

ДОСЛІДЖЕННЯ МІНЕРАЛЬНОГО СКЛАДУ *POPULUS ANGULATA* AIT.

Наталія Бородіна¹, Олександр Гончаров¹, Олена
Гришина²

¹Національний фармацевтичний університет;

²Державна наукова установа "Науково-
технологічний комплекс
„Інститут монокристалів” НАН України

Вступ. Згідно з останньою Глобальною оцінкою лісових ресурсів (Global Forest Resources Assessment FAO, 2020), загальна площа лісів у світі становить 4,06 мільярда гектарів [1]. Площа природних лісів продовжує зменшуватися, а лісові насадження збільшуються. Важливість лісових плантацій та відновлених лісів продовжує зростати, оскільки сировина тополь (*Populus* spp., родина *Salicaceae* Mirb.) стає все більш привабливим джерелом біоенергії та ідеальним відновлюваним ресурсом для проєктів біотехнології та біопереробки. Зокрема, вона широко використовується у целюлозно-паперовій, меблевій, будівельній, хімічній промисловості. Лікарське значення мають кора, листя та бруньки рослин роду *Populus* L., у яких є великий потенціал сировинної бази та перспективи створення багатоцільових плантацій для забезпечення лікарською рослинною сировиною. Препарати на основі сировини тополі використовуються в народній і офіційній медицині завдяки своїм протизапальним, антисептичним, сечогінним, в'язучим, знеболювальним, протипаразитарним, жарознижуючим, антимікробним і противірусним властивостям. Бруньки тополі чорної входять до складу лікарського препарату «Аденол-форте». Довгі роки кора тополі тремтячої була сировиною для одержання саліцилової кислоти. На нашу думку, одним із способів найбільш ефективного використання сировини роду *Populus* L. є застосування, на відміну від традиційної сировини цих рослин кори та бруньок – компонентів крони, пагонів, листя, гілок та іншої біомаси. Окрім того заготівля пагонів у якості лікарської рослинної сировини можлива з плантацій енергетичної тополі, площі яких постійно зростають. Великого поширення в Україні тополі набули у середині XX століття у період створення вітрозахисних лісосмуг, висаджували дерева також як «зелений фільтр» для очищення забрудненого повітря в містах. Плантації тополі досить поширені у всьому світі. Рослини культивують в Європі, на Близькому Сході, в Азії, Північній Америці та південних країнах Південної Америки. Вирощування тополі також забезпечує екологічні переваги, такі як запобігання ерозії та захист ґрунту, якості води, середовища проживання багатьох видів, а також безпосередньо використовується для фіторе mediaції та пом'якшення кліматичних змін [2, 3, 4].

Іспанські вчені з Інституту лісознавства (Мадрид) вважають плантації тополі для виробництва біомаси ключовими елементами пом'якшення глобального потепління шляхом поглинання CO₂ в деревній біомасі та в ґрунті [5].

Італійські та французькі науковці, у країнах яких культивування тополі має давні традиції, починаючи ще з початку XX століття, пропонують для ефективного моніторингу насаджень тополі метод дистанційного зондування, зокрема, за допомогою багаточасових зображень Sentinel-2. Оскільки традиційні національні інвентаризації лісів зазвичай оновлюються кожні 10 років, вони не дозволяють отримати відповідну інформацію для підтримки управління плантаціями тополі, які замість цього вирощуються з дуже короткими циклами [6, 7].

Останніми роками у наукових публікаціях висвітлюються дослідження, присвячені аналізу хімічного складу деяких видів роду *Populus* L. Основними біологічно активними компонентами сировини тополі є сполуки терпеноїдного походження, ефірна олія та речовини фенольної природи: фенольні глікозиди, похідні саліцилової кислоти, гідроксикоричні кислоти та флавоноїди [8 - 22]. Група авторів із Сербії, Угорщини та Великобританії виявили, що надмірне засолення ґрунту підвищує рівень фенолів у рослинах. У всіх клонах тополі відбулося збільшення загального вмісту фенольних сполук і накопичення флавоноїдів під впливом солявого стресу. Ці спостереження можна пояснити важливою роллю флавоноїдів серед інших фенольних речовин у фізіологічній регуляції та відповіді на стрес у рослин [23]. Вчені Близькосхідного технічного університету (Анкара, Туреччина) дослідили властивості деревини клонів європейської чорної тополі, визначивши вміст целюлози, лігніну та цукрів. Завдяки швидкому зростанню, клональному розмноженню та наявності геномних ресурсів їм вдалося детальніше вивчити генетичний контроль властивостей деревини цього виду тополі [24].

