліджених нами зольних макроелементів: Фосфору –  $58,0 \pm 3,0$ ; Калію –  $22,0 \pm 1,9$  і Кальцію –  $237 \pm 14$  мг/кг [97].

В літературі показано, що порода відвалів Червоноградського ГПР характеризується дефіцитом вищевказаних макроелементів [51; 48]. Нами також відмічено низький вміст рухомих форм Ca, K і P у субстраті неперегорілої породи (табл. 5.8). Внесення тільки попелу ТЕС чи гумату Калію не вплинуло на вміст рухомого Кальцію в субстраті неперегорілої породи, але з'ясовано, що сумісне застосування цих меліорантів призводить до зростання вмісту цього макроелементу в коренях, стеблах і листках суданської трави (табл. 5.9). Відомо, що злакові рослини найбільше накопичують Кальцію у стеблах для укріплення клітинних стінок, трохи

менше в коренях і найменше в листках [229], що підтверджено знайденим нами позитивним кореляційним зв'язком вмісту рухомих форм цього макроелементу з його валовим вмістом у органах суданської трави (табл. 5.10).

Таблиця 5.8

Вміст рухомих форм Кальцію, Калію і Фосфору в субстраті неперегорілої породи за впливу попелу, гумату та вирощування суданської трави (n=5), мг/кг сухої маси

Хімічний елемент	Субстрат	Вирощування суданської трави	
		До	Після
Р	Еталон	42,6±2,7	37,5±2,5
	Порода	16,2±1,4	12,5±0,9
	Порода+Попіл	17,9±1,6	14,8±1,2
	Порода+Гумат	21,8±1,8*	18,5±1,8*
	Порода+Попіл+Гумат	23,7±2,1*	19,9±1,9*
К	Еталон	43,6±3,8	40,4±3,5
	Порода	13,9±1,9	9,43±1,88
	Порода+Попіл	18,4±2,9	11,7±1,9
	Порода+Гумат	19,8±2,9	15,3±1,9
	Порода+Попіл+Гумат	23,6±2,9*	15,7±2,2
Са	Еталон	35,5±5,1	31,9±5,1
	Порода	21,1±3,8	17,5±4,0
	Порода+Попіл	25,6±3,8	21,1±5,9
	Порода+Гумат	29,2±4,5	21,1±3,8
	Порода+Попіл+Гумат	31,0±4,0	24,7±3,2

В свою чергу, внесення гумату Калію спричинило підвищення валового вмісту Калію в стеблах суданської трави (табл. 5. 9).

Таблиця 5.9

Валовий вміст Фосфору, Калію і Кальцію в органах суданської трави після 95 діб росту на субстраті неперегорілої породи (n=5), г/кг сухої маси

Хімічний Елемент	Субстрат	Орган суданської трави		
		Корінь	Стебло	Листок
Р	Еталон	1,81±0,05	1,46±0,03	2,38±0,05
	Порода	0,99±0,04	0,72±0,05	1,24±0,04
	Порода+Попіл	1,27±0,05*	0,81±0,04	1,64±0,05*
	Порода+Гумат	1,12±0,05	0,83±0,04	1,47±0,04*
	Порода+Попіл+Гумат	1,44±0,05*	1,07±0,05*	2,15±0,07*
К	Еталон	3,72±0,12	6,10±0,16	6,98±0,12
	Порода	1,85±0,20	2,09±0,12	2,70±0,18
	Порода+Попіл	1,91±0,16	2,25±0,17	2,90±0,16
	Порода+Гумат	2,02±0,17	2,79±0,21*	3,18±0,25
	Порода+Попіл+Гумат	2,28±0,19	3,02±0,20*	3,57±0,21*
Са	Еталон	10,3±0,3	11,8±0,3	8,70±0,32
	Порода	6,22±0,32	7,03±0,40	4,95±0,42
	Порода+Попіл	7,18±0,37	7,65±0,34	5,69±0,40
	Порода+Гумат	6,84±0,45	7,52±0,42	5,54±0,40
	Порода+Попіл+Гумат	8,20±0,45*	9,07±0,53*	6,28±0,40*

Відмічено, що застосування цього меліоранту сумісно з попелом ТЕС крім стебел підвищує валовий вміст К і в листках суданської трави, що можна пояснити підвищенням рухомості Калію, який містить попіл Добротвірської ТЕС гуміновими речовинами препарату «ГКВ-45» [160]. Також встановлено, що роздільне внесення гумату Калію чи попелу ТЕС не впливає на вміст рухомого Калію в субстраті неперегорілої породи, проте він підвищується за впливу обох досліджуваних меліорантів. Вирощування суданської трави спричинило зменшило вмісту цього макроелемента в



субстратах неперегорілої породи за межу стандартного відхилення (рис. 5.6), що підтверджено позитивною кореляцією вмісту рухомого Калію в субстраті з його валовим вмістом в органах рослин (табл. 5.11).

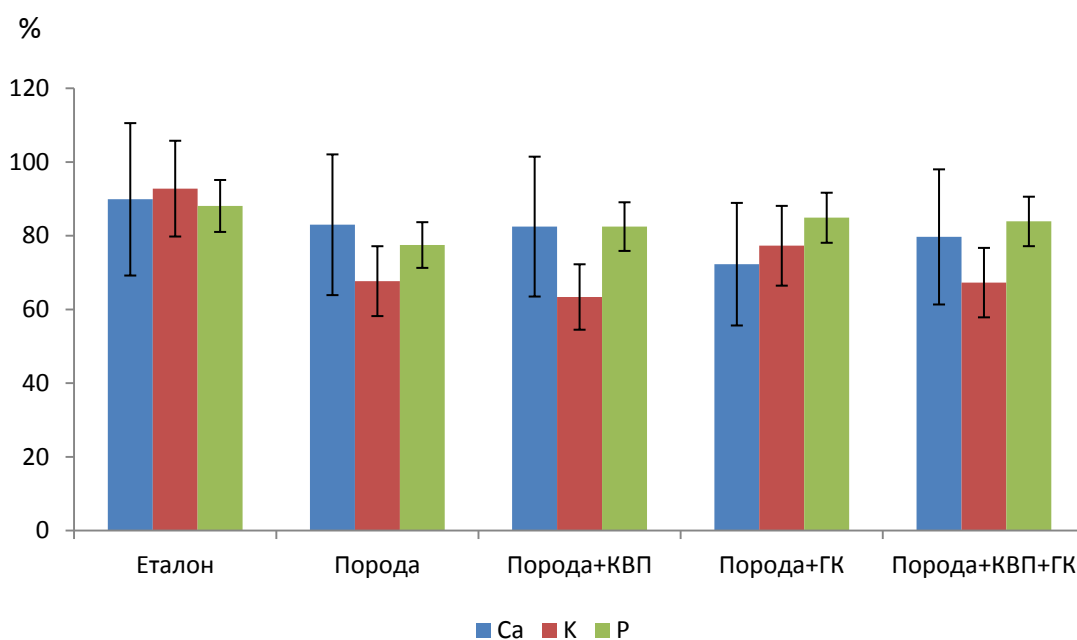


Рис. 5.6. Вплив вирощування суданської трави на вміст рухомих форм Фосфору, Калію і Кальцію в субстраті неперегорілої породи (n=5), %

Примітка «\*»: достовірна відмінність значень субстрату після росту рослин відносно субстрату без вирощування рослин (100 %) при  $p \leq 0,05$ .

З літератури відомо, що низьке значення рН призводить до зв'язування рухомого Фосфору катіонами інших хімічних елементів, а його підвищення позитивно впливає на вміст доступних форм цього макроелементу [204; 220], що пояснює знайдену нами позитивну кореляцію вмісту його рухомих форм з рівнем рН субстрату неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» (табл. 12). Додавання попелу ТЕС до породи не спричинило збільшення вмісту Фосфору в субстраті породного відвалу. Натомість внесення гумату і його внесення разом з попелом достовірно збільшило вміст рухомих форм цього елементу в субстраті породного відвалу (табл. 5.8).

Вирощування суданської трави спричинило зниження вмісту рухомих форм Фосфору за межу стандартного відхилення (рис. 5.6), що можна пояснити використанням цього макроелемента рослинами.

Відомо, що найбільше Фосфору накопичують листки, оскільки в них найактивніший метаболізм серед органів рослин, трохи менше корені, які поглинають рухомі сполуки цього макроелементу із ґрунтового розчину, а найменше стебла, що виконують переважно опорну і транспортну функції [117; 184].

Додавання попелу ТЕС до неперегорілої породи спричинило збільшення вмісту Фосфору в коренях і листках суданської трави, а внесення гумату Калію тільки в листках. Відомо, що гумінові та фульвові кислоти покращують доступність Фосфору як у лужних, так і в кислих ґрунтах [122]. Сумісне внесення обох досліджуваних меліорантів достовірно підвищило вміст Р у коренях, стеблах і листках суданської трави (табл. 5.8).

Таблиця 5.10

Коефіцієнти кореляції вмісту Кальцію в органах рослин з рН і його вмістом у субстраті неперегорілої породи до і після вирощування суданської трави (n=20)

	рН До	рН Після	Са До	Са Після	Са Корені	Са Стебла	Са Листки
рН До		0,95#	0,49#	0,48#	0,80#	0,72#	0,70#
рН Після	0,95#		0,55#	0,53#	0,90#	0,82#	0,80#
Са До	0,49#	0,55#		0,22	0,54#	0,63#	0,61#
Са Після	0,48#	0,53#	0,22		0,44	0,37	0,23
Са Корені	0,80#	0,90#	0,54#	0,44		0,79#	0,82#
Са Стебла	0,72#	0,82#	0,63#	0,37	0,79#		0,73#
Са Листки	0,70#	0,80#	0,61#	0,23	0,82#	0,73#	

Таблиця 5.11

Коефіцієнти кореляції вмісту Калію в органах рослин з рН і його вмістом у субстраті неперегорілої породи до і після вирощування суданської трави (n=20)

	рН До	рН Після	К До	К Після	К Корені	К Стебла	К Листки
рН До		0,95#	0,65#	0,43	0,45#	0,50#	0,61#
рН Після	0,95#		0,76#	0,52#	0,61#	0,62#	0,68#
К До	0,65#	0,76#		0,75#	0,73#	0,72#	0,65#
К Після	0,43	0,52#	0,75#		0,57#	0,70#	0,73#
К Корені	0,45#	0,61#	0,73#	0,57#		0,71#	0,55#
К Стебла	0,50#	0,62#	0,72#	0,70#	0,71#		0,77#
К Листки	0,61#	0,68#	0,65#	0,73#	0,55#	0,77#	

Таблиця 5.12

Коефіцієнти кореляції вмісту Фосфору в органах рослин з рН і його вмістом у субстраті неперегорілої породи до і після вирощування суданської трави (n=20)

	рН До	рН Після	Р До	Р Після	Р Корені	Р Стебла	Р Листки
рН До		0,95#	0,52#	0,54#	0,91#	0,74#	0,88#
рН Після	0,95#		0,60#	0,62#	0,96#	0,86#	0,97#
Р До	0,52#	0,60#		0,84#	0,58#	0,71#	0,69#
Р Після	0,54#	0,62#	0,84#		0,62#	0,67#	0,67#
Р Корені	0,91#	0,96#	0,58#	0,62#		0,80#	0,94#
Р Стебла	0,74#	0,86#	0,71#	0,67#	0,80#		0,92#
Р Листки	0,88#	0,97#	0,69#	0,67#	0,94#	0,92#	

#### **5.2.4. Вміст Нітрогену та Карбону в субстраті неперегорілої породи та органах суданської трави за впливу попелу ТЕС і гумату Калію**

Дослідження субстрату неперегорілої породи відвалів Червоноградського ГПР показали, що вони характеризуються низьким валовим вмістом Нітрогену [48]. Хоча рослини роду *Sorghum* мають  $C_4$  тип фотосинтезу і використовують Нітроген, діоксид Карбону, сонячне світло і воду ефективніше, ніж більшість рослин із  $C_3$  типом фотосинтезу, наявність доступного Нітрогену та інших поживних речовин залишається для них важливим лімітуючим фактором [177].

Відомо, що Калій і Кальцій витісняють менш хімічно активні метали при взаємодії з їх нітритними і нітратними сполуками, що позитивно впливає на їхню розчинність [198].

Результати наших досліджень засвідчують, що субстрат неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» має знижений вміст нітритного і нітратного Нітрогену щодо умовно чистого субстрату еталону. Додавання попелу ТЕС спричинило підвищення вмісту цих форм Нітрогену в субстраті породного відвалу.

Відомо, що гумінові і фульвові кислоти, які містяться в гумінових препаратах підвищують рухомість сполук Нітрогену та інших макроелементів [145].

Внесення гумату Калію в субстрат неперегорілої породи спричинило достовірне підвищення вмісту нітритного і нітратного Нітрогену. Сумісне застосування попелу і гумату підвищило вміст цих двох форм Нітрогену в субстраті породного відвалу більшою мірою, ніж застосування тільки одного з них (табл. 5.13).

Відомо, що нітрати і нітрити добре поглинаються кореневою системою рослин з ґрунтового розчину і накопичуються в органах рослин [117; 54]. Зазначимо, що проведений нами кореляційний аналіз виявив достовірну позитивну кореляцію вмісту цих форм Нітрогену з його валовим вмістом в

рослинах (табл. 5.14). При цьому відмічено, що вирощування суданської трави знижує вміст нітратів і нітритів в субстраті більшості варіантів досліду (рис. 5.7).

Таблиця 5.13

Вміст рухомих форм Нітрогену в субстраті неперегорілої породи за впливу попелу і гумату до і після 95 діб росту суданської трави (n=5)

Вміст Нітрогену в сухій масі	Субстрат	Вирощування суданської трави	
		До	Після
N-NO <sub>2</sub> , мг/кг	Еталон	10,7±0,3	5,05±0,24
	Порода	2,95±0,24	1,90±0,24
	Порода+КВП	5,14±0,36*	3,19±0,23*
	Порода+ГК	6,51±0,29*	3,91±0,31*
	Порода+КВП+ГК	7,53±0,36*	4,45±0,24*
N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	Еталон	12,1±0,3	8,24±0,37
	Порода	3,98±0,29	2,10±0,22
	Порода+КВП	7,08±0,22*	3,07±0,22*
	Порода+ГК	5,86±0,27*	3,98±0,29*
	Порода+КВП+ГК	8,32±0,31*	5,20±0,29*
N-NH <sub>4</sub> , г/кг	Еталон	1,19±0,08	0,92±0,06
	Порода	2,34±0,07	1,89±0,08
	Порода+КВП	1,83±0,06*	1,49±0,07*
	Порода+ГК	2,43±0,04	1,97±0,07
	Порода+КВП+ГК	1,94±0,07*	1,33±0,07*

З літератури відомо, що субстрати породних відвалів кам'яновугільних шахт містять сульфати і хлориди амонію органічного походження [225]. Слід зазначити, що наші дослідження вперше показали високий вміст амонійного Нітрогену в субстраті неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська».

Відомо, що лужні та лужноземельні метали взаємодіють з амонійними сполуками, що призводить до утворення і випаровування аміаку [198], що пояснює зниження вмісту амонійного Нітрогену в субстраті породного відвалу за впливу попелу ТЕС, який містить Калій і Кальцій [97].

Наші дослідження виявили зниження вмісту цієї форми Нітрогену після росту суданської трави в субстратах усіх варіантів експерименту. Також знайдено позитивну кореляцію між вмістом амонійного Нітрогену в субстраті і валовим вмістом Нітрогену в органах суданської трави (рис. 5.7; табл. 5.14), що можна пояснити активним поглинанням і засвоєнням амонійного Нітрогену рослинами [117; 54].

