



УДК 577.3+902+543.4+902/904
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.6>

БІОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ АРХЕОЛОГІЧНИХ АРТЕФАКТІВ ІЗ МІСЦЬ АРХЕОЛОГІЧНИХ РОЗКОПОК НА ПРИКЛАДІ СПЕКТРОСКОПІЧНОГО АНАЛІЗУ БУРИШТИНУ

О. В. Пихова¹, О. Б. Кучменко²

Біофізичні, зокрема спектроскопічні, методи дослідження є інструментами для встановлення складу, вивчення структури та механізмів взаємодії в об'єктах живої та неживої природи. Біофізичні методи нині застосовуються в дослідженні природних конденсованих систем, фазової та міжмолекулярної взаємодії в таких системах, зокрема для дослідження буриштин. Спектральні методи мають перевагу – можливість неруйнівного аналізу речовини, що є важливим, наприклад для археологічних, криміналістичних досліджень, ювелірної справи, де цілісність об'єктів дослідження посідає ключове місце. Так, для цих галузей важливу роль у вивченні об'єктів відіграє FTIR-спектроскопія, завдяки застосуванню якої можна вивчати якісний склад речовин, інтерпретувати отримані результати в контексті датування, встановлення походження матеріалів. Мета роботи – застосування FTIR-спектроскопії для визначення матеріалу виготовлення намистин, які були знайдені у процесі археологічних розкопок, як виробів із буриштин, визначення джерела його походження. Об'єктом дослідження були 4 намистини із Зольника-2 пам'ятки Могриця-Зольники. Для ідентифікації матеріалу виготовлення намистин було використано метод FTIR-спектроскопії порушеного повного внутрішнього відбиття. Наявність у спектрах пропускання речовини характеристичних піків, притаманних органічним компонентам буриштин, дозволила встановити, що всі 4 намистини виготовлені з буриштин, а не зі скла чи рослинних смол інших типів. Під час дослідження типу буриштин визначено, що намистина № 1 виготовлена з балтійського буриштин, намистини № 2 та 3 – з буриштин румунського типу. Висновки зроблені на основі наявності маркерних сполук у буриштині – буриштинової кислоти та її солей. Використання інфрачервоної спектроскопії для ідентифікації буриштин є ефективним неруйнівним методом дослідження буриштин. За допомогою FTIR-спектроскопії вдалось визначити вміст маркерних органічних речовин буриштин в археологічних артефактах та, що більш важливо, визначити ймовірний тип буриштин, з якого виготовлені намистини. Ці результати є підтвердженням важливості застосування біофізичних методів у суміжних дослідженнях. Для

¹ аспірантка кафедри біології
(Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин)
e-mail: olga.pykhova@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4078-4714

² доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри біології
(Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин)
e-mail: kuchmenko1978@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3021-8583

археологічних досліджень отримані результати є важливими, бо знахідки виробів із бурштину є рідкістю для пам'яток скіфського часу Лісостепового Лівобережжя, а особливо зольників.

Ключові слова: FTIR-спектроскопія, ATR-спектроскопія, археологічні дослідження, бурштин України, зольники, скіфський час, біогенні компоненти.

BIOLOGICAL APPROACHES TO THE RESEARCH OF ARCHAEOLOGICAL ARTIFACTS FROM ARCHAEOLOGICAL EXCAVATION SITES USING THE SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF AMBER

O. V. Pykhova, O. B. Kuchmenko

Biophysical, in particular spectroscopic, research methods are tools for establishing the composition, and studying the structure and mechanisms of interaction in objects of animate and inanimate nature. Biophysical methods are currently used in studying the natural condensed matter, phase, and intermolecular interactions in such systems, particularly for the study of amber. Spectral methods have the advantage of the possibility of non-destructive analysis of the matter, which is important, for example, for archaeological research, and forensics jewelry, where the integrity of the objects of study occupies a key place. Thus, for these industries, FTIR spectroscopy plays an important role in the study of objects, thanks to the use of which it is possible to study the qualitative composition of substances, interpret the results obtained in the context of dating, and establish the origin of materials. The purpose of the work is to use FTIR spectroscopy to determine the material for the manufacture of beads found during archaeological excavations as amber products and to determine the source of their origin. The object of the study was 4 beads from Zolnik-2 sights of Mohrytsya-Zolniki. The FTIR spectroscopy of the disturbed total internal reflection was used to identify the material for the manufacture of beads. The presence in the substance transmission spectra of characteristic peaks inherent in the organic components of amber made it possible to establish that all 4 beads are made of amber, and not of glass, or vegetable resins of other types. In the study of the type of amber, it was determined that bead № 1 is made of Baltic amber, and beads № 2 and № 3 are made of Romanian-type amber. The conclusions are made based on the presence of marker compounds in succinic acid and its salts. The use of infrared spectroscopy to identify amber is an effective non-destructive method for the study of amber. With the help of FTIR spectroscopy, it was possible to determine the content of marker organic matter of amber in archaeological artifacts and, more importantly, to determine the probable type of amber from which the beads are made. These results confirm the importance of applying biophysical methods in related studies. For archaeological research, the results obtained are important, because the invasion of amber products is rare for the monuments of the Scythian time of the Forest-steppe Left Bank, especially ash trees.