Дослідники в Іспанії вивчали можливості перетворення відходів тополі на енергетичні та хімічні ресурси. Лігнін - біополімер, що міститься в тополі, привертає особливу увагу науковців як найбільше відновлюване джерело ароматичних сполук. Ці речовини необхідні для виробництва пластмас, розчинників та інших продуктів, зокрема медичного застосування. Дослідження, яке очолює Майтене Майстерра Уді з Державного університету Наварри (UPNA) зосереджене на використанні відходів тополі, таких як кора та тирса, для отримання цих високоцінних хімічних речовин. *Populus deltoides* Marsh. має важливе екологічне та економічне значення та є ключовим донором генів для основних сортів тополі у світі. Щоб відібрати та вивести *Populus deltoides* Marsh. з покращеними агрономічними ознаками Китайські вчені з Хебейського сільськогосподарського університету та Китайської

академії лісового господарства досліджували дев'ять ознак росту та листя у 375 різних генотипів тополі, оцінюючи їхнє генетичне різноманіття. Це прискорить прогрес молекулярної селекції, збільшить кількість покращених сортів *Populus deltoides* Marsh. [25]. Вчені Хебейського фундаментального наукового центру біотичної взаємодії ідентифікували ген пов'язаний з біосинтезом лігніну, що закладає основу для розуміння захисту тополь від зараження шкідниками. [26]. Індійські вчені дали оцінку фенотипічної мінливості та складу хімічних речовин клонів *Populus deltoides* Bartt [27].

У звіті 27-ої сесії Міжнародної тополевої комісії ФАО (IPC27) (Palais des Congrès, м. Бордо, Франція, 21–25 жовтня 2024 р.) підкреслюють ключову роль швидкозростаючих видів *Populus* L., зважаючи на їхній значний потенціал у лісовому господарстві, біоенергетиці, фітомеліорації, фіторе mediaції та джерела отримання цінної рослинної сировини [28].

На сході та півдні України види й гібриди *Populus* L. є особливо перспективними для створення насаджень різного цільового призначення, зокрема на деградованих внаслідок військових дій землях [29].

Вчені з Пакистану проаналізували публікації щодо наукового використання терміну «важкі метали». Вони дійшли висновку, що зазвичай термін «важкі метали» використовується як загальний в екологічній літературі для позначення металів і металоїдів, пов'язаних із забрудненням навколишнього середовища, токсичністю та негативним впливом на біоту [30].

Італійські вчені досліджували накопичення, транслокацію та толерантність автотрофного клону *Populus alba* “Villafranca” у відповідь на надлишкові концентрації кадмію Cd і купруму Cu. Результати показали, що кадмій Cd і купрум Cu збільшувалися в пагонах і коренях при збільшенні концентрації металу в середовищі. Найбільший вміст кадмію виявлено в листках, а найвищий вміст купруму Cu – в коренях тополі [31].

У 2024 році вивченню мінерального складу рослин роду *Populus* L. (а саме *Populus trichocarpa* Torr. & A.Gray ex Hook, *Populus alba* L., *Populus alba* L. “Villafranca”, *Populus nigra* L. *Populus* × *Euramericana* ‘Neva’, *Populus euphratica* Olivier та інші) присвятили свої роботи вчені різних країн [32–42]. Отже аналіз сучасних джерел інформації свідчить про активізацію різнопланових наукових досліджень видів роду *Populus* L. Значна увага приділяється тополям секції *Aigeiros* Duby, види, клони та сорти яких найчастіше використовують для плантаційного вирощування, що створює перспективи для раціонального та сталого використання лікарської рослинної сировини тополі. Тому на часі фармакогностичні дослідження «чорних тополь», зокрема вивчення мінерального складу сировини *Populus angulata* Ait., адже це відіграє важливу роль у стандартизації та впливає на загальний фармакологічний ефект сировини й фітопрепаратів на

її основі.

Метою нашої роботи було дослідження мінерального складу пагонів, листя та бруньок *Populus angulata* Ait. та визначення вмісту загальної золи у цій сировині.

Матеріали та методи. Об'єктами дослідження були пагони, листя, бруньки *Populus angulata* Ait. (*Populus deltoides* var. *angulata* (Ait.) Sarg.; *Populus angulata* Ait. var. *missouriensis* A. Henry; *Populus deltoides* subsp. *deltoides* W.Bartram ex Marshall; *Populus deltoides* W.Bartram ex Marshall; *Populus angulata* f. *cordata* (Simon-Louis ex A.Henry) Rehder.; Carolina poplar) секції чорні тополі *Aigeiros* Duby, родини Вербові *Salicaceae* Mirb. Сировину для досліджень заготовляли з дерев, що ростуть у ботанічному саду Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Бруньки збирали з молодих і багаторічних пагонів у квітні (у період набухання, не розподіляючи їх на вегетативні і генеративні). Пагони зрізали в червні (стебла з розвиненим листям, завдовжки до 50 см). Зразки сировини розкладали тонким шаром та сушили повітряно-тіньовим способом (періодично перевертаючи в процесі сушіння, протягом 14 днів). Висушені зразки сировини тополі зберігали у мішечках (паперових або тканинних) за кімнатної температури.

Дослідження мінерального складу проводили на базі ДНУ НТК «Інститут монокристалів» НАН України (м. Харків) у відділі аналітичної хімії ім. А. Б. Бланка. Макро - та мікроелементний склад сировини визначали методом атомно-емісійної спектроскопії з фотографічною реєстрацією. Проби сировини випаровували з кратерів графітових електродів у розряді дуги змінного струму силою 16 А за експозиції 60 с. Як джерело збудження спектрів використовували ІВС-28. Спектри реєстрували на фотоплівці за допомогою спектрографа ДФС-8 з дифракційною решіткою 600 штр/мм та трилінзовою системою освітлення щілини.