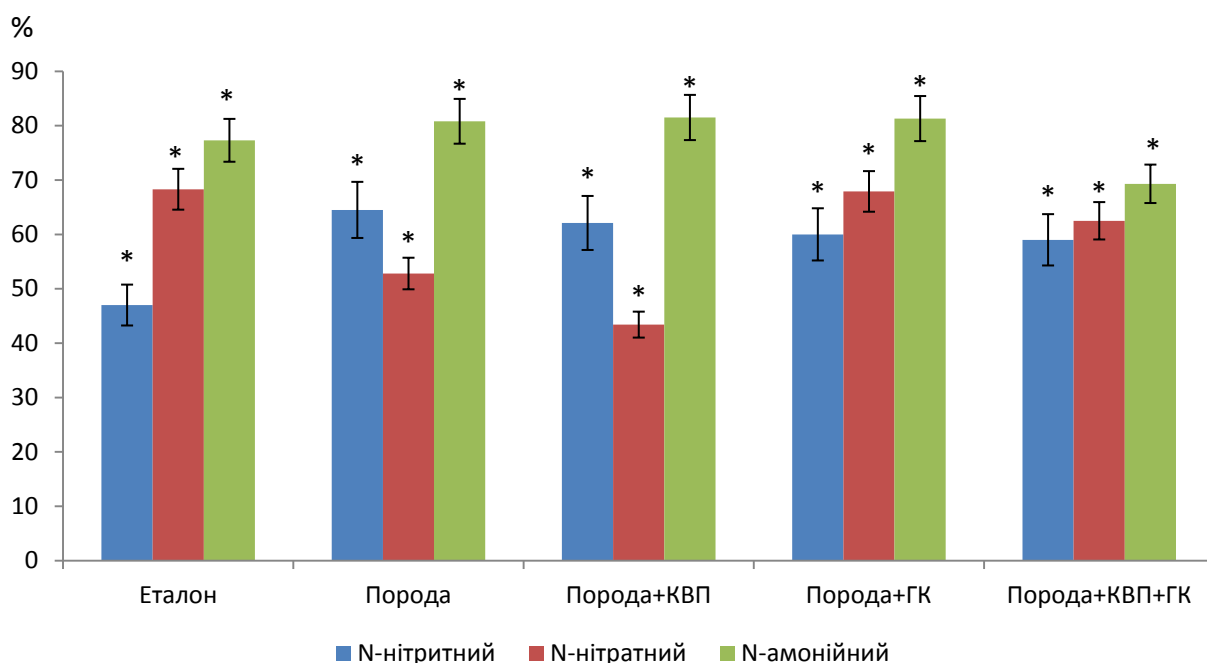


Рис. 5.7. Вплив вирощування суданської трави на вміст рухомих форм Нітрогену в субстраті неперегорілої породи (n=5), %

Примітка «\*»: достовірна відмінність значень субстрату після росту рослин відносно субстрату без вирощування рослин (100 %) при  $p \leq 0,05$ .

Відмічено, що внесення попелу ТЕС і гумату Калію в субстрат неперегорілої породи спричиняє достовірне збільшення валового вмісту Нітрогену в коренях, стеблах і листках суданської трави. Встановлено, що

сумісне застосування цих меліорантів збільшує вміст цього макроелементу в органах рослин більшою мірою, ніж тільки одного з них.

Підвищення вмісту Нітрогену в органах суданської трави за впливу меліорантів можна пояснити зниженням фітостресорності субстрату неперегорілої породи. Це припущення підтверджує позитивна кореляція валового вмісту Нітрогену в листках (див. табл. 5.17) із вмістом хлорофілу *a* та негативною кореляцією вмісту цього макроелементу з феофітином *a*, хлорофілом *b* і каротиноїдами, які утворюються внаслідок фітостресу [150; 130].

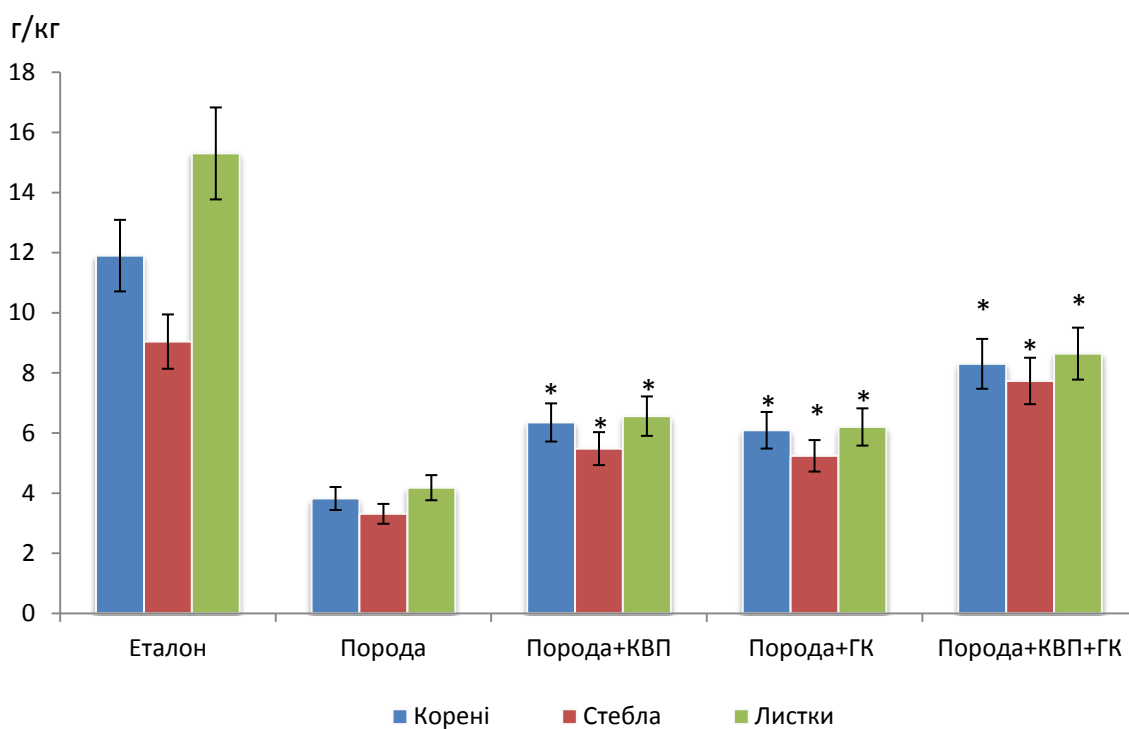


Рис. 5.8. Валовий вміст Нітрогену в органах суданської трави після 95 діб росту на субстраті неперегорілої породи (n=5), г/кг сухої маси

Таблиця 5.14

Коефіцієнти кореляції між рН, вмістом рухомих форм Нітрогену в субстраті неперегорілої породи та його валовим вмістом у органах суданської трави (n=20)

	рН До	рН Після	NH <sub>4</sub> До	NH <sub>4</sub> Після	NO <sub>2</sub> До	NO <sub>2</sub> Після	NO <sub>3</sub> До	NO <sub>3</sub> Після	N Корені	N Стебла	N Листки
рН До		0,95#	-0,82#	-0,85#	0,73#	0,73#	0,96#	0,70#	0,88#	0,86#	0,87#
рН Після	0,95#		-0,78#	-0,87#	0,79#	0,77#	0,97#	0,80#	0,91#	0,93#	0,93#
NH <sub>4</sub> До	-0,82#	-0,78#		0,89#	-0,27	-0,30	-0,74#	-0,29	-0,57#	-0,57#	-0,60#
NH <sub>4</sub> Після	-0,85#	-0,87#	0,89#		-0,45#	-0,44	-0,83#	-0,51#	-0,71#	-0,75#	-0,73#
NO <sub>2</sub> До	0,73#	0,79#	-0,27	-0,45#		0,96#	0,82#	0,94#	0,88#	0,88#	0,87#
NO <sub>2</sub> Після	0,73#	0,77#	-0,30	-0,44	0,96#		0,80#	0,90#	0,85#	0,88#	0,86#
NO <sub>3</sub> До	0,96#	0,97#	-0,74#	-0,83#	0,82#	0,80#		0,82#	0,94#	0,92#	0,92#
NO <sub>3</sub> Після	0,70#	0,80#	-0,29	-0,51#	0,94#	0,90#	0,82#		0,88#	0,89#	0,86#
N Корені	0,88#	0,91#	-0,57#	-0,71#	0,88#	0,85#	0,94#	0,88#		0,91#	0,96#
N Стебла	0,86#	0,93#	-0,57#	-0,75#	0,88#	0,88#	0,92#	0,89#	0,91#		0,92#
N Листки	0,87#	0,93#	-0,60#	-0,73#	0,87#	0,86#	0,92#	0,86#	0,96#	0,92#	



Дослідження хімічного складу породних відвалів Червоноградського ГПР показали, що вони містять органічний Карбон, який залишається в пустій породі після збагачення кам'яного вугілля [51; 15]. Так, досліджений нами субстрат неперегорілої породи містив більше органічного Карбону, ніж субстрат еталону (табл. 5.15).

Таблиця 5.15

Вміст органічного Карбону в субстраті неперегорілої породи за впливу меліорантів, а також в органах суданської трави після 95 діб росту на ньому (n=5), г/кг сухої маси

Субстрат	Вирощування суданської трави		Органи рослин		
	До	Після	Листки	Стебла	Корені
Еталон	81,4±2,1	94,5±1,9	451±6	381±4	352±3
Порода	121±3	130±3	324±4	262±3	211±3
Порода+КВП	104±2*	118±2*	379±4*	304±3*	269±3*
Порода+ГК	122±3	131±3	352±4*	298±3*	248±3*
Порода+КВП+ГК	104±2*	114±2*	417±5*	336±4*	329±3*

Вирощування суданської трави спричинило достовірне підвищення вмісту органічного Карбону в субстраті породи з додаванням попелу та обох меліорантів разом (рис. 5.9), що можна пояснити кореневими виділеннями рослин, які містять органічні сполуки [164]. Також виявлено знижений вміст органічного Карбону в листках, стеблах і коренях суданської трави за росту на субстраті породного відвалу щодо рослин еталону. Додавання попелу і гумату до породи спричинило підвищення вмісту Карбону в коренях, стеблах і листках досліджуваних рослин. Встановлено, що сумісне застосування цих меліорантів підвищує вміст органічного Карбону в органах суданської трав за росту на субстраті породного відвалу більшою мірою, ніж тільки одного з них.

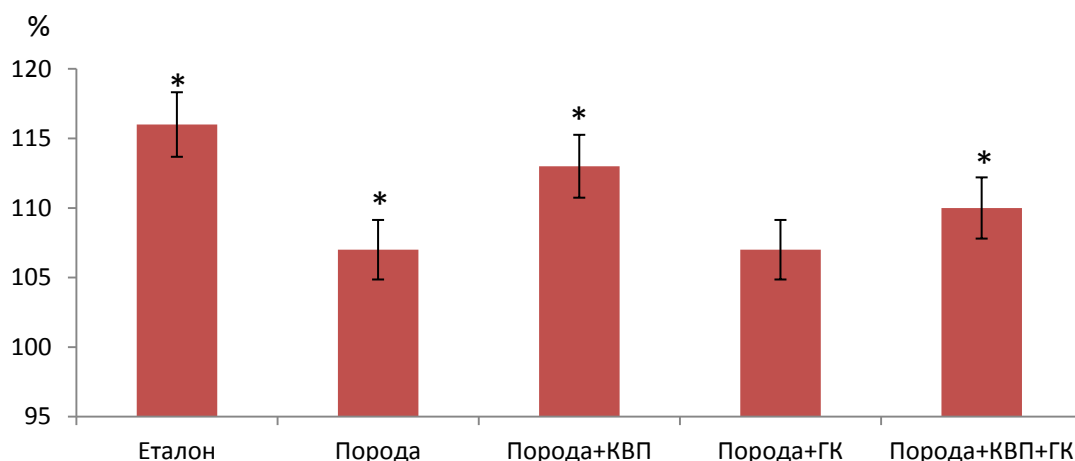


Рис. 5.9. Вплив вирощування суданської трави на вміст органічного Карбону в субстраті неперегорілої породи (n=5), %

Примітка «\*»: достовірна відмінність значень субстрату після росту рослин відносно субстрату без вирощування рослин (100 %) при  $p \leq 0,05$ .

Крім того, знайдено достовірну негативну кореляцію між вмістом органічного Карбону в органах суданської трави і субстраті неперегорілої породи відвалу «ЦЗФ» Червоноградська (табл. 5.16).

Таблиця 5.16

Коефіцієнти кореляції між рН і вмістом органічного Карбону в субстраті неперегорілої породи та органах суданської трави (n=20)

	рН До	рН Після	С До	С Після	С Корені	С Стебла	С Листки
рН До		0,95#	-0,86#	-0,86#	0,91#	0,91#	0,95#
рН Після	0,95#		-0,85#	-0,87#	0,98#	0,95#	0,98#
С До	-0,86#	-0,85#		0,95#	-0,78#	-0,71#	-0,84#
С Після	-0,86#	-0,87#	0,95#		-0,83#	-0,76#	-0,88#
С Корені	0,91#	0,98#	-0,78#	-0,83#		0,98#	0,99#
С Стебла	0,91#	0,95#	-0,71#	-0,76#	0,98#		0,96#
С Листки	0,95#	0,98#	-0,84#	-0,88#	0,99#	0,96#	

Її наявність можна пояснити негативним впливом хімічних сполук відвалів, які могли виділитися з породи внаслідок впливу ферментів корневих ексудатів [201]. Також встановлено, що порода з додаванням попелу ТЕС містить менше органічного Карбону, ніж без нього, що можна пояснити відсутністю цього макроелементу в попелі внаслідок озолення кам'яного вугілля [55]. В свою чергу, внесення тільки гумату Калію чи його сумісне застосування в поєднанні разом з попелом ТЕС не вплинуло на вміст органічного Карбону в субстраті. Зазначимо, що співвідношення Карбону та Нітрогену в органах рослин є чутливою біоіндикаційною ознакою, яка відхиляється від норми за впливу стрес-факторів довкілля [124]. У літературі описане дослідження, яке показало, що пагони суданської трави, яку вирощували протягом 112 діб на умовно чистому ґрунті мають значення C/N 31,4 [134]. Наші дослідження вмісту цих макроелементів у органах суданської трави після 95 діб росту на умовно чистій ґрунтосуміші еталону теж показали близьке до вищенаведеного прикладу значення співвідношення органічного Карбону до валового Нітрогену в її стеблах і листках. В свою чергу нами відмічено значне збільшення C/N у коренях, стеблах і листках суданської трави, яку вирощували на субстраті неперегорілої породи щодо еталону (рис. 5.10).