Key words: FTIR spectroscopy, ATR spectroscopy, archaeological research, amber of Ukraine, ash trees, Scythian time, biogenic components.

Вступ

Бурштин є природним матеріалом, що утворений із залишків рослинних смол під дією тиску та високої температури. Нині вважається, що цей матеріал походить зі смоли хвойних рослин вимерлих видів родин *Araucariaceae* або *Pinaceae*. Кількість відкладеного в палеогені тільки балтійського бурштину оцінюється як 10^5 тон (Dietz et al., 2013). Це, імовірно, привело до активного використання виробів із бурштину як предметів розкоші. Цей матеріал ще за доби каменю використовувався людьми для виготовлення прикрас і амулетів. Ззовні схожий на натуральний камінь, але набагато м'якший, він легко піддавався механічній обробці, що дозволяло створювати вироби

різної форми та призначення (намиста, елементи оздобу, прясла, фігурки тощо).

За фізичними властивостями бурштин є матеріалом із низькою щільністю, що легко піддається механічній обробці та може бути різного кольору – від світло-жовтого до темно-коричневого. Іноді в ньому консервуються давні організми, що робить його джерелом унікальних біовключень.

Утворювався бурштин за механізмом радикальної полімеризації з великої кількості прекурсорів, основу яких становлять смоли хвойних рослин. Хімічно він є гетерогенною сумішшю макромолекул, мономерами яких є понад 700 різних насичених, ненасичених і ароматичних вуглеводнів, також природних терпенів, карбонових

кислот і похідних від них спиртів. Зокрема, для бурштину характерні такі ароматичні сполуки, як похідні нафталену, антрацену та фенантрени. Хімічний склад бурштину залежить від регіону, де він був утворений, відповідно, і від рослин, які слугували джерелом утворення. Так, для балтійського характерна наявність бурштинової кислоти, її естерифікованої форми та солей – сукцинатів. Саме ці речовини слугують маркерними для визначення приналежності до певної території (Dietz et al., 2013). Окрім джерела рослинної смоли, яка утворила бурштин, важливими є умови консервування та знаходження бурштину. Так, властивість, за якою FTIR-спектроскопія слугує інструментом для дослідження місця походження, є ступінь окиснення речовин бурштину, що дозволяє визначити характеристичні піки пропускання, які відрізняються для бурштинів залежно від походження й умов консервації (Malanchuk et al., 2018).

Залежно від географічного походження та властивостей бурштин поділяють на кілька груп. Так, найбільш розповсюдженими є балтійський (сукцинит), домініканський, сицилійський (симетит), бурштин із Бірми (бурміт), бурштин із Румунських Карпат – романіт. За хімічним складом бурштин класифікують на 5 груп. Група Ia включає найбільшу кількість за масою бурштину – балтійський, у складі якого є бурштинова кислота та її похідні. Той, що належить до класу Ib, не містить сукцинатів, проте збагачений лантаноїдами. Інші групи становлять меншість та не є розповсюдженими в Європі. Більшість європейського бурштину є саме балтійською й утворена зі смоли вимерлої хвойної рослини *Pinus succinifera*, родова назва якої відображає вміст сукцинату у складі матеріалу (Poulin & Helwig, 2014).