Калібрувальні графіки в інтервалі вимірюваних концентрацій елементів будували за допомогою стандартних розчинів солей металів (ICORM-23-27). Для розчинення купруму Cu та ванадію використовували азотну кислоту, а для аналізу інших елементів – реактиви кваліфікації х.ч. та двічі очищену воду. Фотометрування ліній спектрів у діапазоні довжин хвиль від 240 нм до 347 нм у пробах у порівняно з державними зразками мінеральних елементів, що відповідають складу сировини, за допомогою мікрофотометра МФ-4. Відносне стандартне відхилення (для п'яти паралельних вимірювань) не перевищувало 3% при визначенні числових значень концентрацій елементів. Фотометрували такі смуги у спектрах проб і градуированих зразків (нм): Al- 308,2; Hg- 253,6; Ag - 328,0; Mn- 280,1; As-286,0; Mo- 317,0; B- 249,6; Ni- 305,0; Bi- 306,7; Pb- 283,3; Cd- 326,1; Sb- 259,8; Co-

345,3; Sn- 303,4; Cr- 302,1; Sr- 346,4; Cu- 324,7; Ti- 307,8; Ga 294,3; Zn-328,2; Ge- 303,9. Основою для приготування градувальних зразків (які далі називаються «основа») слугувала суміш оксидів і солей металів, що відповідає складу рослинної сировини. Для приготування 200г основи брали маси наважок таких речовин: SiO₂ – 36г; K₂SO₄ – 40г; CaCO₃ – 40г; KH₂PO₄ – 50г; KCl – 14г; MgO – 10г; Na₂SO₄ – 50г.

Відібрані наважки і фторопластові масові кулі поміщали у фторопластову склянку з кришкою. Змішування компонентів основи здійснюють на кульовому млині зі швидкістю обертання барабана 80 об/хв протягом 6 годин. Отриману суміш прожарювали у кварцових тиглях у муфельній печі при 500°C протягом 5 годин.

Градуйовані зразки готували послідовним розведенням основою вихідного градуйованого зразку №9, у якому масова частка Cu складає 0,5%; Mn, Ag, Ga, Ge, Ti, Pb, Ni, V, Mo, Co, Sn, Sr, Cr становить - 1%; Cd і Zn - 2% (у перерахунку на метал). Градуйований зразок №9 отримують шляхом ретельного перемішування основи й оксидів визначених металів у ступці з фторопласта протягом 4 годин у присутності етанолу (50 мл) і ще 2 години після його

випаровування. Оксиди металів попередньо доводять до постійної маси в сушильній шафі при 120°C, а для TiO₂ і V₂O₅ – у муфельній печі при 1000°C. Для приготування 10г градуйованого зразку № 9 беруть такі маси наважок (похибка зважування не перевищує 0,0002г):основи 7, 6311 г; ZnO – 0,2488 г; MoO₃ – 0,1500 г; MnO₂ – 0, 1582 г; TiO₂ – 0,1668 г; CoO₃ – 0,1407 г; AgCl – 0,066 г; PbO – 0,1077 г; SnO₂ – 0,1269 г; Ga₂O₃ – 0,1344 г; CuO – 0,0682 г; SrCO₃ – 0,1685 г; GeO₂ – 0,1441 г; Ni₂O₃ – 0,1409 г; Cr₂O₃ – 0,1461 г; CdO – 0,2284 г; V₂O₅ – 0,1784 г.

Комплект градуйованих зразків із доданими елементами у діапазоні концентрацій від 1,10⁻¹ до 2,5·10⁻⁴ (градуйовані зразки від № 8 до № 1) готують послідовним розведенням градуйованого зразка №9 основою, як зазначено в табл. 1. Кожен градуйований зразок розтирають з етанолом (50 мл) протягом двох годин. Після висушування порошок додатково розтирають ще одну годину. Градуйований зразок № 1 (без доданих елементів) обробляють так само, як і всі інші зразки: розтирають з етанолом і висушують. Кожен градуйований зразок (від № 1 до № 9) розтирають із вугільним порошком у співвідношенні 1:1 за масою протягом однієї години.

Таблиця 1. Градуйовані зразки від №8 до №1

№ ГЗ	Cu	Введено в % до основи Mn, Ag, Ga, Ge, Cd, Ti, Pb, Ni, V, Mo, Co, Cr, Sr	Zn, Cd	№ що додається ГЗ	Маса що додається ГЗ, г	Маса основи, г
1.	-	-	-	-	-	10,0
2.	1,2·10 ⁻⁴	2,5·10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻⁴	5	1,0	9,0
3.	2,5·10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻³	6	1,0	9,0
4.	5,0·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻³	2,0·10 ⁻³	7	1,0	9,0
5.	1,2·10 ⁻⁴	2,5·10 ⁻³	5,0·10 ⁻³	7	2,5	7,5
6.	2,5·10 ⁻³	5,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	8	0,5	9,5
7.	5,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	2,0·10 ⁻²	8	1,0	9,0
8.	5,0·10 ⁻²	1,0·10 ⁻¹	2,0·10 ⁻¹	9	1,0	9,0