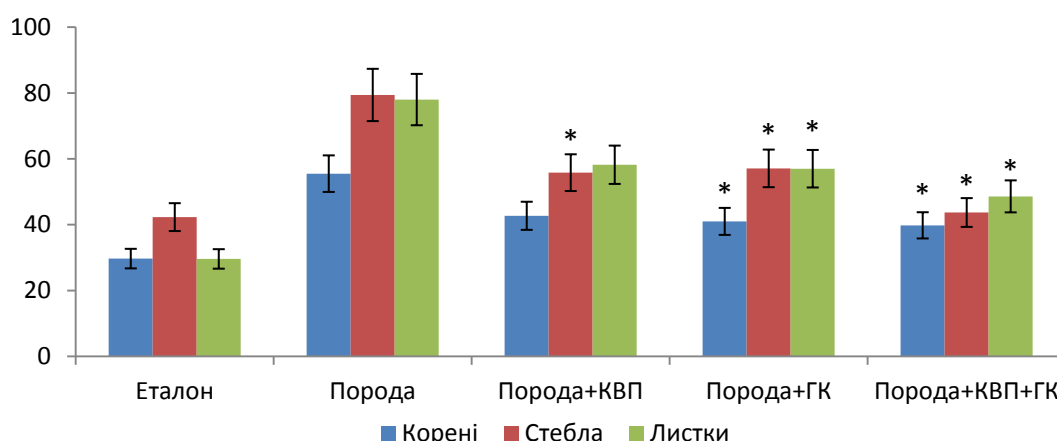


Рис. 5.10. Відношення вмісту органічного Карбону до вмісту валового Нітрогену (C/N) в органах суданської трави після 95 діб росту на субстраті неперегорілої породи (n=5)

Додавання попелу Добротвірської ТЕС до субстрату неперегорілої породи спричинило зниження C/N у коренях і листках, а внесення гумату Калію «ГКВ-45» призвело до зниження співвідношення цих макроелементів у коренях, стеблах і листках досліджуваних рослин. Слід зазначити, що сумісне внесення обох вищезгаданих меліорантів знижує C/N в органах суданської трави ефективніше, ніж їх роздільне застосування. Нормалізацію C/N можна пояснити зниженням фітостресорності субстрату породного відвалу внаслідок оптимізації його хімічного складу завдяки внесенню меліорантів.

Отже, сіро-чорна неперегоріла порода відвалу ЦЗФ «Червоноградська» характеризуються дефіцитом рухомих форм Кальцію, Калію, Фосфору, відносно підвищеним вмістом амонійного Нітрогену та органічного Карбону, а також перевищенням ГДК рухомих форм Плюмбуму і Хрому для ґрунтів. Крім того, низький рівень її рН знижує рухомість Фосфору на фоні підвищення рухомості важких металів. Додавання попелу ТЕС і гумату Калію підвищує рН субстрату породного відвалу, рухомість макроелементів, а також знижує рухомість важких металів. Встановлено, що застосування обох меліорантів разом оптимізовує хімічний склад субстрату породного відвалу та органів суданської трави ефективніше, ніж тільки одного з них.

#### **5.2.5. Вміст пластидних пігментів і морфометричні параметри суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи з додаванням попелу ТЕС і гумату Калію**

Вміст пігментів фотосинтезу і морфометричні параметри є зручними та експресивними тест-ознаками, які дозволяють оцінити інтегрований вплив стрес-факторів на рослинний організм у контрольованих експериментальних умовах [83;115].

Також відомо, що підвищення вмісту каротиноїдів, феофітину *a* та зниження вмісту хлорофілу *a* є ознаками фітостресу [168; 150]. У літературі повідомляли про пригнічення морфогенезу та фотосинтезу рослин роду *Sorghum* за дефіциту Кальцію [121], Калію [155] та Фосфору [234]. Крім того, описане пригнічення росту та зниження вмісту хлорофілів у рослин роду *Sorghum* та інших злакових рослин з  $C_4$  типом фотосинтезу (проса, кукурудзи, цукрової тростини) за впливу різних форм і концентрацій Хрому [131;178; 130].

Після 95 діб росту рослин суданської трави на субстраті неперегороділої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» наші дослідження виявили знижений вміст хлорофілу *a*, підвищений вміст феофітину *a* і суми каротиноїдів, що зумовило зниження співвідношення хлорофіл *a*/феофітин *a*.

Додавання до неї попелу ТЕС призвело до підвищення вмісту хлорофілу *a* на фоні зниження вмісту феофітину *a*, що збільшило співвідношення хлорофіл *a*/феофітин *a*.

В свою чергу, внесення гумату Калію підвищило вміст хлорофілу *a* і знизило вміст феофітину *a*, що спричинило збільшення співвідношення хлорофіл *a*/феофітин *a*.

Встановлено, що застосування попелу разом з гуматом підвищує вміст хлорофілу *a*, знижує вміст феофітину *a* і суми каротиноїдів на фоні підвищення вмісту хлорофілу *a*, хлорофілу *b*, що призвело до оптимізації співвідношень хлорофіл *a/b*, хлорофіл *a*/феофітин *a* та суми хлорофілів до суми каротиноїдів (рис. 5.11, 5.12).

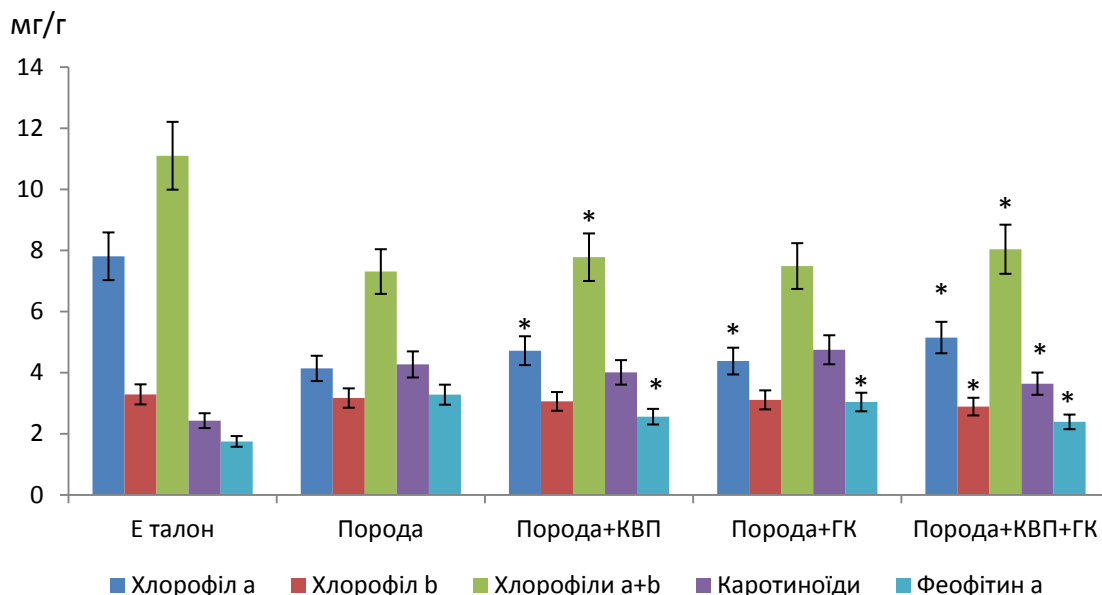


Рис. 5.11. Вміст пластидних пігментів у листках суданської трави після 95 діб росту на субстратах (n=5), мг/г сухої маси

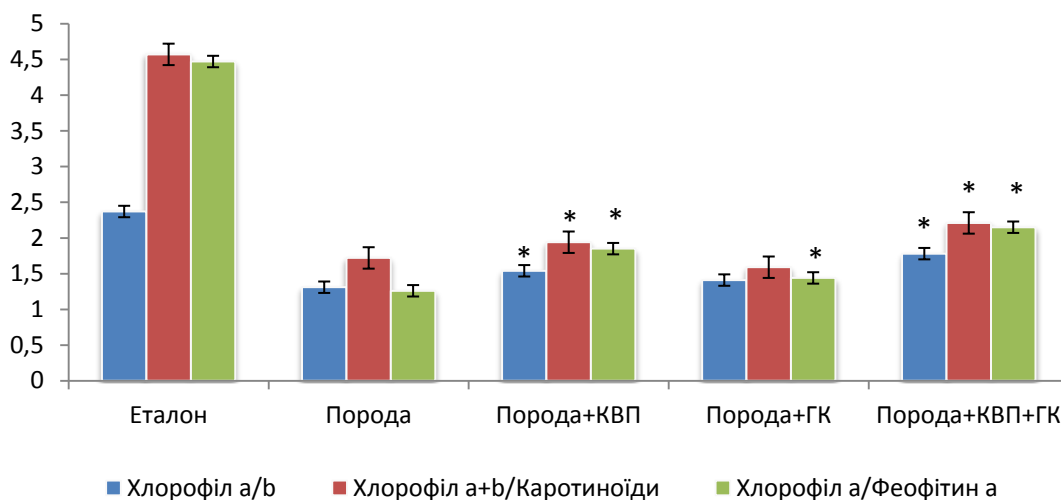


Рис. 5.12. Співвідношення пластидних пігментів у листках суданської трави після 95 діб росту на субстраті неперегорілої породи (n=5)

Також знайдено негативну кореляцію вмісту Плюмбуму і Хрому в листках суданської трави із вмістом хлорофілу *a* на фоні позитивної кореляції вмісту цих важких металів із вмістом каротиноїдів і феофітину *a*. Натомість, виявлено позитивну кореляцію вмісту Кальцію, Калію,

Фосфору, Нітрогену та Карбону в листках із вмістом хлорофілу *a* на фоні негативної кореляції вмісту цих макроелементів із вмістом каротиноїдів і феофітину *a* (табл. 5.17).

За росту суданської трави на субстраті неперегорілої породи відмічено значне зменшення висоти стебла, площі листків, довжини і маси коренів (рис. 5.13; табл. 5.18). Пригнічення росту можна пояснити фітостресорністю субстратів внаслідок високого вмісту важких металів (див. табл. 5.5) і дефіциту макроелементів (див. табл. 5.8). Це припущення підтверджує негативна кореляція вмісту важких металів у органах суданської трави на фоні позитивної кореляції вмісту макроелементів у них з морфометричними параметрами рослин (табл. 5.19-5.21).

Таблиця 5.17

Коефіцієнти кореляції валового вмісту хімічних елементів у листках суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи із вмістом пластидних пігментів (n=20)

	C	N	P	K	Ca	Pb	Cr	Chl <i>a</i>	Pheo <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Car T
C		0,93#	0,97#	0,71#	0,75#	-0,73#	-0,86#	0,98#	-0,96#	-0,79#	-0,68#
N	0,93#		0,95#	0,75#	0,77#	-0,77#	-0,84#	0,92#	-0,86#	-0,78#	-0,51#
P	0,97#	0,95#		0,76#	0,77#	-0,67#	-0,81#	0,97#	-0,90#	-0,81#	-0,67#
K	0,71#	0,75#	0,76#		0,53#	-0,63#	-0,63#	0,70#	-0,58#	-0,64#	-0,23
Ca	0,75#	0,77#	0,77#	0,53#		-0,65#	-0,77#	0,77#	-0,75#	-0,69#	-0,46#
Pb	-0,73#	-0,77#	-0,67#	-0,63#	-0,65#		0,90#	-0,70#	0,71#	0,53#	0,10
Cr	-0,86#	-0,84#	-0,81#	-0,63#	-0,77#	0,90#		-0,84#	0,86#	0,59#	0,45#
Chl <i>a</i>	0,98#	0,92#	0,97#	0,70#	0,77#	-0,70#	-0,84#		-0,95#	-0,80#	-0,68#
Pheo <i>a</i>	-0,96#	-0,86#	-0,90#	-0,58#	-0,75#	0,71#	0,86#	-0,95#		0,74#	0,67#
Chl <i>b</i>	-0,79#	-0,78#	-0,81#	-0,64#	-0,69#	0,53#	0,59#	-0,80#	0,74#		0,39
Car T	-0,68#	-0,51#	-0,67#	-0,23	-0,46#	0,10	0,45#	-0,68#	0,67#	0,39	

Умовні скорочення: Chl *a* – хлорофіл *a*; Pheo *a* – феофітин *a*; Chl *b* – хлорофіл *b*; Car T – сума каротиноїдів.



Показано, що додавання попелу ТЕС до субстрату неперегорілої породи збільшує довжину коренів, їх маси, висоти стебла і площі листків досліджуваних рослин. В свою чергу, внесення гумату Калію позитивно вплинуло на площу листків і масу коренів. Також зазначимо, що корені суданської трави, яку вирощували на субстратах з додаванням обох вищезгаданих меліорантів мали значно більші розміри та масу, ніж за впливу тільки одного з них (рис. 5.13; табл. 5.18).

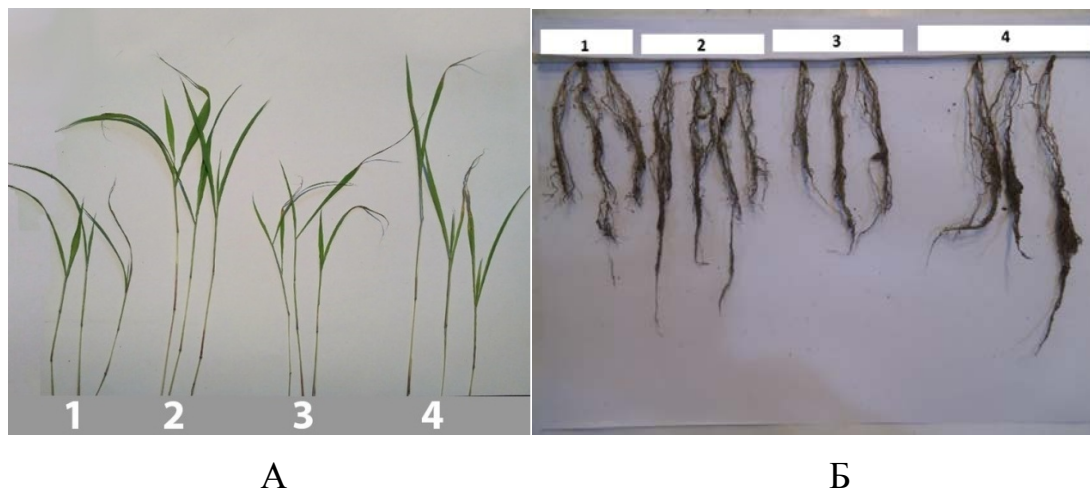


Рис. 5.13. Пагони (А) і корені (Б) суданської трави, яку протягом 95 дів вирощували на субстраті неперегорілої породи (1), за впливу попелу ТЕС (2), гумату Калію (3) та їх сумісного застосування (4)

Таблиця 5.18

Морфометричні параметри суданської трави після 95 дів росту на субстраті неперегорілої породи за впливу меліорантів (n=20)

Субстрат	Висота стебла, см	Площа листків, см <sup>2</sup>	Довжина коренів, см	Маса сухих коренів, мг
Еталон	49,8±2,0	78,2±4,1	19,7±1,1	296±23
Порода	15,7±0,7	11,5±0,7	9,4±0,5	54,5±4,9
Порода+КВП	25,1±2,0*	23,8±1,4*	12,5±0,6*	93,8±7,7*
Порода+ГК	16,3±0,8	15,5±0,6*	9,7±0,5	78,3±8,7*
Порода+КВП+ГК	24,4±1,4*	24,62±1,1*	13,9±0,7*	133±9*

Таблиця 5.19

Коефіцієнти кореляції морфометричних параметрів суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи із вмістом Плюмбуму та Хрому в її органах (n=20)

	Pb Корені	Pb Стебла	Pb Листки	Cr Корені	Cr Стебла	Cr Листки	BC	ПЛ	ДК	МК
Pb Корені		0,52#	0,65#	0,81#	0,75#	0,80#	-0,49#	-0,73#	-0,69#	-0,83#
Pb Стебла	0,52#		0,75#	0,76#	0,74#	0,79#	-0,60#	-0,73#	-0,58#	-0,55#
Pb Листки	0,65#	0,75#		0,75#	0,73#	0,90#	-0,54#	-0,72#	-0,59#	-0,69#
Cr Корені	0,81#	0,76#	0,75#		0,86#	0,84#	-0,63#	-0,79#	-0,79#	-0,76#
Cr Стебла	0,75#	0,74#	0,73#	0,86#		0,85#	-0,73#	-0,87#	-0,87#	-0,87#
Cr Листки	0,80#	0,79#	0,90#	0,84#	0,85#		-0,72#	-0,88#	-0,79#	-0,82#
BC	-0,49#	-0,60#	-0,54#	-0,63#	-0,73#	-0,72#		0,93#	0,90#	0,75#
ПЛ	-0,73#	-0,73#	-0,72#	-0,79#	-0,87#	-0,88#	0,93#		0,93#	0,89#
ДК	-0,69#	-0,58#	-0,59#	-0,79#	-0,87#	-0,79#	0,90#	0,93#		0,89#
МК	-0,83#	-0,55#	-0,69#	-0,76#	-0,87#	-0,82#	0,75#	0,89#	0,89#	

Умовні скорочення (тут і далі): BC – висота стебла; ПЛ – площа листків; ДК – довжина коренів; МК – маса коренів.