В англомовній літературі вживаються терміни «геологічний» і «археологічний» бурштин, що відображають антропогенний вплив на цей матеріал. Так, археологічним називають бурштин, який має сліди обробки та знайдений у культурному шарі археологічних пам'яток. В Україні найдавніші знахідки археологічного бурштину фіксуються на пам'ятках верхнього палеоліту. Спочатку бурштин використовувався локально, у місцях залягання, а в період доби бронзи та раннього заліза став предметом торгівлі й ареал поширення виробів із нього суттєво збільшився. Через широке застосування бурштину як матеріалу для виготовлення

прикрас дослідження його складу та походження є актуальним для реконструкції культурно-історичних процесів.

Для європейського регіону найхарактернішим є бурштин з узбережжя Балтійського моря, що походить від смоли вимерлого виду дерев *Pinus succinifera*. Родовища і, відповідно, знахідки цього бурштину географічно простягаються від Північної Європи до Уралу. Нині балтійський бурштин трапляється в Литві, Латвії, Естонії, Польщі, Росії, а іноді вимивається на береги Данії, Норвегії й Англії. Інші світові джерела бурштину включають М'янму, Ліван, Сицилію, Румунію, Німеччину, Мексику, Домініканську Республіку та Канаду (Dietz et al., 2013). На території України найбільше розповсюдження також має балтійський бурштин. Так, його виходи відомі поблизу Києва, Харкова та на території Волині. Український бурштин має відносно велику глибину залягання, тому освоєння таких джерел почалось досить недавно (Mänd et al., 2018).

За скіфської доби знахідки бурштинових намистин на пам'ятках України досі фіксувалися переважно в похованнях на території Лисостепового Правобережжя (Klochko, 2011). Пояснити їх розповсюдження тут можна тим, що на цій території пролягав відомий Бурштиновий шлях, який активно функціонував упродовж доби бронзи (Klochko, 2011).

Серед методів ідентифікації та дослідження бурштину є більш традиційні інвазійні методи та такі, що є неруйнівними. Для ідентифікації бурштину досліджують його густину, здатність до флуоресценції, розчинність, температуру плавлення тощо. Усі ці дані допомагають відрізнити бурштин від копалу, смоли та синтетичних аналогів. Для встановлення походження бурштину застосовуються інструментальні методи: хроматографія, мас-спектрометрія, ЯМР та інфрачервона спектроскопія. Для проведення ЯМР необхідно використати 30–100 мг зразка, для газової мас-спектрометрії – 1–3 г зразка, що є великою кількістю та потребує фактично руйнування чи знищення археологічного артефакту. Натомість FTIR спектроскопія із застосуванням порушеного повного відбиття є неруйнівним методом, що робить її використання доцільним у разі вивчення археологічних артефактів (Klochko, 2008; Angelini & Bellintani, 2005). Так, застосування інфрачервоної спектроскопії дозволяє визначити приналежність бурштину до

того чи того типу, зокрема, за допомогою цього методу можна розрізнити найпоширеніший у Європі тип бурштину – балтійський. Спектри балтійського бурштину, отримані методом інфрачервоної спектроскопії, містять характеристичні піки в діапазоні від 1160 см^{-1} до 1260 см^{-1} , мають специфічну форму та називаються «балтійське плече». Область під назвою «балтійське плече» пояснюється наявністю естерифікованої бурштинової кислоти та використовується для ідентифікації саме бурштину балтійського походження.

Для археологічних артефактів, що візуально мають вигляд бурштину, першим етапом є ідентифікація матеріалу, з якого вони зроблені. FTIR-спектроскопія дозволяє безпомилково встановити матеріал виготовлення як бурштин та відкинути ймовірні варіанти – скло, штучні полімери. Доцільність використання FTIR у дослідженні географічного походження та можливого джерела сировини артефактів із бурштину пояснюється точністю та чутливістю даного методу.

Метою роботи було застосування FTIR-спектроскопії порушеного повного внутрішнього відбиття для визначення матеріалу виготовлення намистин, які були знайдені у процесі археологічних розкопок, як виробів із бурштину, визначення джерела його походження.

Матеріал і методи

Для дослідження були взяті 4 намистини із Зольника-2 пам'ятки Могриця-Зольники, що розташована на території Сумської області. Намистини були виявлені під час розкопок Археологічної експедиції Національного університету «Києво-Могилянська академія» у 2021 р. в результаті просіювання культурного шару пам'ятки. Наявні матеріали дозволяють попередньо датувати зольник кінцем VI ст. до н.е.