Примітка: ГЗ- градуйований зразок

У кварцовий тигель вносили наважку сухої сировини (похибка 0,0002г). Змочують 10 мл 5 % розчину H₂SO₄, висушують у сушильній шафі, а потім на плитці до повного видалення парів H₂SO₄. Тигель перемішують у муфельну піч, доводять її температуру до 500° С та прожарюють протягом 1 години. Охолоджують і зважують. До отриманої золи додають таку саму кількість графітового порошку та ретельно перемішують у ступці. Отриману пробу і робочі градуйовані зразки № 1-9 набивають у кратери верхніх і нижніх електродів. Для кожної проби та градуйованого зразка готують не менше трьох електронних пар. При виконанні вимірювань дотримуються таких умов фотографування спектрів: сила струму дуги змінного струму – 16А, фаза підпалу - 60°C, частота імпульсів, що підпалюють - 100 розрядів у секунду; аналітичний проміжок - 2мм; ширина щілини спектрографа - 0,015мм; експозиція

60с. Спектри фотографують в області спектра від 230 нм до 330 нм. Фотопластинки проявляють, сушать, потім фотометрують такі лінії в (нм) у спектрах проб і градуйованих зразків, а також фон біля них. Для кожного елемента за результатами фотометрування розраховують різницю почорніння лінії і фону ($S = S_{л+ф} - S_{ф}$) для спектрів проб ($S_{пр}$) і градуйованих зразків ($S_{гз}$). Потім будують градувальний графік у координатах: середнє значення різниці почорніння лінії і фону ($S_{гз}$) - логарифм вмісту елемента в градуйованому зразку ($lg C$), де C виражено у відсотках до основи. За цим графіком знаходять вміст елемента в золі (а), виражений у процентах. Вміст елемента в рослинному матеріалі обчислюють за формулою:

$$X = \frac{a \cdot m}{M},$$

m - маса золи, г; M - маса сировини, в г, взята для аналізу; а – вміст елемента в золі, в %.

Використана методика призначена для визначення мікродомішок. Інтервал обумовленого вмісту (мас. % до золи) складає: Mn від $2 \cdot 10^{-4}$ до 1, Cu - від 110^{-4} до $5 \cdot 10^{-2}$, Ni, Ge, Pb, Ga, Ag, Sn від $5 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$, Cd - від $5 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$, V, Mo, Co, Cr від $2 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-2}$, Ti - $5 \cdot 10^{-4}$ до 1, Sr - від $1 \cdot 10^{-2}$ до 1, Zn - від $1 \cdot 10^{-2}$ до 2.

Вміст загальної золи (ДФУ 2.0, 2.4.16) у сировині *Populus angulata* Ait. визначали гравіметричним методом, згідно з ДФУ 2.0 [44]. Статистичну обробку результатів проводили методом дисперсійного аналізу згідно з вимогами ДФУ 2.0 (загальні статті 5.3 «Статистичний аналіз результатів біологічних випробувань та кількісних визначень» та

5.3.N.1 «Статистичний аналіз результатів хімічного експерименту^N») за допомогою програми Microsoft Excel 8,0 з використанням пакета прикладних програм «Statistica». Вірогідність відмінностей величин оцінювали за t – критерієм Стюдента ($p > 95 \%$) [44].

Результати та обговорення. Використаний метод дозволив визначити вміст в досліджуваних зразках сировини *Populus angulata* Ait. наявність 19 елементів, із яких 5 віднесені до макро- (K, Na, Ca, P, Mg) та 14 до мікроелементів (Fe, Mn, Al, Si, Zn, Mo, Cu, Pb, Sr, Co, Ni, As, Cr, Hg). Отримані дані елементного складу сировини наведені в таблиці 2.

Таблиця 2. Вміст мінеральних елементів у сировині *Populus angulata* Ait.

№	Елемент	Вміст елементів у сировині <i>Populus angulata</i> Ait. Середнє значення $\pm$ SD (n = 10)		
		пагони	листя	бруньки
Макроелементи (мг/100г)				
1	Калій K	1750,00 $\pm$ 88,10	2350,00 $\pm$ 84,00	1860,20 $\pm$ 68,30
2	Натрій Na	250,10 $\pm$ 12,30	270,00 $\pm$ 11,70	210,00 $\pm$ 14,10
3	Кальцій Ca	1180,00 $\pm$ 71,40	1050,00 $\pm$ 69,45	520,00 $\pm$ 57,90
4	Фосфор P	190,00 $\pm$ 32,10	200,30 $\pm$ 37,45	140,00 $\pm$ 34,20
5	Магній Mg	290,00 $\pm$ 47,50	310,00 $\pm$ 49,10	190,00 $\pm$ 52,70
Мікроелементи (мг/100г)				
6	Ферум Fe	22,00 $\pm$ 4,36	25,00 $\pm$ 6,28	20,00 $\pm$ 5,80
7	Манган Mn	15,10 $\pm$ 5,27	18,50 $\pm$ 3,76	11,20 $\pm$ 3,94
8	Алюміній Al	19,60 $\pm$ 1,04	9,00 $\pm$ 0,18	7,40 $\pm$ 0,22
9	Силіцій Si	530,00 $\pm$ 18,20	570,00 $\pm$ 16,40	350,00 $\pm$ 16,75
10	Цинк Zn	17,20 $\pm$ 0,45	20,00 $\pm$ 0,56	13,00 $\pm$ 0,42
11	Молібден Mo	0,20 $\pm$ 0,01	0,07 $\pm$ 0,01	< 0,03
12	Купрум Cu	0,60 $\pm$ 0,01	0,50 $\pm$ 0,01	0,80 $\pm$ 0,01
13	Стронцій Sr	12,40 $\pm$ 0,32	7,40 $\pm$ 0,28	< 0,03
14	Нікол Ni	0,30 $\pm$ 0,10	0,45 $\pm$ 0,01	0,20 $\pm$ 0,01

Примітка. У всіх зразках кобальт Co <0,03 мг/100 г, кадмій Cd <0,01 мг/100 г, арсен As <0,01 мг/100 г, ртуть Hg <0,01 мг/100 г, свинець Pb <0,03 мг/100 г.