Таблиця 5.20

Коефіцієнти кореляції морфометричних параметрів суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи із вмістом Фосфору, Калію та Кальцію в її органах (n=20)

	Р Корені	Р Стебла	Р Листки	К Корені	К Стебла	К Листки	Са Корені	Са Стебла	Са Листки	ВС	ПЛ	ДК	МК
Р Корені		0,80#	0,94#	0,57#	0,57#	0,71#	0,88#	0,86#	0,82#	0,79#	0,93#	0,89#	0,92#
Р Стебла	0,80#		0,92#	0,62#	0,80#	0,74#	0,83#	0,84#	0,75#	0,49#	0,73#	0,74#	0,88#
Р Листки	0,94#	0,92#		0,69#	0,70#	0,76#	0,91#	0,87#	0,77#	0,71#	0,88#	0,86#	0,94#
К Корені	0,57#	0,62#	0,69#		0,71#	0,55#	0,72#	0,57#	0,65#	0,30	0,48#	0,50#	0,51#
К Стебла	0,57#	0,80#	0,70#	0,71#		0,77#	0,71#	0,71#	0,68#	0,18	0,45#	0,43	0,63#
К Листки	0,71#	0,74#	0,76#	0,55#	0,77#		0,61#	0,81#	0,53#	0,32	0,52#	0,55#	0,74#
Са Корені	0,88#	0,83#	0,91#	0,72#	0,71#	0,61#		0,79#	0,82#	0,68#	0,84#	0,79#	0,87#
Са Стебла	0,86#	0,84#	0,87#	0,57#	0,71#	0,81#	0,79#		0,73#	0,56#	0,73#	0,74#	0,87#
Са Листки	0,82#	0,75#	0,77#	0,65#	0,68#	0,53#	0,82#	0,73#		0,54#	0,73#	0,69#	0,72#
ВС	0,79#	0,49#	0,71#	0,30	0,18	0,32	0,68#	0,56#	0,54#		0,93#	0,90#	0,75#
ПЛ	0,93#	0,73#	0,88#	0,48#	0,45#	0,52#	0,84#	0,73#	0,73#	0,93#		0,93#	0,89#
ДК	0,89#	0,74#	0,86#	0,50#	0,43	0,55#	0,79#	0,74#	0,69#	0,90	0,93#		0,89#
МК	0,92#	0,88#	0,94#	0,51#	0,63#	0,74#	0,87#	0,87#	0,72#	0,75#	0,89#	0,89#	

Таблиця 5.21

Коефіцієнти кореляції морфометричних параметрів суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи із вмістом Карбону та Нітрогену в її органах (n=20)

	С Корені	С Стебла	С Листки	Н Корені	Н Стебла	Н Листки	ВС	ПЛ	ДК	МК
С Корені		0,98#	0,99#	0,94#	0,96#	0,94#	0,71#	0,90#	0,88#	0,96#
С Стебла	0,98#		0,96#	0,95#	0,96#	0,95#	0,67#	0,88#	0,82#	0,93#
С Листки	0,99#	0,96#		0,93#	0,93#	0,93#	0,78#	0,94#	0,91#	0,95#
Н Корені	0,94#	0,95#	0,93#		0,91#	0,96#	0,65#	0,84#	0,81#	0,87#
Н Стебла	0,96#	0,96#	0,93#	0,91#		0,92#	0,64#	0,83#	0,80#	0,94#
Н Листки	0,94#	0,95#	0,93#	0,96#	0,92#		0,68#	0,86#	0,81#	0,88#
ВС	0,71#	0,67#	0,78#	0,65#	0,64#	0,68#		0,93#	0,90#	0,75#
ПЛ	0,90#	0,88#	0,94#	0,84#	0,83#	0,86#	0,93#		0,93#	0,89#
ДК	0,88#	0,82#	0,91#	0,81#	0,80#	0,81#	0,90#	0,93#		0,89#
МК	0,96#	0,93#	0,95#	0,87#	0,94#	0,88#	0,75#	0,89#	0,89#	

На пелюстковій діаграмі (рис. 5.14) за допомогою сторін неправильного багатокутника візуалізовано значне відхилення екофізіологічних параметрів суданської трави від оптимальних значень рівностороннього багатокутника еталону. Показано, що додавання попелу ТЕС і гумату Калію спричиняє оптимізацію параметрів рослин, яка відображена наближенням форми фігур варіантів з додаванням цих меліорантів до фігури еталону. Зазначимо, що багатокутник, який побудований за даними варіанту з внесенням обох дослідних меліорантів за формою ближчий до фігури еталону, ніж багатокутники варіантів з додаванням тільки попелу чи гумату, що свідчить про ефективність їх сумісного застосування.

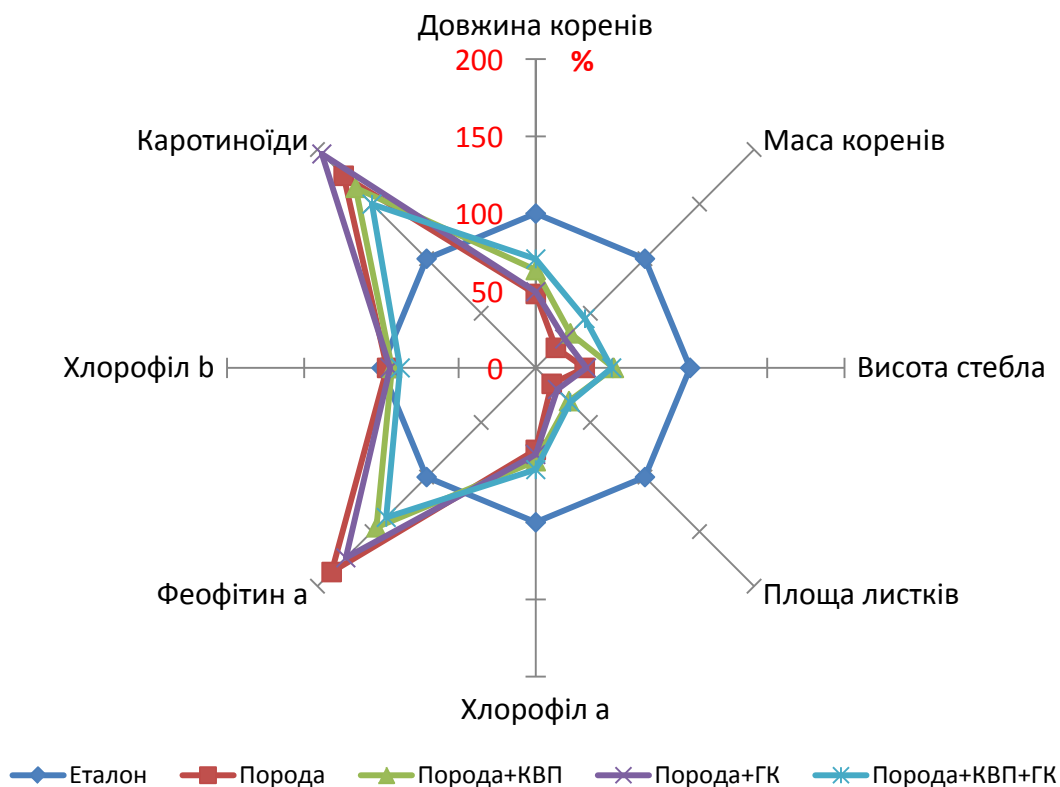


Рис. 5.14. Вплив попелу і гумату на екофізіологічні параметри суданської трави за росту на субстраті неперегорілої породи, %

### **5.2.6. Біотестування потенційного алелопатичного впливу суданської трави з використанням крес-салату**

Ефективна фітомеліорація породних відвалів вимагає попередньої фізико-хімічної меліорації субстратів [142], що зумовило необхідність оцінки фітомеліоративного потенціалу суданської трави за впливу кам'яновугільного попелу і гумату Калію. Слід зазначити, що насіння і проростки крес-салату *Lepidium sativum* L. застосовують для біотестування ґрунтів завдяки швидкому проростанню, високій схожості та чутливості до забруднення [82]. У літературі описано значне пригнічення росту коренів проростків цього біотесту за росту на субстраті неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» [25].

Ми також виявили значне пригнічення висоти пагона, довжини коренів і загальної сирої маси проростків крес-салату, які вирощували на субстраті неперегорілої породи. Додавання попелу ТЕС призвело до збільшення висоти пагонів і маси проростків. В свою чергу, внесення гумату Калію збільшило висоту пагону і масу проростків. Встановлено, що застосування попелу сумісно з гуматом позитивніше впливає на ріст проростків крес-салату, ніж тільки одного з цих меліорантів (табл. 5.22).

В літературі описано пригнічення онтогенезу інших видів рослин виділеннями кореневої системи [33]. Також відомо, що угруповання з багатшим видовим складом здебільшого стійкіші, ніж із бідним [57], що зумовило необхідність виявити потенційно можливі алелопатичні властивості суданської трави.

Морфометричні параметри проростків крес-салату після 7 діб росту на субстраті неперегорілої породи без (-) та після 95 діб вирощування (+) суданської трави протягом (n=5)

Субстрат	Вирощування суданської трави	Висота пагону, см	Довжина кореня, см	Загальна сира маса, мг
Еталон	-	10,5±0,6	8,66±0,40	60,4±4,0
	+	9,94±0,51	8,25±0,30	54,7±2,5
Порода	-	3,40±0,53	4,42±0,42	27,5±2,3
	+	3,76±0,36	4,94±0,27	4,7±2,3
Порода+КВП	-	6,42±0,41*	5,78±0,66	38,5±1,7*
	+	7,25±0,35*	6,23±0,28*	44,8±2,3*
Порода+ГК	-	5,66±0,52*	5,22±0,38	35,5±1,8*
	+	6,55±0,48*	5,98±0,31*	40,2±2,2
Порода+КВП+ГК	-	6,78±0,52*	6,23±0,38*	44,9±2,2*
	+	8,29±0,56*	6,70±0,37*	50,1±2,8*

Натомість, ми не виявили впливу вирощування суданської трави на морфометричні параметри проростків крес-салату. Крім того, нами не знайдено кореляції між морфометричними параметрами потенційного фітомеліоранта *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* та його біотесту *Lepidium sativum* L., що свідчить про відсутність алелопатичного впливу субстратів неперегорілої породи після вирощування суданської трави на ріст крес-салату (рис. 5.15; табл. 5.23).

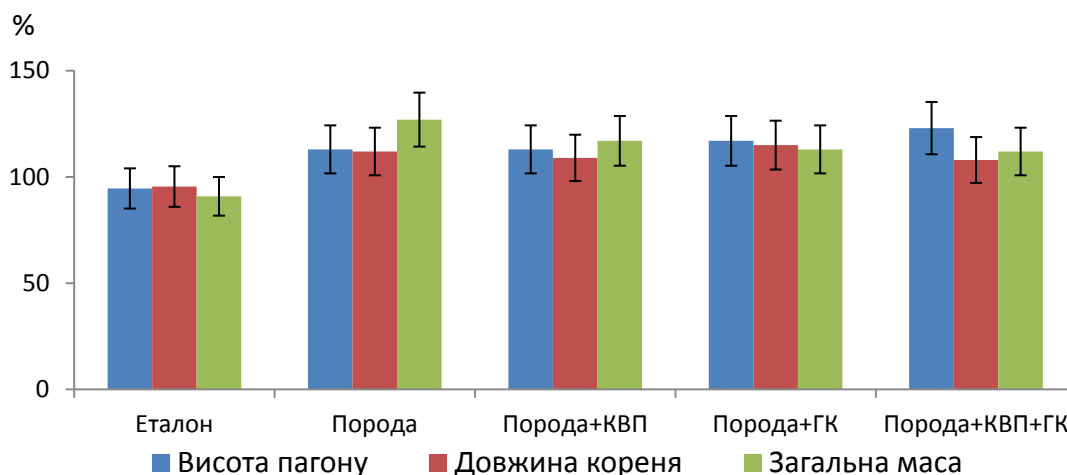


Рис. 5.15. Вплив субстрату неперегорілої породи після вирощування суданської трави на морфометричні параметри проростків крес-салату, % (n=25)

Таблиця 5.23

Коефіцієнти кореляції морфометричних параметрів суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* (Sb) і проростків крес-салату *Lepidium sativum* (Ls), які вирощували на субстраті неперегорілої породи після її росту (n=20)

	Ls-ВП	Ls-ДК	Ls-ЗМ	Sb-BC	Sb-ПЛ	Sb-ДК	Sb-МК
Ls-ВП		-0,23	-0,49#	-0,06	-0,22	-0,06	-0,17
Ls-ДК	-0,23		0,59#	0,04	-0,04	0,04	0,01
Ls-ЗМ	-0,49#	0,59		0,06	0,01	0,02	-0,01
Sb-BC	-0,06	0,04	0,06		0,93#	0,90#	0,75#
Sb-ПЛ	-0,22	-0,04	0,01	0,93#		0,93#	0,89#
Sb-ДК	-0,06	0,04	0,02	0,90#	0,93#		0,89#
Sb-МК	-0,17	0,01	-0,01	0,75#	0,89#	0,89#	

Умовні скорочення: ВП – висота пагону; ДК – довжина коренів; МК – маса коренів; BC – висота стебла; ПЛ – площа листків; ЗМ – загальна маса.

Отже, рослини суданської трави за росту на субстраті сіро-чорної неперегорілої породи відвалу ЦЗФ «Червоноградська» зазнають сильного фітостресу. Показано, що внесення кам'яновугільного попелу і гумату Калію оптимізує екофізіологічні параметри рослин. Відмічено, що їх застосування разом ефективніше, ніж тільки одного з них. Крім того,



відсутність впливу суданської трави на морфометричні параметри крес-салату свідчить про її потенційну сумісність з іншими видами насінних рослин.

**Висновок до розділу 5.** Вирощування суданської трави протягом 95 діб у напівпольових умовах показало, що субстрат сіро-чорної неперегорілої породи фітостресорніший, ніж оранжево-червоної перегорілої. З'ясовано, що сумісне внесення попелу Добротвірської ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» до субстратів обох різновидів порід відвалу ЦЗФ «Червоноградська» оптимізує екофізіологічні параметри системи субстрат-рослина ефективніше, ніж роздільне. Також встановлено, що рослини суданської трави стійкі до впливу едафічних стрес-факторів відвалів вуглевидобутку та позитивно реагують на застосування досліджуваних фізико-хімічних меліорантів, що робить її ефективним біотестом і перспективним фітомеліорантом відвалу ЦЗФ «Червоноградська».