Зольники – це курганоподібні насипи до 3 м заввишки, які характеризуються значною насиченістю культурного шару керамікою та побутовими відходами та золою. Вони не належать ані до поховальних, ані до поселенських пам'яток, імовірно, являють собою культові споруди. Дотепер їхнє функціональне призначення точно не відоме. Ця категорія об'єктів виявлена на території басейну Псла не так давно, тому є новою для археології цієї території (Білінський і Кабанов, 2015).

Для спектроскопічних досліджень використовували інфрачервоний спектрометр

фірми “Shimadzu” (Японія, IRAffinity-1S із приставкою The Quest Single Reflection ATR Accessory P/NGS10800). Діапазон вимірювання $4\ 000\text{--}400\text{ см}^{-1}$, роздільна здатність 4 см^{-1} . Бурштин є оптично гетерогенним середовищем. Для нівелювання ефекту неоднорідного розсіювання світла гетерогенною системою було застосовано модель Кубелка – Мунк для дифузного поширення світла. Модель Кубелка – Мунк є однією з моделей для опису проходження світла в неоднорідному середовищі та застосовується для пористих чи гетерогенних середовищ. Обробка спектральних даних під час проведення аналізу властивостей пропускання світла для таких середовищ проблематична через розсіювання світла, що спричинює послаблення чи зникнення деяких смуг у спектрах. У даній моделі особливості поширення світла через неоднорідні середовища нівелюються за допомогою введення коефіцієнта розсіювання – s і обробки спектрів за допомогою функції Кубелка – Мунк (Abdullahi et al., 2016).

Бурштин є гетерогенним матеріалом також на молекулярному рівні, для нього характерні варіації в кількісному складі в різних частинах твердого зразка. Для уникнення помилок в інтерпретації спектрів було знято по 20 спектрів із кожної намистини з різних частин намистин. Для кожного спектра було визначено характеристичні піки, інтерпретація проводилась з урахуванням усіх отриманих результатів, у роботі наведено приклади отриманих спектрів.

Результати

У результаті роботи було отримано низку спектрів пропускання археологічних артефактів – намистин. Першим завданням була ідентифікація наявних намистин як бурштину, зокрема розрізнення бурштину від скла.

За наявними характеристичними піками, що притаманні бурштину, було встановлено приналежність усіх чотирьох намистин до бурштинових виробів. Так, у спектрах пропускання було отримано характерні піки за $3\ 450\text{ см}^{-1}$, що притаманні бурштиновій кислоті в матеріалі (рис. 1). Окрім того, в отриманих спектрах були наявні піки поглинання за $1\ 250\text{ см}^{-1}$ та $1\ 155\text{ см}^{-1}$, для яких є специфічна назва – «балтійське плече». Саме ця ознака притаманна бурштину балтійського походження.