Для всіх проаналізованих елементів була визначена кількість, але 5 з них (Co, Pb, Cd, As, Hg) не були знайдені в межах чутливості методу (виявлені у дуже малих кількостях). Цілком закономірно, що *Populus angulata* Ait. зазнає впливу численних несприятливих факторів довкілля, зокрема біотичного та абіотичного стресу. Саме тому визначення вмісту важких металів у її сировині є надзвичайно важливим. Доведено, що деякі види тополь, зокрема *Populus nigra*

L. та *Populus deltoides* W. Bartram, проявляють високу здатність до гіперакумуляції кадмію, свинцю та цинку, що робить їх перспективними для застосування у фіторе mediaції забруднених територій. Водночас, це підкреслює необхідність ретельного контролю за вмістом цих елементів у лікарської рослинної сировині тополь. В усіх зразках сировини *Populus angulata* Ait. вміст важких металів знаходився в межах вимог гранично допустимих концентрацій (Co і Pb < 0,03

мг/100г, Cd, As і Hg < 0,001 мг/100г), які висуває ДФУ 2.0 до лікарської рослинної сировини [43].

Проаналізувавши отримані дані, можна відмітити досить високий вміст імуноесенціальних елементів мангану Mn, феруму Fe та цинку Zn, які беруть участь в окисно-відновних процесах і позитивно впливають на імуногенез людини.

Молибден Мо міститься у кількостях від 0,03 мг/100г у бруньках до 0,2 мг/100г у пагонах, належить до есенціальних мікроелементів, які відіграють важливу роль у різних біохімічних процесах. Він є незамінним кофактором ферментів, таких як сульфітооксидаза, ксантинооксидаза, альдегідоксидаза та нітратредуктаза, які беруть участь у метаболізмі нітрогену, сульфору та пуринів.

Аналіз даних показав, що у пагонах і у листі тополі у достатньо високій кількості містяться такі

Таблиця 3. Показники вмісту загальної золи у зразках сировини *Populus angulata* Ait.

Сировина <i>Populus angulata</i> Ait.	Вміст загальної золи, %
Пагони	6,27 ± 0,42
Листя	5,23 ± 0,38
Бруньки	3,98 ± 0,34

Вміст загальної золи у сировині *Populus angulata* Ait. знаходився у межах від 3,98 % у бруньках до 6,27 % у пагонах.

Висновки. Вперше методом атомно-абсорбційної спектроскопії в сировині *Populus angulata* Ait., які культивують в Україні, визначено вміст 19 мінеральних елементів, із них 10 є есенціальними. Встановлено, що сировина *Populus angulata* Ait. за вмістом важких металів та загальної золи відповідає вимогам ДФУ. Отримані дані будуть використані в подальших дослідженнях та при розробці методів контролю якості на сировину тополі.

Перспективи подальших досліджень. Отримані експериментальні дані дозволять оцінити потенціал культивованих сортів тополі для розширення сировинної бази рослин родини *Salicaceae* Mirb., що відкриває можливості для їхнього подальшого використання у фармації.

Фінансування проведених досліджень за рахунок фізичних осіб.

Конфлікт інтересів: відсутній

Research of mineral composition of *Populus angulata* ait.

Nataliia Borodina, Oleksandr Goncharov, Olena Grishina

Introduction. In recent years, the significance of forest plantations and restored forests has been steadily increasing, as poplar raw materials (*Populus* spp., family *Salicaceae* Mirb.) have become an increasingly attractive source of bioenergy and a promising renewable resource for biotechnology and bioprocessing projects. Particular attention is given to poplars of the Aigeiros Duby section, as species, clones, and varieties from this group are most commonly used in plantation cultivation. This creates

макроелементи як калій K та кальцій Ca. Слід відмітити, що кальцій є незамінним елементом рослин. Рослини з дефіцитом кальцію більш сприйнятливі до патогенів, а екзогенне надходження кальцію, у свою чергу, покращує опірність рослини [45].

При порівнянні з іншими мікроелементами у сировині тополі найбільше накопичується силіцій. Високий вміст силіцію в рослинах може підвищувати їхню стійкість до абіотичних та біотичних стресів, а також впливати на їхню здатність до фітореMediaції забруднених територій. Багато кремнію у старій деревині.