#### **Основні публікації дисертанта за матеріалами розділу:**

1. **Шпак Я.** Вплив вугільної золи та калій гумату на фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Матеріали XII наукової конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку». – Львів, 2016. – С. 106-107.
2. Фітотоксичність субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу теплоелектростанцій і гумату калію / **Я. Шпак**, І. Запісоцька, В. Баранов, О. Терек. // Traektoriâ Nauki/Path of Science. – 2017. – №3. – Т. 3. – С. 1-17.
3. Нейтралізація фітотоксичності перегорілої породи відвалів кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом Калію / **Я. Шпак**, І. Запісоцька, В. Баранов, О. Терек. // Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. РОЗДІЛ II. Екологія. – 2017. – №7. – С. 103-108.
4. Нейтралізація фітотоксичності субстрату породних відвалів

- кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом Калію / **Я. Шпак**, І. Запісоцька, В. Баранов, В. Терек. // Збірник тез XIII міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології». – Львів, 2017. – С. 146-147.
5. **Шпак Я.** Вміст макроелементів і важких металів у породних відвалах і рослинах за впливу меліорантів / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Екологічні науки. – 2018. – №23. – Т. 4. – С. 117-123.
6. Оптимізація хімічного складу породних відвалів вуглевидобутку попелом ТЕС і гуматом Калію / І. Роман, **Я. Шпак**, В. Баранов, О. Терек. // Збірник тез XV Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології». – Львів, 2019. – С. 205-206.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі теоретично узагальнено вплив породних відвалів вуглевидобутку на довкілля і досвід проведення заходів щодо їх фітомеліорації. Також експериментально досліджено вплив кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС, гуматів Калію (вермигумату та «ГКВ-45») на фітостресорність субстратів породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська» з використанням суданської трави *Sorghum bicolor* subsp. *drummondii* для біотестування.

Результати дослідження дозволили зробити наступні висновки:

1. Морфометричні параметри суданської трави за росту на субстратах породного відвалу зазнають значного збільшення внаслідок внесення попелу ТЕС і гуматів Калію, а сумісний вплив цих меліорантів ефективніший, ніж роздільний. Зокрема, суха маса коренів після 95 діб росту на перегорілій породі складала близько 101, з додаванням до неї попелу – 132, гумату «ГКВ-45» – 188, а за сумісного впливу обох меліорантів – 283 мг.
2. Вміст і співвідношення пластидних пігментів у листках суданської трави за росту на субстратах породного відвалу зазнають сильних відхилень щодо рослин, які вирощували на умовно чистому субстраті еталону. Додавання попелу ТЕС і гуматів Калію до породи нормалізує ці параметри. Зокрема, рослини після 95 діб росту на перегорілій породі мали співвідношення хлорофіл *a*/хлорофіл *b* близьке до 1,9, з додаванням до неї попелу – 2,2, гумату «ГКВ-45» – 2,1, а за сумісного впливу обох меліорантів – 2,3, що наближається до значення рослин еталону – 2,4.
3. Рослини суданської трави за росту на субстратах породного відвалу зазнають значного підвищення вмісту фенольних сполук щодо рослин еталону. Додавання попелу ТЕС і гуматів Калію до знижує вміст цих сполук, а їх сумісний вплив ефективніший ніж роздільний. Зокрема, рослини після 21 доби росту на субстраті неперегорілої породи мали

сумарний вміст фенольних сполук близько 860 мг/г сухої маси, за сумісного впливу попелу та вермигумату Калію – 624 мг/г, що значно ближче до значення рослин еталону – 510 мг/г, ніж за впливу тільки попелу – 780 мг/г чи вермигумату – 762 мг/г.

4. Субстрат неперегорілої породи має низьке значення рН – 3,6. Додавання до нього попелу ТЕС підвищує рН до 4,3, гумату Калію «ГКВ-45» – до 4,0, а сумісний вплив обох меліорантів до 4,4.

5. Вміст рухомих форм Плюмбуму – 14 та Хрому – 44 мг/кг у субстраті неперегорілої породи перевищує ГДК для ґрунтів – 6 мг/кг. Внесення гумату Калію «ГКВ-45» знижує вміст Рb до 10 мг/кг, а його сумісне додавання з попелом ТЕС – до 8 мг/кг. Додавання попелу ТЕС до субстрату неперегорілої породи знижує вміст рухомого Хрому з 44 до 30 мг/кг, а в поєднанні з гуматом – до 27 мг/кг.

6. Сумісне додавання попелу ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» до неперегорілої породи знижує валовий вміст Плюмбуму та Хрому в рослинах суданської трави ефективніше, ніж тільки одного з них. Зокрема, корені після 95 діб росту на субстраті цієї породи містили 14,2 мг/кг Хрому, за сумісного впливу обох вищезгаданих меліорантів – 10,4, що менше ніж за впливу тільки попелу – 12,1 чи гумату – 12,4 мг/кг.

7. Субстрат неперегорілої породи характеризується низькими концентраціями рухомих форм Кальцію, Калію та Фосфору на фоні підвищених концентрацій вмісту органічного Карбону та амонійного Нітрогену. Додавання попелу ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» до цієї породи призводить до оптимізації вмісту макроелементів. Зокрема, субстрат неперегорілої породи без додавання меліорантів містив 16,2 мг/кг рухомого Фосфору, з додаванням попелу – 17,9, гумату – 21,8, а за сумісного впливу обох меліорантів – 23,7 мг/кг сухої маси.

8. Внесення у субстрат неперегорілої породи попелу ТЕС і гумату Калію «ГКВ-45» збільшує валовий вміст макроелементів у органах суданської трави. Зокрема, листки рослин після 95 діб їх росту на субстраті

неперегорілої породи без додавання вищевказаних меліорантів містили 1,2 г/кг Фосфору, з додаванням попелу – 1,6, гумату – 1,5, а за сумісного впливу обох меліорантів – 2,2 г/кг сухої маси.

9. Кореляційні зв'язки між екофізіологічними параметрами субстрату (актуальною кислотністю і хімічним складом) та рослин (розмір і маса органів, вміст пігментів фотосинтезу і хімічних елементів) суданської трави свідчать про фітостресорність породного відвалу, що значною мірою зумовлена його хімічним складом.

10. Результати досліджень дозволяють рекомендувати застосування кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС сумісно з гуматами Калію для меліорації породного відвалу ЦЗФ «Червоноградська».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агурова І. В. Особливості розвитку едафотопів в умовах відвалів вугільних шахт Донбасу / І. В. Агурова // Проблеми екології та охорони природи техногенного регіону / І. В. Агурова. – Донецьк: ДонНУ, 2009. – (Проблеми екології та охорони природи техногенного регіону). – С. 150–158.
2. Антонова Э. П. Определение содержания в почвах гумуса / Э. П. Антонова, В. Д. Скалабан, Л. Г. Сучилкина. // Почвоведение. – 1984. – №11. – С. 130-133.
3. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв / Е. В. Аринушкина. – М.: МГУ, 1970. – 488 с. – (2).
4. Баранов В. Вплив нових регуляторів росту на ростові та фізіологічні показники проростків тифону на витяжках із ґрунтів породного відвалу вугільних шахт / В. Баранов, Д. Рахметов, М. Гавриляк. // Вісник Львів. ун-ту. Серія біологічна. – 2010. – №52. – С. 191-198.
5. Баранов В. Екологічний опис породного відвалу вугільних шахт ЦЗФ ЗАТ «Львівсистеменерго» як суб'єкта озеленення / В. Баранов. // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – 2008. – №46. – С. 172-178.
6. Баранов В. І. Вплив капсульованих добрив на вміст важких металів у проростках олійних рослин на ґрунтах породного відвалу вугільних шахт / В. І. Баранов, М. Я. Гавриляк, А. С. Войціховська. // Зб. наук. праць «Питання біоіндикації та екології» Запорізького національного університету. – 2009. – №2. – С. 101-112.
7. Баранов В. І. Зміни вмісту сірки, вільних амінокислот і білка в рослинах ріпаку, підживлених капсульованими добривами на субстратах породного відвалу вугільних шахт / В. І. Баранов, М. Я. Гавриляк, Я. Я. Телегус. // Біологічні Студії/Studia Biologica. – 2010. – №11. – Т. 4. – С. 53-62.

8. Башуцька У. Б. Рослинність породних відвалів шахт Червоноградського гірничопромислового району / У. Б. Башуцька. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2006. – №16. – Т. 4. – С. 174-178.
9. Безуглова О. С. Гуминовые вещества в биосфере: Учебное пособие / О. С. Безуглова. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2009. – 120 с.
10. Бессонова В. П. Вплив важких металів на пігментну систему листка / В. П. Бессонова. // Укр.ботан.журнал. – 1992. – №2. – Т. 49. – С. 63-66.
11. Бессонова В. П. Накопление хрома в растениях и его токсичность / В. П. Бессонова, О. Е. Иванченко. // Питання біоіндикації та екології. – 2011. – №2. – Т. 16. – С. 35-52.
12. Бессонова В. П. Хром в окружающей среде / В. П. Бессонова, О. Е. Иванченко. // Питання біоіндикації та екології. – 2011. – №1. – С. 13-29.
13. Бешлей С. В. Оцінка токсичності субстратів відвалів вугільних шахт методом біотестування / С. В. Бешлей, В. І. Баранов, С. П. Ващук. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – №21. – Т. 12. – С. 98-102.
14. Бешлей С. В. Польова вологість і температура субстрату породних відвалів під заростями кунічника наземного / С. В. Бешлей, З. М. Фецько, В. І. Баранов. // Матер. IV студентської наук. - практ. конф - "Захист навколишнього середовища. Збалансування природокористування". – Львів, 2011. – С. 36-38.
15. Бешлей С. Екологічні властивості *Calamagrostis epigelos* (L.) Roth та його середовищеворна роль на відвалах вугільних шахт (Червоноградський гірничопромисловий район): дис. канд. біол. наук: 03.00.16 / С. В. Бешлей. – Львів, 2016. – 147 с.
16. Биоиндикация атмосферного озона. Под общей редакцией В. В. Зуева. – Новосибирск: СО РАН, 2006. – 228 с.
17. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем. Под ред. Шуберта Р. – М.: Мир, 1988. – 350 с.

18. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование. Под ред. Мелеховой О. П., Егоровой Е. И. – М.: Академия, 2007. – 288 с.
19. Біланич М. М. Сучасний стан дослідження впливу важких металів на рослинний світ / М. М. Біланич. // Вісник Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника. Серія: Біологія. – 2008. – №12. – С. 161-174.
20. Біляєв М. М. Моделювання і прогнозування стану довкілля: підручник для студентів вищих навчальних закладів / М. М. Біляєв, В. В. Біляєва, П. С. Кіріченко. – Кривий Ріг: ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2016. – 207 с.
21. Бойко І. В. Деградація хлорофілу в листках рослин за дії іонів кадмію та саліцилової кислоти / І. В. Бойко, М. С. Кобилецька, О. І. Терек. // Физиология и биохимия культурных растений. – 2012. – №5. – Т. 44. – С. 449-456.
22. Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна безпека / В. М. Гришко, Д. В. Сищиков, О. М. Пісковата ін. – Донецьк: Донбас, 2012. – 304 с.
23. Ващук С. П. Зміна вмісту пігментів фотосинтезу та антоціанів у рослин гірчаку сахалінського за умов росту на субстратах відвалів вугільних шахт / С. П. Ващук, В. І. Баранов, З. М. Фецько. // Збірник тез IV міжнародної студентської науково-практичної конференції «Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування». – Львів, 2011. – С. 8-40.
24. Вивчення вмісту важких металів у деревних рослин на девастрованих ґрунтах породного відвалу вугільних шахт / В. І. Баранов, М. С. Гузь, М. С. Гавриляк, С. П. Ващук. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – №20. – Т. 1. – С. 69-72.
25. Використання біогенних поверхнево-активних речовин під час вирощування сорго на субстратах відвалів вугільних шахт / [В. І.



- Баранов, А. Р. Баня, К. Я. Карпенко та ін.]. // Біологічні Студії/Studia Biologica. – 2016. – №2. – Т. 10 – С. 105-114.
26. Волотковська Ю. О. Економічна оцінка вугільних териконів як техногенних родовищ: дис. канд. екон. наук: 08.00.06 / Волотковська Ю. О. – Дніпро, 2016. – 217 с.
27. Воробйов Є. О. Методи вимірювання температури і газів породних відвалів, що горять / Є. О. Воробйов, М. О. Ніколенко, С. О. Сокирка та ін. // V Науково-практична конференція «Донбас – 2020». Донецьк . – 2010. – С. 638-643.
28. Гавриленко В. Ф. Большой практикум по физиологии растений. Фотосинтез. Дыхание. Учебное пособие / В. Ф. Гавриленко, М. Е. Ладыгина, Л. М. Хандобина. – М.: Высшая школа, 1975. – 392 с.
29. Генік Я. В. Склад та структура флори породних відвалів шахт Червоноградського гірничопромислового району / Я. В. Генік, О. Ю. Стасюк. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – №21. – Т. 17. – С. 34-38.
30. ГН 6229-91. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых количеств (ОДК) химических веществ в почве.
31. Горова А. Про біоіндикаційну оцінку впливу на довкілля ставків-накопичувачів шахтних вод (на прикладі Червоноградського гірничопромислового регіону) / А. Горова, С. Кулина, О. Шкременко. // Вісник Львів. ун-ту. Сер. Біол. – 2011. – №56. – С. 221-226.
32. ГОСТ 12038-84. Методы определения всхожести и энергии прорастания. Семена сельскохозяйственных культур. Часть 1. – М.: Изд-во стандартов. – 1984. – 57 с.
33. Гродзинский А. М. Аллелопатия растений и почвоутомление: изб. труды / А. М. Гродзинский. – К.: Наукова думка, 1991. – 432 с.

- 34.Гродзинский А. М. Краткий справочник по физиологии растений / А. М. Гродзинский, Д. М. Гродзинский. – К.: Наукова думка, 1973. – 592 с. – (2).
- 35.Губарь В. Н. Здания и сооружения с применением новых материалов и технологий / В. Н. Губарь, И. Ю. Петрик, А. В. Жибоедов. // Вісник ДонНАБА. – 2016. – №119 – Т. 3. – С. 63-70.
- 36.Гуминовые вещества в биосфере. Под ред. Орлова Д. С. – М.: Наука, 1993. – 237 с.
- 37.Демура В. І. Розподіл та накопичення важких металів в рослинах та ґрунтах на територіях розміщення відходів вуглевидобутку / В. І. Демура, В. О. Готвянська. // Геотехнічна механіка. – 2013. – №111. – С. 23-29.
- 38.Егорова А. В. зучение возможностей комплексного использования плодов черной смородины (*Ribes nigrum* L.) / А. В. Егорова, В. А. Куркин, А. М. Каримова. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – №1. – Т. 14 – С. 2215-2217.
- 39.Етимологічний словник української мови у семи томах. Т. 5: Р-Т. Уклад.: Болдирев Р. В. та ін. – К.: Наукова думка, 2006. – 704 с.
- 40.Етимологічний словник української мови у семи томах. Т. 6: У-Я. Уклад.: Півторак Г. П. та ін. – К.: Наукова думка, 2012. – 568 с.
- 41.Жук О. І. Ростові процеси у стеблі озимої пшениці за різного забезпечення мінеральним живленням / О. І. Жук. // Фактори експериментальної еволюції організмів. – 2015. – №16. – С. 110-113.
- 42.Жуков С. В. Диференціація екологічних ніш видів та формування фітоценозів на техногенно порушених землях / С. В. Жуков. // Промислова ботаніка. – 2011. – №11. – С. 36-41.
- 43.Запрометов М. Н. Фенольные соединения и методы их исследования // Биохимические методы в физиологии растений. – М.: Наука, 1971. – С. 185-197.