Початковим завданням була ідентифікація намистин як виробів із бурштину та від-

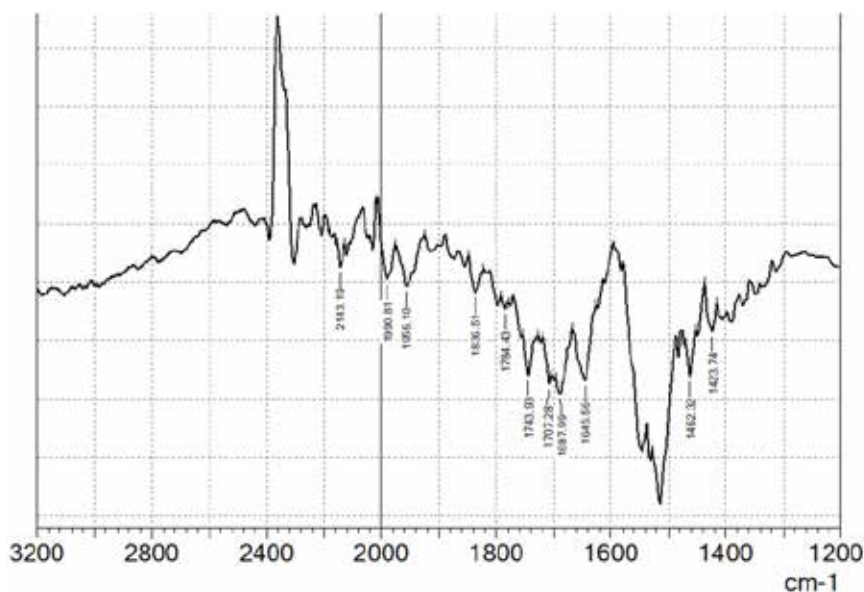


Рис. 1. FT-IR спектр пропускання для зразка № 2

сікання скла як матеріалу виготовлення. Для скла характерна наявність меншої кількості характеристичних піків, найінтенсивніший із яких для діапазону $4\ 000\text{--}1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ припадає на $3\ 436\ \text{cm}^{-1}$. Оскільки скло є матеріалом мінеральної природи, то характерна область поглинання лежить у діапазоні від $1\ 100\ \text{cm}^{-1}$ до $500\ \text{cm}^{-1}$. У результаті порівняння отриманих спектрів зі спектрами скла можна дійти висновку, що дані артефакти не є виробами зі скла (Odriozola et al., 2019).

Обговорення

У спектрах, отриманих зі зразків бурштинових намистин, було ідентифіковано піки, що відповідають частотним коливанням $\text{C}=\text{C}$ і $\text{C}=\text{O}$ зв'язків у ланцюгах карбонових кислот. Також пік $1\ 600\text{--}1\ 604\ \text{cm}^{-1}$, що відповідає коливанню COO^- в молекулах ненасичених карбонових кислот. Піки за $1\ 664\ \text{cm}^{-1}$ та $1\ 687\ \text{cm}^{-1}$ можуть свідчити про наявність абіетинової кислоти – ароматичної одноосновної карбонової кислоти, що притаманна викопним бурштинам, зокрема й археологічним. В отриманих спектрах бурштину також було ідентифіковано піки за $1\ 514\ \text{cm}^{-1}$, що відповідають розтягуванню $\text{C}=\text{C}$, і пік за $1\ 383\ \text{cm}^{-1}$, що відповідає деформаційним коливанням $\text{C}-\text{H}$. Піки за $1\ 547\text{--}1\ 423\ \text{cm}^{-1}$, що були ідентифіковані на спектрах пропускання досліджуваного бурштину, є специфічними для карбонових і гідроксокислот і притаманні саме румунського бурштину. Водночас піки, що відповідають тим же молекулярним структурам для балтійського бурштину, зсунуті в діапазон $1\ 547\text{--}1\ 300\ \text{cm}^{-1}$. Піки за $1\ 458$

і $1\ 385\ \text{cm}^{-1}$, що було ідентифіковано у спектрах пропускання бурштину, відповідають деформаційним коливанням метиленової та метильної груп. Також для бурштину характерна наявність у складі терпенів і дитерпенів (табл. 1). Так, в отриманих спектрах пропускання зразків бурштину було встановлено наявність деформаційних коливань за $2\ 860\ \text{cm}^{-1}$ і $2\ 933\ \text{cm}^{-1}$ (Gough & Mills, 1972).

Отже, візуальне дослідження й аналіз отриманих спектрів пропускання дозволили встановити, що всі чотири намистини належать до матеріалу органічного походження, а саме бурштину.

Після визначення приналежності матеріалу, з якого виготовлені намистини, до бурштину, наступним завданням було визначення ймовірного місця походження сировини. Саме для території Європи найхарактернішим є бурштин з узбережжя Балтійського моря, що походить від смоли вимерлого виду дерев *Pinus succinifera*. На території Європи, особливо Румунії та прилеглих до Карпат регіонів, знаходять вироби з романіту – румунського бурштину. Для бурштинових артефактів, знайдених на території України, імовірно, характерна приналежність до балтійського або румунського типів бурштину. Методом інфрачервоної спектроскопії можна розрізнити ці два типи бурштинів. У діапазоні $4\ 000\text{--}3\ 000\ \text{cm}^{-1}$ відсутні значимі відмінності між романським і балтійським бурштином, проте ця область спектра має значення для інтерпретації геологічних зразків бурштину. Головною від-