В мінімальних концентраціях більшість елементів знаходиться у бруньках *Populus angulata* Ait. Результати визначення вмісту загальної золи у сировині *Populus angulata* Ait. наведені у таблиці 3

Таблиця 3. Показники вмісту загальної золи у зразках сировини *Populus angulata* Ait.

promising opportunities for the rational and sustainable use of poplar-derived medicinal plant raw materials. Consequently, pharmacognostic studies of "black poplars," including research on the mineral composition of *Populus angulata* Ait. raw materials, are highly relevant. Such studies play a crucial role in standardization the raw materials. **Aim.** Study of the mineral composition of shoots, leaves and buds of *Populus angulata* Ait, and to determine total ash content in this raw material. **Materials and methods.** The objects of the study were shoots, leaves, buds of *Populus angulata* Ait. section black poplar *Aigeiros* Duby, family *Salicaceae* Mirb. The mineral composition analysis was carried out on the basis of the State Scientific Institution "Institute for Single Crystals" of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv). Macro- and microelement composition of the raw material was determined by atomic emission spectrometry with photographic registration. The total ash content in the raw material *Populus angulata* Ait. by the gravimetric method according to the State Pharmacopoeia of Ukraine 2.0. **Results.** For the first time, the content of 19 mineral elements was determined by atomic absorption spectrometry in the raw material of *Populus angulata* Ait., cultivated in Ukraine, 5 of which are classified as macro- (K, Na, Ca, P, Mg) and 14 as microelements (Fe, Mn, Al, Si, Zn, Mo, Cu, Pb, Sr, Co, Ni, As, Cr, Hg), 10 of which are essential. It was established that the raw material of *Populus angulata* Ait. in terms of the content of heavy metals and total ash meets the requirements of the State Pharmacopoeia of Ukraine 2.0. The obtained data will contribute to further research and the development of quality control methods for poplar raw materials.

Keywords: *Populus angulata* Ait., atomic emission spectrometry, mineral elements.

References

1. FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment Key findings. Rome 2020; 165.
<https://doi.org/10.4060/ca8753en>
2. Ronald S., Zalesny, Jr., Pilipovic A. Growth and Development of Short-Rotation Woody Crops for Rural and Urban Applications *Forests* 2022; 13(6), 867;
<https://doi.org/10.3390/f13060867>
3. Fuchylo, Y. D., Lys, N. M., Tkachuk, N. L., & Solovka, V. I. Ріст і Продуктивність Енергетичних Платанцій Тополі В Умовах Прикарпаття. Новітні агротехнології. 2019. (7), 11–11.
<https://doi.org/10.47414/na.7.2019.204825>
4. Solomon B., Ghezehei, A., Dennis W., Ronald S. Zalesny, Jr., Nichols. E. Productivity and Profitability of Poplars on Fertile and Marginal Sandy Soils under Different Density and Fertilization Treatments *Forests* 2021; 12(7), 869; <https://doi.org/10.3390/f12070869>
5. Fuertes A., Oliveira N., Canellas I., Sixto H., Rodríguez-Soalleiro R., Hanewinkel M., Sperlich D., Assessing the Potential Of Poplar Short Rotation Plantations To Contribute To A Low-Carbon Bioeconomy Under Water-Limited Conditions, *Journal of Environmental Management*. 2023; Vol. 347: 119062.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119062>
6. D'Amico G., Francini S., Giannetti F., Vangi E., Travaglini D., Chianucci F., Chirici G. A Deep Learning Approach for Automatic Mapping of Poplar Plantations Using Sentinel-2 Imagery. *GI Science & Remote Sensing*, 2021; 58(8); 1352–1368.
<https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1988427>
7. Hamrouni, Y., Paillassa, E., Cheret, V., Monteil, C., & Sheeren, D. Sentinel-2 Poplar Index for Operational Mapping of Poplar Plantations over Large Areas. *Remote Sensing*. 2022; 14(16), 3975.
<https://doi.org/10.3390/rs14163975>
8. Zaidi, S., Benaida-Debbache, N., Tebbi, S.O. et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Populus nigra* as potential myeloperoxidase inhibitors. *Chem. Pap.* 2024; 78, 2841–2854. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-03275-4>
9. Pastierovic F, Kalyniukova A, Hradecky J, Dvorak O, Vitfmvfs J, Mogilicherla K, Tomaskova I. Biochemical Responses in *Populus tremula*: Defending against Sucking and Leaf-Chewing Insect Herbivores. *Plants*. 2024; 13(9):1243.
<https://doi.org/10.3390/plants13091243>
10. Laffon, M., Bruat, M., Chedfor, F. et al. Hairy root induction in hybrid poplar (*Populus tremula* × *Populus alba*) for sustainable growth and specialized metabolites production with antioxidant activities. *Plant Cell Tiss Organ Cult*. 2024; 156, 2. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02634-z>
11. Ullah C, Unsicker SB, Reichelt M et al. Accumulation of catechin and proanthocyanidins in Black Poplar stems after infection by *Plectosphaerella populi*: hormonal regulation, biosynthesis and antifungal activity. *Front Plant Sci*. 2019; 15(10):1441.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01441>
12. Gąsecka M, Drzewiecka K, Magdziak Z, Krzesiński W, Proch J, Niedzielski P. Early Response of the *Populus nigra* L. × *Populus maximowiczii* Hybrid to Soil Enrichment with Metals. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(23):12520.
<https://doi.org/10.3390/ijms252312520>
13. Atia A., Atmani-Kilani D., Atmani D., Ayouni K., Belkhir S. et al. Wound Healing Potential of a Formula Based on *Populus nigra* L. Flower Buds Extract With Anti-inflammatory Activity. *Journal of Ethnopharmacology*, 2024; Vol. 331, 118319,
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2024.118319>.
14. Wang, S.; Yang, C.; Luo, Y.; Chen, Q.; Xu, M.; Ji, Y.; Jiang, X.; Qu, C. Poplar Bud (*Populus*) Extraction and Chinese Propolis Counteract Oxidative Stress in *Caenorhabditis elegans* via Insulin/IGF-1 Signaling Pathway. *Antioxidants* 2024, 13, 860.
<https://doi.org/10.3390/antiox13070860>
15. Półlocka-Olech L, Isidorov VA, Krauze-Baranowska M. Characterization of Secondary Metabolites of Leaf Buds from Some Species and Hybrids of *Populus* by Gas Chromatography Coupled with Mass Detection and Two-Dimensional High-Performance Thin-Layer Chromatography Methods with Assessment of Their Antioxidant Activity. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024; 25(7):3971.
<https://doi.org/10.3390/ijms25073971>
16. Pannucci E., D'Eliseo D., Ieri F., Romani A., Santi L., Bernini R., ... Velotti F. Perspectives on *Populus* spp. (*Salicaceae*) bud extracts as antioxidant and anti-inflammatory agents. *Natural Product Research*, 2021; 36(6), 1648–1652.
<https://doi.org/10.1080/14786419.2021.1896512>
17. Półlocka-Olech L, Inkielewicz-Stepniak I, Krauze-Baranowska M. Anti-inflammatory and antioxidative effects of the buds from different species of *Populus* in human gingival fibroblast cells: Role of bioflavonones. *Phytomedicine*. 2019 Mar 15;56: 1-9. doi: 10.1016/j.phymed.2018.08.015. Epub 2018 Aug 10. PMID: 30668329.
18. Stanciauskaite M, Marksa M, Babickaite L et al. Comparison of Ethanolic and Aqueous *Populus balsamifera* L. Bud Extracts by Different Extraction Methods: Chemical Composition, Antioxidant and Antibacterial Activities. *Pharmaceuticals* 2021; 14(10):1018. <https://doi.org/10.3390/ph14101018>
19. Vaysi, R. Identification and Comparison of the Phenolic Chemical Components in *Populus nigra* and *Populus deltoides* wood by GC-MS Methods. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 2024; 39(2), 121-132. doi: 10.22092/ijwpr.2024.364731.1767
20. Galaşanu M., Panţuroiu M., Cima L., Neculai A., Panuş E., Bleotu C., Enescu C., Mircioiu I., Gavriloiu R., Aurica S., Rimbu M. Colette Sandulovici, R. 2025; Polyphenolic Composition, Antioxidant Activity, and Cytotoxic Effect of Male Floral Buds from Three *Populus*