- 44.Зборщик М. П. Природа самовозгорания и тушения отвальных пород угольных месторождений / М. П. Зборщик, В. В. Осокин. // Уголь Украины. – 2015. – №3. – С. 76–78.
- 45.Игонин А. М. Черви-гумус-урожай / А. М. Игонин. // Достижение науки и техники АПК. – 2004. – №4. – С. 2–3.
- 46.Использование гуматов Na и K как стимуляторов роста овса в условиях породного отвала угольного разреза «Кедровский» / Н. А. Корниасова, О. А. Неверова, С. И. Жеребцов, З. Р. Исмагилов. // Разработка комплекса технологий рекультивации техногенно нарушенных земель: материалы Всероссийской научной конференции. – Кемерово, 2011. – С. 75-77.
- 47.Казнина Н. М. Влияние свинца и кадмия на рост, развитие и некоторые другие физиологические процессы однолетних злаков (ранние этапы онтогенеза): автореф. дис. канд. биол. наук: 03.00.12 / Казнина Н. М. – Петрозаводск, 2003. – 23 с.
- 48.Карпинець Л. Бріофітні угруповання та їх ренатуралізаційна роль на породних відвалах вугільних шахт Червоноградського гірничопромислового району: автореф. дис. канд. біол. наук: 03.00.16 / Л. І. Карпинець. – Львів, 2017. – 22 с.
- 49.Клеточные механизмы адаптации растений к неблагоприятным воздействиям экологических факторов в естественных условиях. под ред. Кордюм Е. Л. – К.: Наукова думка, 2003. – 240 с.
- 50.Книш І. Б. Перспективи використання відходів вугільної промисловості Львівщини як нової мінеральної сировини / І. Б. Книш. // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол. – 2006. – №20. – С. 111-123.
- 51.Книш І. Б. Розподіл вмісту хімічних елементів у породах териконів Червоноградського гірничо-промислового району / І. Б. Книш. // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. геол. – 2003. – №17. – С. 148–158.

52. Комаров А. А. Некоторые рассуждения о действии гуминовых препаратов на растения / А. А. Книш // *Агрехимический вестник*. – 2009. – №6. – С. 28-29.
53. Коршиков И. И. Устойчивость растений к техногенным загрязнителям окружающей среды / И. И. Коршиков. // *Промышленная ботаника*. – 2004. – №4. – С. 46-57.
54. Коць С. Я. Мінеральні елементи і добрива в живленні рослин: навч. посіб. для студент. вищ. навч. закл / С. Я. Коць, Н. В. Петерсон. – К.: Логос, 2015. – 244 с. – (3).
55. Крылов Д. А. Токсичность угольной тепло-электрогенерации / Д. А. Крылов. // *«Горная Промышленность»*. – 2016. – №129. – Т. 5. – С. 66-71.
56. Кучерявий В. П. Екологія / В. П. Кучерявий. – Львів: Світ, 2001. – 500 с.
57. Кучерявий В. П. Рекультивация та фітомеліорація / В. П. Кучерявий, Я. В. Генік, А. П. Дида, М. М. Колодко. – Львів: ГАФСА, 2006. – 116 с.
58. Лазарева И. В. Восстановление (рекультивация) нарушенных территорий. Опыт районной планировки и градостроительства за рубежом / И. В. Лазарева. – М.: Госстройиздат, 1962. – 32 с.
59. Лакин Г. Ф. Биометрия: учебное пособие для биол. спец. вузов / Г. Ф. Лакин. – М.: Высшая школа, 1990. – 352 с. – (4).
60. Лебедева Н. А. Возможность рекультивации Кумертауского угольного разреза без нанесения почвенного слоя / Н. А. Лебедева // *Растения и промышленная среда: Сб. научн. тр. Урал. гос. ун-та*. – Свердловск: Урал. гос. ун-т, 1984. – С. 78-84.
61. Лисовицкая О. В. Фитотестирование: основные подходы, проблемы лабораторного метода и современные решения / О. В. Лисовицкая, В. А. Терехова. // *Доклады по экологическому почвоведению*. – 2010. – №1. – Т. 13. – С. 1-18.
62. Лобачевська О. Структурно-функціональна організація мохових дернин на техногенно змінених територіях Червоноградського

- гірничопромислового району / О. Лобачевська, Р. Соханьчак, С. Бешлей. // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – №79. – С. 86-94.
- 63.Макеева Н. А. Оценка продукционных процессов овса в условиях внесения гуматов калия и натрия на породный отвал / Н. А. Макеева. // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №6. – 6. с.
- 64.Малиновський А. К. Екологічна ніша в природних та антропогенно змінених фітоценозах / А. К. Малиновський, В. Г. Кияк, В. М. Білонога. // Наукові записки державного природознавчого музею. – 2004. – Т. 19. – С. 83-86.
- 65.Матолич Б. М. Природні ресурси Львівщини / Б. М. Матолич, І. П. Ковальчук, Є. А. Іванов, та ін. – Львів: ПП Лукашук В. С, 2009. – 120 с.
- 66.Мікрокосмні моделі екосистем: монографія / С. С.Костишин, С. С. Руденко, О. Д. Махрова, О. Д. Зароченцева. – Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2015. – 336 с.
- 67.Мінеральний склад відходів видобутку і збагачення вугілля, їхні екзогенні зміни та вплив на природні води за результатами гідрогеологічного моделювання (Червоноградський гірничопромисловий район) / Г.Бучацька, Н. Дворянська, А. Дворянський, В. Дяків. // Мінералогічний збірник. – 2014. – №64. – С. 176-194.
- 68.Моніторинг довкілля: підручник; під ред. В. М. Боголюбова / [В. М. Боголюбов, М. О. Клименко, В. Б. Мокін та ін.]. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 232 с.
- 69.Нагромадження надземної фітомаси *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth на злаковій і деревно-злаковій стадіях сукцесії рослинності на відвалах вугільних шахт Червоноградського гірничопромислового району (Львівська область) // Наукові основи збереження біотичної різноманітності. – 2011. – № 1. – Т. 2. – С. 23-32.

70. Нейтралізація фітотоксичності перегорілої породи відвалів кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом Калію / Я. Шпак, І. Запісоцька, В. Баранов, О. Терек. // Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. РОЗДІЛ II. Екологія. – 2017. – №7. – С. 103-108.
71. Нейтралізація фітотоксичності субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом Калію / Я. Шпак, І. Запісоцька, В. Баранов, В. Терек. // Збірник тез XIII міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології». – Львів, 2017. – С. 146-147.
72. Окрушко С. Є. Вивчення впливу іонів свинцю на проростки ярого ячменю / С. Є. Окрушко. // Корми і кормовиробництво. – 2012. – №72. – С. 23–28.
73. Оптимізація хімічного складу породних відвалів вуглевидобутку попелом ТЕС і гуматом Калію / І. Роман, Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Збірник тез XV Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології». – Львів, 2019. – С. 205-206.
74. Павлова Л. М. Состояние фотосинтетических пигментов в вегетативных органах древесных растений в городской среде / Л. М. Павлова, И. М. Котельникова, Н. Г. Куимова. // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2010. – №2. – С. 11-19.
75. Піндер В. Ф. Рекультивация породних відвалів ліквідованих шахт Львівсько-Волинського вугільного басейну / В. Ф. Піндер, В. В. Попович. // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – №27. – Т. 3. – С. 113-116.
76. Поглинання важких металів *Sorghum halepense* із субстратів породного відвалу / З. Бешлей, С. Бешлей, В. Баранов, О. Терек. // Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія біологія. – 2014. – №2. – Т. 32. – С. 97-100.

77. Попов А. И. Гуминовые вещества. Свойства, строение, образование. Под ред. Е. И. Ермакова / А. И. Попов. – СПб: Петерб. ун-т, 2004. – 248 с.
78. Популярні методи аналізу ґрунтів: Методичні рекомендації до курсових і кваліфікаційних робіт. Укл. Польчина С. М – Чернівці: Рута, 2006. – 88 с.
79. Порівняльний морфометричний аналіз рослин сорго алепського за умов росту на субстратах породного відвалу з додаванням нетрадиційних добрив / З. Бешлей, С. Бешлей, В. Баранов, О. Терек. // *Modern Phytomorphology*. – 2015. – №6. – С. 47-348.
80. Правила проведення біологічної рекультивації породних відвалів вугільних шахт України. Видання офіційне. – К.: Мінвуглепром України, 2007. – 30 с.
81. Практикум по агрохімії: Учеб. пособие. Под ред. академика РАСХН В. Г. Минеева – М.: МГУ, 2001. – 689 с. – (2).
82. Руденко С. С. Загальна екологія: практичний курс. Навчальний посібник. У 2 ч. Частина 1. Урбоєкосистеми / С. С. Руденко, С. С. Костишин, Т. В. Морозова. – Чернівці: Книги – ХХІ, 2008. – 342 с.
83. Руденко С. С. Загальна екологія: практичний курс. Навчальний посібник. У 2 ч. Частина 2. Природні наземні екосистеми / С. С. Руденко, С. С. Костишин, Т. В. Морозова. – Чернівці: Книги – ХХІ, 2008. – 307 с.
84. Руденко С. С. Штучні екосистеми в екології / С. С. Руденко, С. С. Костишин, І. О. Ситнікова. – Чернівці: Рута, 2006. – 200 с.
85. Самохвалова В. Л. Біологічні методи ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами / В. Л. Самохвалова. // *Біологічні Студії/Studia Biologica*. – 2014. – №1. – Т. 8 – С. 217-236.
86. Скляр В. Г. Екологічна фізіологія рослин: підручник. Під заг. редакцією Ю. А. Злобіна / В. Г. Скляр. – Суми: Університетська книга, 2015. – 271 с.

87. Термины и определения по охране окружающей среды, природопользованию и экологической безопасности – СПб: Петерб. ун-т, 2001. – 136 с.
88. Токсико-гигиеническая характеристика породы террикона шахты № 8 “Великомостовская”, ЛодНГМИ, Укрзападуголь. – 1992. – С. 8.
89. Токсикологічний аналіз води дренажних каналів і золи золовідвалів Добротвірської ТЕС / [І. Баранов, А. Баня, Л. Боднар та ін.]. // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – 2014. – №65. – С. 238-244.
90. Трахтенберг И. М. Книга о ядах и отравлениях: очерки токсикологии / И. М. Трахтенберг. – К.: Наукова думка, 2000. – 366 с.
91. Универсальный иономер ЭВ-74. Паспорт. – Гомель: Завод измерительный приборов. – 1981. – 38 с.
92. Фецко З. М. Техногенно девастовані території вугле- і нафтовидобувної промисловості та заходи щодо їх фітомеліорації / З. М. Фецко, О. І. Терек, В. І. Баранов. // Біологічні Студії/Studia Biologica. – 2012. – №3. – Т. 6. – С. 235–246.
93. Фітотоксичність субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу теплоелектростанцій і гумату калію / Я. Шпак, І. Запісоцька, В. Баранов, О. Терек. // Traektoriâ Nauki/Path of Science. – 2017. – №3. – Т. 3. – С. 1-17.
94. Черепанов А. А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) / А. А. Черепанов, В. Т. Кардаш. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2009. – №2. – С. 98-115.
95. Чесноков Б. В. Опыт минералогии техногенеза - 15 лет на горелых отвалах угольных шахт, разрезов и обогатительных фабрик Южного Урала / Б. В. Чесноков. // Уральский минералогический сборник. – 1999. – №9. – С. 138-167.
96. Шпак Я. В. Вплив біогумату на морфометричні параметри та вміст пігментів фотосинтезу в листках сорго за умов росту на субстратах



- породних відвалів вугільних шахт / Я. В. Шпак, В. І. Баранов, О. І. Терек. // Збірник тез 65-ї науково-технічної конференції «Наукові основи підвищення продуктивності та біологічної стійкості лісових та урбанізованих екосистем». – Львів, 2015. – С. 131-133.
97. Шпак Я. Вміст макроелементів і важких металів у породних відвалах і рослинах за впливу меліорантів / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Екологічні науки. – 2018. – №23. – Т. 4. – С. 117-123.
98. Шпак Я. Вплив вугільної золи та калій гумату на фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Матеріали XII наукової конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку». – Львів, 2016. – С. 106-107.
99. Шпак Я. Моделювання впливу золи Добротвірської ТЕС на фітотоксичність породних відвалів вугільних шахт за допомогою сорго трав'янистого / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Збірник тез XII Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології». – Львів, 2016. – С. 346-347.
100. Шпак Я. Стійкість сорго трав'янистого (*Sorghum vulgare* var. *sudanense* Hitch.) до умов породних відвалів породних відвалів кам'яновугільних шахт / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Матеріали XI Наукової конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку». – Шацьк, 2015. – С. 115-116.
101. Шпак Я. Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу додавання кам'яновугільного попелу / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Вісник Львівського університету. Серія біологічна. – 2016. – №74. – С. 127-135.
102. Шпак Я. Фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу кам'яновугільного попелу та вермигумату / Я. Шпак, В. Баранов, О. Терек. // Біологічні системи. – 2017. – №1. – Т. 9. – С. 138-143.

103. Якименко О. С. Гуминовые препараты и оценка их биологической активности для целей сертификации / О. С. Якименко, В. А. Терехова. // Почвоведение. – 2011. – №11. – С. 1334-1343.
104. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / [Z. Yao, X. Ji, P. Starker et al.]. // Earth-Science Reviews. – 2015. – №141. – P. 105-121.
105. Accumulation of as, cd, and pb in sixteen wheat cultivars grown in contaminated soils and associated health risk assessment / [G. Guo, M. Lei, Y. Wang et al.]. // Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2018. – №15. – V. 2601. – P. 1-17.
106. Accumulation of heavy metals using Sorghum sp / [P. Soudek, S. Petrova, R. Vankova et al.]. // Chemosphere. – 2014. – №104. – P. 15-24.
107. Adamu U. Evaluation of soil reaction, exchangeable acidity and cation exchange capacity of soils from Kano University of Science and Technology wudil teaching, research and commercial farm, Gaya / U. Adamu, A. Muhammad, I. Adam. // Bayero Journal of Pure and Applied Sciences. – 2014. – №1. – V. 7. – P. 52-55.
108. Air Pollutant Emissions from Coal-Fired Power Plants / [D. Li, Y. Guo, Y. Li et al.]. // Open Journal of Air Pollution. – 2012. – №1. – P. 37-41.
109. Ali M. Effect of humic acid on soil chemical and physical characteristics of embankment / M. Ali, W. Mindari. // MATEC Web of Conferences. – 2016. – №58. – V. 01028 – P. 1-6.
110. Allocation, stress tolerance and carbon transport in plants: how does phloem physiology affect plant ecology? / [J. Savage, M. Cleawater, D. Haines et al.]. // Plant, Cell & Environment. – 2016. – №39. – P. 709-725.
111. Ansari F. Fly-ash from Coal-fired Thermal Power Plants: Bulk Utilization in Horticulture / F. Ansari, A. Gupta, M. Yunus. // Int. J. Environ. Res. – 2011. – №1. – V. 5. – P. 101-108.
112. Application of humic substances in the remediation of heavy-metal-polluted soils of the Subarctic Zone of the Kola Peninsula / [P. Tregubova, G.

- Koptsik, A. Stepanov et al.]. // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. – 2017. – №72. – P. 207-214.
113. Arsenic, boron, molybdenum, and selenium in successive cuttings of forage crops field grown on fly ash amended soil / [W. Gutenman, I. Pakkala, J. Dorothy et al.]. // J. Agric. Food Chem. – 1979. – №6. – V. 27. – P. 1393-1395.
114. Arshi A. Reclamation of coal mine overburden dump through environmental friendly method / A. Arshi. // Saudi Journal of Biological Sciences. – 2017. – №24. – P. 371–378.
115. Ashraf M. Photosynthesis under stressful environments: An overview / M. Ashraf, P. Harris. // Photosynthetica. – 2013. – №51. – P. 163-190.
116. Atmosphere-soil carbon transfer as a function of soil depth / [J. Balesent, I. Basile-Doelsch, J. Chadoeuf та ил.]. // Nature. – 2018. – №559. – P. 599-602.
117. Barker A. Handbook of Plant Nutrition / A. Barker, D. Pilbeam. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 773 p.
118. Baumgarten A. Phytotoxicity / Baumgarten. – Vienna: Agency for Health and Food Safety, 2003. – 20 p.
119. Behera S. Spatial Distribution of Surface Soil Acidity, Electrical Conductivity, Soil Organic Carbon Content and Exchangeable Potassium, Calcium and Magnesium in Some Cropped Acid Soils of India / S. Behera, A. Shukla. // Land degradation and development. – 2015. – №1. – V. 26. – P. 71-79.
120. Belyaeva O. Chemical, microbial and physical properties of manufactured soils produced by co-composting municipal green waste with coal fly ash / O. Belyaeva, R. Haynes. // Bioresour. Technol. – 2009. – №100. V. 21. – P. 5203-5209.
121. Bennet A. Calcium Deficiency and Ammonia Toxicity as Separate Causal Factors of  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Injury to Seedlings / A. Bennet, F. Adams. // SOIL SCI. SOC. AMER. PROC. – 1970. – №2. – V. 34. – P. 255-259.