Таблиця 1

Характеристичні частоти ІЧ поглинання зразків бурштину

1 664 cm^{-1}	Розтягування C = C у молекулах абієтинової кислоти.
1 687 cm^{-1}	Розтягування C = C у молекулах абієтинової кислоти.
1 645 cm^{-1}	Розтягування C = C у молекулах ізопімарової кислоти й абієтинової кислоти у смолах <i>Pinus halepensis</i> .
1 684–1 600 cm^{-1}	Коливання, що відповідають зв'язкам C = C, C = O. Деформаційні коливання C – H – C. Коливання COO ⁻ ненасичених карбонових кислот.
1 514 cm^{-1}	C = C розтягування.
1 383 cm^{-1}	Деформаційні коливання C – H.
2 652, 2 534 cm^{-1}	Розтягування C – H.
1 547–1 423 cm^{-1}	Піки, специфічні для карбоксильних і гідроксокислот. Пік, специфічний для румунського бурштину.
1 547–1 300 cm^{-1}	Піки, специфічні для карбоксильних і гідроксокислот. Пік, специфічний для балтійського бурштину.
2 550 і 2 702 cm^{-1}	Піки, характерні для розтягування карбоксильних груп.
1 450 і 1 355 cm^{-1}	Розтягнення C – H у метильних і метиленових групах у структурі аліфатичних карбонових кислот.
2 870 і 2,930 cm^{-1}	Розтягнення C – H у метильних і метиленових групах ароматичних кілець у структурі дитерпенів.

мінністю між спектрами FTIR балтійського та румунського бурштину є наявність характеристичних піків за 1 250–1 060 cm^{-1} , що мають назву «балтійське плече», наявність яких характерна для балтійського бурштину. Для румунського бурштину пік має іншу форму, а його максимум зміщений до приблизно 1 045–1 020 cm^{-1} (Litescu et al., 2012; Varbu et al., 2010).

Важливою рисою спектрів FTIR бурштинів є наявність характеристичних піків в області 900–600 cm^{-1} . У цьому регіоні можуть бути два типи піків, залежно від віку та походження матеріалу. Так, відсутність різко виражених піків у цій області або відсутність подвійного піку в області 667 cm^{-1} характерна для більш давнього бурштину – балтійського. Для румунського бурштину характерна наявність широкого піку з максимумом, що припадає на 1 045 cm^{-1} , що зберігається і за деконволюції спектра (Odrizola et al., 2019). Для більш молодих бурштинів, зокрема романіту, характерна більша кількість внутрішньомолекулярних зв'язків, як-от зв'язані -ОН групи, що зумовлюють зсув максимуму піку на 1 595 cm^{-1} , порівняно з балтійським, де максимум піку припадає на 1 640 cm^{-1} .

Бурштин – оптично неоднорідне середовище, яке також може містити різноманітні вклучення. Різниця між спектрами того самого зразка може проявлятися в області, що належить до коливань метильної групи та метиленової ланки. На спектрах це проявляється коливанням інтенсивності піків

за 2 962–2 850 cm^{-1} та у специфічних для групи CH_3 коливаннях за 1 375 cm^{-1} .

У результаті дослідження намистин із бурштину для намистини № 1 була встановлена приналежність її до балтійського бурштину. Так, під час оброблення спектрів намистини із бурштину була встановлена наявність характерних піків – «балтійського плеча» – за 1 145 cm^{-1} (рис. 2). Для порівняння наведено спектр поглинання для намистини № 2, який не містить характерного «балтійського плеча».

Для бурштинових намистин № 2 та № 3 було отримано низку спектрів із піками, характерними для романіту. Так, для намистин № 2 та № 3 характерна відсутність «балтійського плеча», у них наявні подвійні піки за 670–700 cm^{-1} . Також для зразків № 2 та № 3 встановлено наявність піків за 1 775 cm^{-1} , 1 753–1 760 cm^{-1} , подвійного піку за 1 510–1 560 cm^{-1} та 865 cm^{-1} , що притаманні саме румунському бурштину (Varbu et al., 2010).

Наявність серед зразків намистин румунського типу бурштину потребує додаткових досліджень. Якщо наявність балтійського типу бурштину є очікуваним результатом, то для румунського типу бурштину результати є непередбачуваними, тому потребують подальших досліджень із застосуванням фізико-хімічних методів і мас-спектрометрії. Подальше дослідження, підтвердження чи уточнення результатів є переважно інвазійним, тобто потребує руйнування артефактів. На етапі первинних досліджень