- Species Growing in the South of Romania. *Molecules*, 30(4), 913. <https://doi.org/10.3390/molecules30040913>
21. Borodina N., Raal A., Kovalyov V., Koshovyi O., Ilina T. Macro- and Microelements in the Branches of some *Salix* Genus Species in the Flora of Ukraine. *International Journal of Pharmaceutical Research & Allied Sciences*. 2020; Vol. 9, № 3: 71–80. ISSN: 2277-3657 CODEN(USA): IJPRPM
 22. Borodina N.V. Pharmacognostic study of willow plants and creation of medicines based on them. Abstract of the dissertation of the Doctor of Pharmaceutical Sciences: 15.00.02. Pharmaceutical Chemistry and Pharmacognosy. Kharkiv. 2021; 42
<https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/27573/1/avtoreferat-borodina-n.v..pdf>.
 23. Galovic V, Kebert M, Popovic BM, Kovacevic B, Vasic V, Joseph MP, Orlovic S, Szabados L. Biochemical and Gene Expression Analyses in Different Poplar Clones: The Selection Tools For Afforestation Of Halomorphic Environments. *Forests*. 2021; 12(5):636.
<https://doi.org/10.3390/f12050636>
 24. Kaya, Z., Taşkıran, B., Uluğ, A. et al. Association Genetics of Wood Traits in European Black Poplar (*Populus nigra* L.). *Tree Genetics & Genomes* 2023; 19, 38. <https://doi.org/10.1007/s11295-023-01612-y>
 25. Liu C, Yan J, Zhang Z, Pei L, Li C, Zhang X, Shi S. Genetic Variation Analysis and Development of Kasp Marker For Leaf Area And Hight In Southern-Type *Populus deltoides*. *Plants*. 2025; 14(3):330.
<https://doi.org/10.3390/plants14030330>
 26. Luo J, Shao P, Sun Z, Li S, Cao D, Dong L, Wei J, Liu J. PdPLR1 Effectively Enhances Resistance of *Populus Deltoides* 'Shalinyang' To Anoplophora Glabripennis By Positive Regulation Of Lignan Synthesis. *Plant Physiol Biochem*. 2024 Sep; 214:108944. doi: 10.1016/j.plaphy.2024.108944. Epub 2024 Jul 17. PMID: 39033651
 27. Dhillon GPS, Sandhu J. S, Singh P. Variation among Poplar (*Populus deltoides* Bartr.) Clones for Growth, Wood Traits and Tolerance to Leaf Spot Diseases. *Curr Agri Res* 2020; 8(2). doi:
<http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.8.2.08>
 28. Poplars And Other Fast-Growing Trees for Climate Change Mitigation And Adaptation – Pathways To Climate Resilience And Carbon. In 27th Session of the International Poplar Commission: Book of Abstracts: IPC27, October 22-25 2024, Bordeaux, France 220.
https://www.plantedforests.org/wp-content/uploads/2024/11/IPC-27th-Session_Book-of-Abstract_version-5_V2.pdf
 29. Vysotska N. Drought resistance of ten poplar clones in eastern Ukraine. *Forestry and Forest Melioration*, 2023; 142, 47–58. <https://doi.org/10.33220/1026-3365.142.2023.47>
 30. Ali H, Khan E. What are heavy metals? Long-Standing Controversy Over the Scientific Use Of The Term 'Heavy Metals' – Proposal of a Comprehensive Definition. *Toxicol Environ Chem*. 2018; 100:6–19. doi: 10.1080/02772248.2017.1413652
 31. Marzilli, M., Di Santo, P., Palumbo, G. et al. Cd And Cu Accumulation, Translocation And Tolerance In *Populus Alba* Clone (Villafranca) In Autotrophic In Vitro Screening. *Environ Sci Pollut Res* 2018; 25, 10058–10068. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1299-5>.
 32. Ployet R., Feng K., Zhang J., Baxter I., Glasgow D., Andrews H., Rodriguez M., Chen Jin-Gui, Tuskan G., Tschaplinski T., Weston D., Martin M., Muchero W. Elemental Profiling and Genome-Wide Association Studies Reveal Genomic Variants Modulating Ionomics Composition in *Populus trichocarpa* Leaves. *Frontiers in Plant Science*. 2024; vol.15. doi:10.3389/fpls.2024.1450646
 33. Kostic O., Jaric S., Pavlovic D., Matic M., Radulovic N., Mitrovic M., Pavlovic P. Ecophysiological Response of *Populus alba* L. to Multiple Stress Factors During the Revitalisation of Coal Fly Ash Lagoons at Different Stages of Weathering. *Frontiers in Plant Science*. 2024; Vol. 14. doi:10.3389/fpls.2023.1337700
 34. Neri A., Francini A., Giovannelli A., Traversari S., Sebastiani L. Differences in Mineral and Osmotic Balances Enhance Zinc Translocation in an Aquaporin Overexpressing Poplar. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024; Vol. 208. 108528, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108528>
 35. Meng-Xue Niu, Cong-Hua Feng, Meiying Liu, Xiao Liu, Shujing Liu, Chao Liu, Weilun Yin, Xinli Xia Genome-Wide Identification of Poplar GSTU Gene Family and its PtrGSTU23 and PtrGSTU40 to Improve Salt Tolerance in Poplar. *Industrial Crops and Products*. 2024; Vol. 209, 117945. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117945>
 36. Salehi A., Shariat A. Comparative Performance of *Populus* spp. and *Salix* spp. for Growth, Nutrition, and Heavy Metal Uptake in a Wastewater Hydroponic System. *International Journal of Phytoremediation*. 2024; 26(9), 1369-1378
<https://doi.org/10.1080/15226514.2024.2321597>
 37. Wang, S., Lv, C., Tang, B., Wang, M., Cao, B., & Wu, K. Dynamics of Soil N and P Nutrient Heterogeneity in Mixed Forest of *Populus* × *Euramerica* 'Neva' and *Robinia pseudoacacia* in Coastal Saline-Alkali Land. *Forests*, 2024; 15(12), 2226. <https://doi.org/10.3390/f15122226>
 38. Kulac, S., Cikili, Y., Samet, H., & Filiz, E. Alleviating Effects of Nitric Oxide on Cadmium Toxicity in White Poplar (*Populus alba*). *Journal of Forest and Environmental Science*, 2024; 40(1), 43–52. <https://doi.org/10.7747/JFES.2024.40.1.43>
 39. Miletic Z. Jonjev M., Jaric S., Kostic O., Sekulic D., Mitrovic M., Pavlovic P. Green solution to riparian pollution: *Populus alba* L. potential for phytoremediation and bioindication of PTEs along the Sava river. *Heliyon*, Volume 10, Issue 7, e28183. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28183>