122. Billingham K. Humic Products: Potential or presumption for agriculture / Billingham. – Sydney: NSW Agriculture, 2012. – 112 p.
123. Bini C. Environmental Impact of Abandoned Mine Waste: A Review / Bini. – NY: Nova Science Publishers, 2011. – 90 p.
124. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change / [J. Elser, W. Fagan, A. Kerkhoff et al.]. // *New Phytologist*. – 2010. – №186. – P. 593-608.
125. Bogomolova E. Morphometrical comparison of the series of strains of black yeasts *Phaeococcomyces exophiale* / E. Bogomolova, D. Vlasov, L. Panina. // *Mycol. and phytopat.* – 2000. – №2. – V. 34. – P. 40-48.
126. Bolan N. Spoil to Soil: Mine Site Rehabilitation and Revegetation / N. Bolan, M. Kirkham, Y. Ok. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 371 p.
127. Canellas L. Physiological responses to humic substances as plant growth promoter / L. Canellas, F. Olivares. // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. – 2014. – №3. – V. 1. – P. 1-11.
128. Caporale A. Chemical Processes Affecting the Mobility of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments / A. Caporale, A. Violante. // *Current Pollution Reports*. – 2016. – №1. – V. 2. – P. 1-27.
129. Chibuike G. Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods / G. Chibuike, S. Obiora. // *Applied and Environmental Soil Science*. – 2014. – ID. 752708 – P. 1-12.
130. Chromium toxicity and tolerance in plants / [H. Singh, P. Mahajan, S. Kaur et al.]. // *Environmental Chemistry Letters*. – 2013. – №11. – P. 229-254.
131. Chromium toxicity in plants / A.Shanker, C. Cervantes, H. Loza-Tavera, S. Avudainayagam. // *Environment International*. – 2005. – №31. – P. 739-753.
132. Chromium toxicity induced alterations in growth, photosynthesis, gas exchange attributes and yield formation in maize / [S. Anjum, U. Ashraf, I. Khan et al.]. // *Pak. J. Agri. Sci.* – 2016. – №53. – V. 4. – P. 751-757.

133. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production / Y.Taha, M. Benzaazoua, R. Hakkou, M. Mansori. // *Minerals Engineering*. – 2017. – №107. – P. 123-138.
134. Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti / [M. Lynch, M. Mulvaney, S. Hodges та ін.]. // *SpringerPlus*. – 2016. – №5. – V. 973. – P. 1-9.
135. Determining critical soil pH for grain sorghum production / [K. Butchee, D. Arnall, A. Sutradhar та ін.]. // *International Journal of Agronomy*. – 2012. – ID. 30254 – 6 p.
136. Draszawka-Bołzan B. Effect of pH and soil environment / Draszawka-Bołzan. // *World News of Natural Sciences*. – 2017. – №8. – P. 50-60.
137. Duncan R. Leaf elemental concentrations and grain yield of sorghum grown on an acid soil / R. Duncan, J. Dobson, C. Fisher. // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 1980. – №7. – V. 11. – P. 699-707.
138. Effect of commercial lignosulfonate-humate on *Zea mays* L. metabolism / [A. Ertani, O. Francioso, V. Tugnoli та ін.]. // *J. Agric. Food Chem*. – 2011. – №59. – P. 11940-11948.
139. Effect of fulvic acid on the phosphorus availability in acid soil / [S. Yang, Z. Zhang, L. Cong та ін.]. // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. – 2013. – №3. – V. 13. – C. 526- 533.
140. Environmental encyclopedia / P.Brimblecombe, M. Cunningham, W. Cunningham, W. Freedman. – Farmington Hills: Gale, 2003. – 929 p.
141. Fabricated soil using coal mine waste / [B. Vasquez, I. Schneider, C. Trein et al.]. // *Annual International Mine Water Association Conference–Reliable Mine Water Technology*. – 2013. – №2. – P. 977-983.
142. Firpo B. brief procedure to fabricate soils from coal mine wastes based on mineral processing, agricultural, and environmental concepts / B. Firpo, J. Filho, I. Schneider. // *Minerals Engineering*. – 2015. – №76. – P. 81-86.
143. Fly ash mixing with mine OB dumps: an envirofriendly, clean and green method of disposal / P. Dewangan, R. Lokhande, A. Agarwal, R. Patel. //

- International Journal of Science and Technology. – 2017. – №2. – V. 3. – P. 105-121.
144. Gaseous compounds and efflorescences generated in self-heating coal-waste dumps–A case study from the Upper and Lower Silesian Coal Basins (Poland) / [M. Fabrinska, J. Ciesielczuk, Ł. Kruszewsky et al.]. // International Journal of Coal Geology. – 2013. – №116. – P. 247-261.
145. Gatabazi A. Nitrogen, phosphorus and potassium availability as influenced by humate and fulvate soil amendment: MS Dissertation in Agronomy. – Pretoria, 2014. – 106 p.
146. Ghabbour E. Humic Substances: Structures, Properties And Uses / E. Ghabbour, E. Davies. – Cambridge: Woodhead Publishing, 1998. – 272 p.
147. Glossary of Reclamation and Remediation Terms Used in Alberta. – Edmonton: Alberta Environment, 2002. – 88 p. – (7).
148. Gupta A. Augmenting the Stability of OB Dump by Using Fly Ash: A Geo Technical Approach to Sustainably Manage OB Dump at Jharia Coalfield, India / A. Gupta, B. Paul. // Current World Environment. – 2016. – №1. – V. 11. – P. 204-211.
149. Hashimoto H. Carotenoids and Photosynthesis. / H. Hashimoto, C. Urugami, R. Cogdell // Stange C. (eds) Carotenoids in Nature. Subcellular Biochemistry. – Cham: Springer, 2016. – (Subcellular Biochemistry; V. 79). – P. 111-139.
150. Havaux M. Carotenoid oxidation products as stress signals in plants / M. Havaux. // Plant J. – 2013. – №79. – P. 597-606.
151. Hea Z. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment / Z. Hea, X. Yanga, P. Stoffellab. // Trace Elements in Medicine and Biology. – 2005. – №19. – P. 125-140.
152. Heavy Metal Concentration Survey in Soils and Plants of the Les Malines Mining District (Southern France): Implications for Soil Restoration / J. Escarry, S. Raboyeau, A. Dossantos, C. Collin. // Water Air Soil Pollution. – 2011. – №216. – P. 485-504.

153. Hurst R. Strontium isotopes as tracers of airborne fly ash from coal-fired power plants / R. Hurst, T. Davis. // *Environmental Geology*. – 1981. – №6. – V. 3. – P. 363-367.
154. Impact of potassium humate on selected chemical properties of an Acidic soil / [A. Shujrah, K. Mohd, A. Hussin et al.]. // *Materials of 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*. – Brisbane, 2010. – P. 119-122.
155. Influence of Iron, Potassium, Magnesium, and Nitrogen Deficiencies on the Growth and Development of Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) and Sunflower (*Helianthus annuus* L.) / [C. Hartz, P. Petty, K. Ouertani et al.]. // *Seedlings. Journal of Biotech Research*. – 2009. – №1. – P. 64-71.
156. Iyer R. Power station fly ash - a review of value-added utilization outside of the construction industry / R. Iyer, J. Scott. // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2001. – №3. – V. 31. – P. 217-228.
157. Jala S. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production - a review / S. Jala, D. Goyal. // *Bioresour Technol*. – 2006. – №97. – P. 1136-1147.
158. Johnson D. Acid mine drainage remediation options: a review / D. Johnson, K. Hallberg. // *Science of the Total Environment*. – 2005. – №338. – P. 3-14.
159. Kant S. Potassium uptake by higher plants: from field application to membrane transport / S. Kant, P. Kant, U. Kafkant. // *Acta Agronomica Hungarica*. – 2005. – №53. – V. 4. – P. 1-17.
160. Khaled H. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity / H. Khaled, H. Fawy. // *Soil & Water Res*. – 2011. – №1. – V. 6 – P. 21-29.
161. Knysh I. Heavy metals distribution in the waste pile rocks of Chervonogradska mine of the Lviv-Volyn coal basin (Ukraine) / I. Knysh, V. Karabyn. // *Pollution Research*. – 2014. – №33. – P. 663-670.

162. Kulbat K. The role of phenolic compounds in plant resistance / K. Kulbat. // *Biotechnol Food Sci.* – 2016. – №80. – P. 97-108.
163. Kumar B. Mining waste contaminated lands: an uphill battle for improving crop productivity / B. Kumar. // *Journal of degraded and mining lands management.* – 2013. – №1. – V. 1. – P. 43-50.
164. Kuzyakow Y. Carbon input the soil. Review / Y. Kuzyakow, G. Domanski. // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* – 2000. – №163. – P. 421-431.
165. Lal R. Soil health and carbon management / R. Lal. // *Food and Energy Security.* – 2016. – №4. – V. 5. – P. 212-222.
166. Landi M. Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions / M. Landi, M. Tattini, K. Gould. // *Environmental and Experimental Botany.* – 2015. – №119. – P. 4-17.
167. Lichtenthaler H. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy / H. Lichtenthaler, C. Buschmann. // *Current Protocols in Food Analytical Chemistry.* – 2001. – №3. – V. 4. – P. 1-8.
168. Lichtenthaler H. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes / Lichtenthaler. // *Methods in Enzymology.* – 1987. – №148. – P. 350-382.
169. Maiti D. Ecorestoration Of Waste Dump By The Establishment Of Grass-Legume Cover / D. Maiti, S. Maiti. // *IJSTR.* – 2014. – №3. – V. 3. – P. 37-41.
170. Malhotra H. Phosphorus Nutrition: Plant Growth in Response to Deficiency and Excess / H. Malhotra, S. Sharma, R. Pandey // *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance* / H. Malhotra, S. Sharma, R. Pandey. – Singapore: Springer Nature, 2018. – P. 171-190.
171. Marschner H. In vivo measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: effect of plant species and nitrogen source / H. Marschner, V. Römheld. // *Zeitschrift für Pflanzenphysiologie.* – 1983. – №3. – V. 111. – P. 241-251.



172. Martin E. A. Dictionary of Biology / E. Martin, R. Hine. – Oxford University Press, 2008. – 736 p. – (6).
173. Mendez M. Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments-An Emerging Remediation Technology / M. Mendez, R. Maier. // Environmental Health Perspectives. – 2008. – №3. – V. 116. – P. 278-283.
174. Michalak A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress / Michalak. // Polish J. of Environ. Stud. – 2006. – №4. – V. 15 – P. 523-530.
175. Muller I. Seed viability and re-growth of grasses used for mine waste rehabilitation: MS Dissertation in Environmental Sciences. – Mahikeng, 2014. – 143 p.
176. Nath K. Effect of chromium and tannery effluent toxicity on metabolism and growth in cowpea seedlings / K. Nath, D. Singh, S. Shyam. // Res. Environ. Life Sci. – 2008. – №3. – V. 1. – P. 91-94.
177. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyperspectral reflectance properties of sorghum / D.Zhao, K. Reddy, V. Kakani, V. Reddy. // Europ. J. Agronomy. – 2005. – №22. – P. 391-403.
178. Oliveira H. Chromium as an Environmental Pollutant: Insights on Induced Plant Toxicity. / H. Oliveira. // Hindawi Publishing Corporation Journal of Botany. – 2012. – ID. 375843. – P. 1-8.
179. Opportunities for mobilizing recalcitrant phosphorus from agricultural soils: a review / [D. Menezes-Blackburn, C. Giles, T. Darch et al.]. // Plant Soil. – 2018. – №1. – V. 427. – P. 5-16.
180. Perminova I. Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice / I. Perminova, K. Hatfield, N. Hertkorn. – NY: Springer Science & Business Media, 2006. – 506 p.
181. Phytoextraction and phytostabilization potential of plants grown in the vicinity of heavy metal-contaminated soils: a case study at an industrial town

- site / B.Lorestani, N. Yousefi, M. Cheraghi, A. Farmany. // Environ Monit Assess. – 2013. – №185. – P. 10217-10223.
182. Phytoreclamation of Abandoned Acid Mine Drainage Site After Treatment with Fly Ash / [M. Roy, R. Roychowdhury, P. Mukherjee et al.]. // IntechOpen. – 2018. – ID. 69527. – P. 101-118.
183. Plant Growth and Trace-Element Uptake on Acidic Coal Refuse Amended with Lime or Fly Ash / J. Jastrow, C. Zimmerman, J. Dvorak, R. Hinchman. // Environ. Qual. – 1981. – №2. – V. 10. – P. 154-160.
184. Plant Physiology and Development / [L. Taiz, E. Zeiger, I. Moller et al.]. – Sunderland: Sinauer Associates, 2015. – 896 p. – (6).
185. Plant signaling molecules. Role and Regulation under Stressful Environments – Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. – 596 p. – (1).
186. Pohrebennyk V. Influence of Dobrotvir thermal power plant on environmental specifications / V. Pohrebennyk. // Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Environmental problems. – 2016. – №1. – V. – P. 83-89.
187. Potassium Humate: A Potential Soil Conditioner and Plant Growth Promoter / [D. Kumar, A. Singh, P. Raha et al.]. // IJAEB. – 2013. – №3. – P. 441-446.
188. Potential use of *Sorghum bicolor* and *Carthamus tinctorius* in phytoremediation of nickel, lead and zinc / Z. Chami, N. Amer, L. Al Bitar, I. Cavoski. // Int. J. Environ. Sci. Technol. – 2014. – №12. – P. 3957–3970.
189. Prapajapati K. The importance of potassium in plant growth – a review / K. Prapajapati, H. Modi. // Indian Journal of Plant Sciences. – 2012. – №3. – V.1 – P. 177-186.
190. Prelac M. The phytoremediation potential of heavy metals from soil using *Poaceae* energy crops: A review / M. Prelac, M. Bilandžia, Ž. Zgorelec. // Journal of Central European Agriculture. – 2016. – №3. – V. 17. – P. 901-916.