40. Lan, K., Li, Y., Shuai, Y. et al. Phosphorus (P) Mobilisation From Inorganic and Organic P Sources Depends on P-Acquisition Strategies in Dioecious *Populus euphratica*. *Biol Fertil Soils* 60, 393–406 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01799-9>
41. Prouzova, N., Kubátova, P., Mercl, F. et al. Biomass Yield and Metal Phytoextraction Efficiency of *Salix* and *Populus* Clones Harvested at Different Rotation Lengths in the Field Experiment. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 2024; 11, 78. <https://doi.org/10.1186/s40538-024-00600-1>
42. Lovynska, V., Sytnyk, S., Montzka, C., Samarska, A., Heilmeyer, H., Belleflamme, A., ... Wiche, O. Interaction Between Soil Water Saturation and Toxic Element Accumulation in Woody Plants (Freiberg region, Germany). *International Journal of Environmental Studies*, 2024; 81(2), 570–586. <https://doi.org/10.1080/00207233.2024.2322891>.
43. State Pharmacopoeia of Ukraine: in 3 volumes / SE "Ukrainian Scientific Pharmacopoeia Center for Quality of Medicinal Products". 2nd ed. Kharkiv: SE "Ukrainian Scientific Pharmacopoeia Center for Quality of Medicines". 2015. 1. 1130 p.
44. Thor K. Calcium- Nutrient and Messenger. *Frontiers in Plant Science*. 2019; vol.10. 440. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440>