191. Raj S. Approach for improved plant growth using fly ash amended soil / S. Raj, S. Mohan. // IJETAE. – 2014. – №6. – P. 709-715.
192. Ram L. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments / L. Ram, R. Masto. // Earth-Science Reviews. – 2014. – №128. – P. 52-74.
193. Rapid Determination of Chlorophyll and Pheophytin in Green Tea Using Fourier Transform Infrared Spectroscopy / [X. Li, R. Zhou, K. Xu et al.]. // Molecules. – 2018. – №23. – V. 1010. – P. – 1-13.
194. Rasse D. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. Plant and Soil / D. Rasse, C. Rumpel, M. Dignac. // Plant and Soil. – 2005. – №269. – P. 341-356.
195. Removal of cationic and anionic heavy metals from water by 1D and 2D-carbon structures decorated with magnetic nanoparticles / [C. Santosh, R. Nivetha, P. Kollu et al.]. // Scientific Reports. – 2017. – №7. – ID. 14107. – P. 1-11.
196. Removal of trace metals by *Sorghum bicolor* and *Helianthus annuus* in a site polluted by industrial wastes: a field experience / L. Marchiol, G. Fellet, D. Perosa, G. Zerbi. // Plant Physiol Biochem. – 2007. – №45. – V.5. – P. 379-387.
197. Responses of the phenolic compounds of *Zea mays* under heavy metal stress / D. Kisa, M. Elmastas, L. Öztürk, Ö. Kayir. // Appl Biol Chem. – 2016. – №59. – P. 813-820.
198. Roebuck C. Excel HSC chemistry / Roebuck. – Glebe: Pascal Press, 2003. – 294 p.
199. Role of antioxidants in the protection against the combined effect of Cd, Zn, and Ni in wheat / V. Gryshko, T. Artiushenko, A. Boldizar, G. Kocsy. // Dopov. Nac. akad. nauk Ukr. – 2016. – №5. – C. 110-116.
200. Role of Nitrogen for Plant Growth and Development: A Review / [S. Leghari, A. Wahocho, G. Laghari et al.]. // Advances in Environmental Biology. – 2016. – №9. – V. 9. – P. 209-218.

201. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment / [T. Kätterer, M. Bolinder, O. Andren et al.]. // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. – 2011. – №12. – V. 141. – P. 184-192.
202. Rutting T. Efficient use of nitrogen in agriculture / T. Rutting, H. Aronson, S. Delin. // *Nutr Cycl Agroecosyst*. – 2018. – №110. – P. 1-5.
203. Sahoo P. Recovery of metals and other beneficial products from coal fly ash: a sustainable approach for fly ash management / P. Sahoo, K. Kim, M. Powell. // *International Journal of Coal Science & Technology*. – 2016. – №3. – V. 3. – P. 267-283.
204. Sanyal S. Chemistry of Phosphorus Transformations in Soil / S. Sanyal, S. De Datta // *Advances in Soil Science* / S. Sanyal, S. De Datta. – NY: Springer, 1991. – V. 16. – P. 1-120.
205. Seema R. Approach for improved plant growth using fly ash amended soil / R. Seema, M. Sumedha. // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2014. – №6. – V. 4. – P. 709-715.
206. Semida W. M. et al. Influence of potassium humate and ascorbic acid on growth, yield and chemical composition of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under reclaimed soil conditions / M. Barakat, A. Osman, W. Semida, M. Gyushi. // *International journal of academic research*. – 2015. – №1. – V. 7. – P. 192-199.
207. Sharma P. Lead toxicity in plants / P. Sharma, R. Dubey. // *Braz. J. Plant Physiology*. – 2005. – №1. – V. 17. – P. 35-52.
208. Sharygin V. Mayenite-supergrupp minerals from burned dump of the Chelyabinsk Coal Basin / Sharygin. // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – №56. – P. 1603-1621.
209. Sherene T. Mobility and transport of heavy metals in polluted soil environment / Sherene. // *Biological Forum*. – 2010. – №2. – V. 2. – P. 112-121.

210. Shpak Y. Modeling of chromium effect on ecophysiological parameters of soil-plant system / Y. Shpak, S. Rudenko. // *Studia Biologica*. – 2015. – №2. – V. 11. – P. 115-124.
211. Sihag S. Toxic affects of chromium on some quality parameters of *Sorghum bicolor* (L.) / S. Sihag, U. Joshi. // *J. Appl. & Nat. Sci.* – 2018. – №1. – V. 10. – P. 122-127.
212. Singh J. Photosynthesis and Abiotic Stress in Plants / J. Singh, J. Thakur // Vats S. (eds) *Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Plants* / J. Singh, J. Thakur. – Singapore: Springer, 2018. – P. 27-46.
213. Singh R. Value added utilization of fly ash-prospective and sustainable solutions / R. Singh, N. Gupta. // *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*. – 2014. – №1. – V. 3. – P. 1-16.
214. Smolikova G. Chlorophylls and Carotenoids in Seed Tolerance to Abiotic Stressors / G. Smolikova, N. Laman, O. Boriskevich. // *Russ J Plant Physiol*. – 2011. – №58. – P. 965-973.
215. Soil Organic Carbon Accumulation and Greenhouse Gas Emission Reductions from Conservation Agriculture: A literature review / [S. Corsi, T. Friedrich, A. Kassam et al.]. // *Integrated crop management*. – 2012. – V. 16. – 90 p.
216. Srivastava A. Amelioration of coal mine spoils through fly ash application as liming material / A. Srivastava, P. Chhnkar. // *J. Sci. Ind. Res.* – 2000. – №59. – P. 309-313.
217. Srivastava D. Lead toxicity and tolerance in Plants / D. Srivastava, A. Singh, M. Baunthiyal. // *J Plant Sci Res*. – 2015. – №2. – V. 2. – P. 1-5.
218. Stability of Chlorophyll as Natural Colorant: A Review for Suji (*Dracaena angustifolia* (Medik.) Roxb.) Leaves' Case / D. Indrasti, N. Andarwulan, E. Purnomo, N. Wulandari. // *Curr. Res. Nutr Food Sci Jour*. – 2018. – №3. – P. 609-625.

219. Techniques to correct and prevent acid mine drainage: A review / [S. Pozo-Antonio, I. Puente-Luna, S. Lagueta-Lopez et al.]. // *Dyna rev.fac.nac.minas.* – 2014. – №184. – P. 73-80.
220. The effect of bioremediation technologies on mobile phosphorus content from polluted soil with crude oil / [L. Burtan, M. Dumitru, C. Sirbu et al.]. // *Research Journal of Agricultural Science.* – 2015. – №3. – P. 15-22.
221. The effect of fly ash on vegetative growth and photosynthetic pigment concentrations of rice and maize / S.Panda, L. Mishra, S. Muduli, B. Nayak. // *Biologija.* – 2015. – №2. – V. 61. – P. 94-100.
222. The Induction of Antioxidant Enzyme Activities in Cabbage Seedlings by Heavy Metal Stress / [J. Kumchai, J. Huang, C. Lee et al.]. // *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering.* – 2013. – №1. – V. 7. – P. 41-46.
223. The role of pH in heavy metal contamination of urban soil / A.Kazlauskaite-Jadzeviče, J. Volungevičius, V. Gregorauskiener, S. Marchinkonis. // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management.* – 2014. – №4. – V. 22. – P. 1-11.
224. Tiwari M. Fly Ash Utilization: A Brief Review in Indian Context / M. Tiwari, S. Bajpai, U. Dewangan. // *IRJET.* – 2016. – №4. – P. 949-956.
225. Trace element geochemistry of self-burning and weathering of a mineralized coal waste dump: The Novátor mine, Czech Republic / [B. Kříbek, I. Sýkorová, F. Veselovský et al.]. // *International Journal of Coal Geology.* – 2017. – №173. – P. 158-175.
226. Tsang D. Residual leachability of CCA-contaminated soil after treatment with biodegradable chelating agents and lignite-derived humic substances / D. Tsang, W. Olds, P. Weber. // *Journal of Soils and Sediments.* – 2013. – №13. – P. 895-905.
227. Understanding the salinity issue of coal mine spoils in the context of salt cycle / X.Li, J. Park, M. Edraki, T. Baumgartl. // *Environ Geochem Health.* – 2014. – №36. – P. 453-465.

228. Wang F. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications / Wang. // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2017. – №20. – P. 1901-1957.
229. White P. Calcium in Plants / P. White, M. Broadley. // *Annals of Botany*. – 2003. – №4. – V. 92. – P. 487-511.
230. Wintermans J. Spectrophotometric characteristics of chlorophyll 'a' and 'b' and their pheophytins in ethanol / J. Wintermans, A. DeMots. // *Biochimica et Biophysica Acta*. – 1965. – №109. – P. 448-453.
231. Wolf O. Modeling of sodium and potassium flows via phloem and xylem in the shoot of salt-stressed barley / O. Wolf, W. Dieter Jeschke. // *Journal of Plant Physiology*. – 1987. – №4. – V. 128. – P. 371-386.
232. Wuana R. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation / R. Wuana, F. Okieimen. // *ISRN Ecology*. – 2011. – ID. 402647. – P. 1-20.
233. Zinc accumulation, photosynthetic gas exchange, and chlorophyll *a* fluorescence in Zn-stressed *Miscanthus × giganteus* plants / [G. Andrejić, G. Gajić, M. Prica et al.]. // *Photosynthetica*. – 2018. – №4. V. 56. – P. 1249-1258.
234. Camacho R. Vegetative growth of grain sorghum in response to phosphorus nutrition / R. Camacho, E. Malavolta, J. Guerrero-Alves. // *Scientia Agricola*. – 2002. – №4. – V. 59. – P. 771-776.
235. Державні санітарні правила та норми // Державна санітарно-епідеміологічна служба України. 1999. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=4010>.
236. ДТЕК Добровірська ТЕС за 7 місяців 2018 року: більше електроенергії з українського вугілля [Електронний ресурс] // ДТЕК Енерго. 2018. Режим доступу до ресурсу: <https://energo.dtek.com/ua/media-center/press/dtek-dobrotvirska-tes-za-7-misyatsiv-2018-roku-bilshe-elektroenergii-z-ukrainskogo-vugillya>.

237. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Львівській області в 2017 році» [Електронний ресурс] // Департамент екології та природних ресурсів Львівської Обласної Державної адміністрації. 2018. Режим доступу до ресурсу: <https://drive.google.com/file/d/1svSRNTv6gauuIj6VwsWrJnFOGkYfjjip/view>.



## ДОДАТОК А

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
Львівського національного  
університету імені Івана Франка,  
член-кореспондент НАН України,  
професор

Р. С. Гладишевський \_\_\_\_\_

«   » \_\_\_\_\_ 2019 р.

### АКТ

#### впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес

**Джерело впровадження:** Наукові публікації аспіранта кафедри фізіології та екології рослин біологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка Шпака Я. В. за темою дисертаційної роботи «**Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу ТЕС і гумату Калію**», поданої на здобуття вченого ступеня кандидата біологічних наук.

**Де впроваджується:** у навчальному процесі студентів біологічного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка при викладанні спецкурсів «Екологія рослин» та «Мінеральне живлення рослин» включені нові терміни, аббревіатури, формули та модифікації методик для визначення вмісту хімічних елементів в системі субстрат-рослина.

Завідувач кафедри фізіології та екології рослин  
біологічного факультету  
Львівського національного університету ім. І. Франка,  
д.б.н., професор, академік АН ВШ України,  
заслужений працівник освіти України:

Терек О. І. \_\_\_\_\_

Декан біологічного факультету  
Львівського національного університету ім. І. Франка,  
к.б.н., доцент:

Хамар І. С. \_\_\_\_\_

## ДОДАТОК Б

№ \_\_\_\_\_ від « » \_\_\_\_\_ 2020 р.

### АКТ

#### впровадження результатів дисертаційної роботи

Підтверджуємо використання рекомендацій щодо зниження кислотності субстратів породного відвалу Центральної збагачувальної фабрики (с. Сілець Львівської області) внесенням кам'яновугільного попелу Добротвірської ТЕС і детоксикації важких металів додаванням гумату Калію та вирощування суданської трави на породних відвалах вугільних шахт ПАТ «Львівська вугільна компанія», які розроблені на підставі результатів експериментальних досліджень дисертаційної роботи аспіранта Львівського національного університету ім. І. Франка – Шпака Ярослава Васильовича під назвою «Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу ТЕС і гумату Калію».

Голова правління – генеральний директор  
ПАТ «Львівська вугільна компанія»

Яриш І. Я.

## ДОДАТОК В

### СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ В ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

#### Публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. **Shpak Y., Rudenko S.** Modeling of chromium effect on ecophysiological parameters of soil-plant system. *Studia Biologica*. 2015. Is. 2. Vol. 11. P. 115-124. **CrossRef, DOAJ, J-Gate** (*Особистий внесок: розробка схеми досліджу, експериментальна робота й обговорення результатів досліджень*).
2. **Шпак Я.,** Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Фітотоксичність субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу попелу теплоелектростанцій і гумату калію. *Traektoriâ Nauki/Path of Science*. 2017. Вип. 3. Т. 3. С. 1-17. **CrossRef, Index Copernicus, DOAJ, J-Gate** (*Особистий внесок: розробка схеми експерименту, аналіз та обговорення результатів досліджень*).
3. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Вміст макроелементів і важких металів у породних відвалах і рослинах за впливу меліорантів. *Екологічні науки*. 2018. Вип. 23. Т.4. С.117-123. **Index Copernicus** (*Особистий внесок: експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень*).

#### Публікації в наукових фахових виданнях України:

1. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Фітостресорність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу додавання кам'яновугільного попелу. *Вісник Львівського ун-ту. Серія біологічна*. 2016. Вип. 74. С. 127-135. (*Особистий внесок: експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень*).
2. **Шпак Я.,** Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Нейтралізація

фітотоксичності перегорілої породи відвалів кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом калію. Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Серія біологічна. 2017. Вип. 7. Т. 2. С. 103-108. *(Особистий внесок: розробка схеми досліджу та обговорення результатів досліджень)*.

3. **Шпак Я.**, Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт за впливу кам'яновугільного попелу та вермигумату. Біологічні системи. 2017. Вип. 1. Т. 9. С.138-143. *(Особистий внесок: розробка схеми експерименту та обговорення результатів досліджень)*.

**Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

1. **Шпак Я.**, Баранов В., Терек О. Стійкість сорго трав'янистого (*Sorghum vulgare* var. *sudanense* Hitch.) до умов породних відвалів породних відвалів кам'яновугільних шахт». Матеріали XI Наукової конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку», 10-13 вересня 2015 р. Шацьк. С. 115-116. *(Особистий внесок: експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень)*.
2. **Шпак Я. В.**, Баранов В. І., Терек О. І. Вплив біогумату на морфометричні параметри та вміст пігментів фотосинтезу в листках сорго за умов росту на субстратах породних відвалів вугільних шахт. Збірник тез 65-ї науково-технічної конференції «Наукові основи підвищення продуктивності та біологічної стійкості лісових та урбанізованих екосистем», 24 листопада 2015 р. Львів. С. 131-133. *(Особистий внесок: розробка схеми досліджу, експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень)*.
3. **Шпак Я.**, Баранов В., Терек О. Вплив вугільної золи та калій гумату на фітотоксичність породних відвалів кам'яновугільних шахт. Матеріали XII наукової конференції «Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного парку», 8-11 вересня 2016 р. Шацьк. С. 106-107.

*(Особистий внесок: розробка схеми досліджу, експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень).*

4. **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Моделювання впливу золи Добротвірської ТЕС на фітотоксичність породних відвалів вугільних шахт за допомогою сорго трав'янистого. Збірник тез XII Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології», 19-21 квітня 2016 р. Львів. С. 346-347. *(Особистий внесок: розробка схеми експерименту, експериментальна робота, аналіз та обговорення результатів досліджень).*
5. **Шпак Я.,** Запісоцька І., Баранов В., Терек О. Нейтралізація фітотоксичності субстрату породних відвалів кам'яновугільних шахт попелом ТЕС і гуматом калію. Збірник тез XIII міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології», 25-27 квітня 2017 р. Львів. С. 146-147. *(Особистий внесок: розробка схеми досліджу та обговорення результатів досліджень).*
6. Роман І., **Шпак Я.,** Баранов В., Терек О. Оптимізація хімічного складу породних відвалів вуглевидобутку попелом ТЕС і гуматом Калію. Збірник тез XV Міжнародної наукової конференції студентів та аспірантів «Молодь і поступ біології», 9-11 квітня 2019 р. Львів. С. 205-206. *(Особистий внесок: розробка схеми експерименту та обговорення результатів досліджень).*