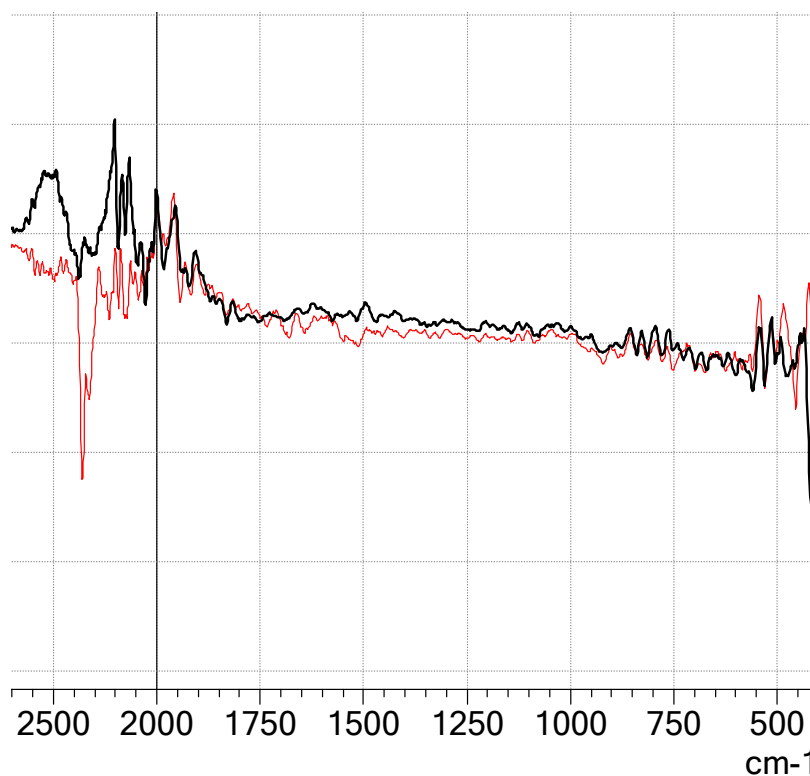


Рис. 2. FTIR-спектри пропускання бурштинових намистин № 1 (чорна лінія) і № 2 (червона лінія)

саме FTIR-спектроскопія як неруйнівний метод є зручним та інформативним

Висновки

Використання інфрачервоної спектроскопії є потужним біофізичним інструментом для дослідження якісного та кількісного складу матеріалів, природних і штучних речовин, міжмолекулярної взаємодії тощо. Так, чутливість і точність цього методу дозволили ідентифікувати матеріал виготовлення для досліджуваних археологічних артефактів і встановити біохімічні особливості складу бурштину. Тому використання FTIR-спектроскопії є перспективним методом у галузі археології, що в українських дослідженнях активно розвивається. Використання інфрачервоної спектроскопії порушеного повного внутрішнього відбиття в даній роботі дозволило виконати неруйнівний аналіз біохімічного складу та визначити маркерні сполуки для бурштину.

Важливо, що знаходження виробів із бурштину є рідкістю для пам'яток скіфського часу Лисостепоного Лівобережжя, а особливо зольників, тому отримані результати не тільки важливі для демонстрації мультидисциплінарного підходу, а і мають практичне значення для археологічних досліджень.

У результаті роботи методом FTIR-спектроскопії проаналізовано 4 бурштинові намистини з місць археологічних розкопок. Установлено, що намистина № 1 виготовлена з балтійського бурштину, що маніфестується наявністю бурштинової кислоти у складі, намистини № 2 та № 3 – з румунського. Для намистини № 4 тип бурштину встановити не вдалось. Імовірно, це пов'язано з нерівною поверхнею та пошкодженнями виробу, що не дозволила отримати якісні спектри пропускання із застосуванням методу порушеного повного відбиття. Можливо, використання подрібненого зразка дозволить отримати спектри пропускання для такого об'єкта, хоча цей підхід передбачає руйнування артефакту.

Не менш важливим було визначення типу бурштину, з якого були виготовлені намистини. За допомогою FTIR-спектроскопії встановлено їх приналежність до балтійської та румунської груп. Наявність бурштину-сукциніту була очікуваною. Намистини, знайдені на пам'ятках скіфського часу, виготовлялися переважно саме з нього. Ї його наявність пояснюється функціонуванням за доби бронзи торгового шляху, про який ішлося вище. Так само не можна виключати, що якась кількість виробів із

бурштину, який давнє населення збирало на берегах Дніпра та його притоків, що належить до тієї ж Балтійської групи. Що стосується виявленого бурштину-романіту, то шляхи його потрапляння на пам'ятку будуть досліджуватися в майбутньому.

Зважаючи на те, що опублікованих результатів спектроскопічних досліджень бурштинових виробів зі скіфських пам'яток не так багато, це дослідження можна вважати актуальним загалом для скіфології. Беручи до уваги неінвазивність залученого методу, що є беззаперечним пріоритетом у роботі з археологічними матеріалами, подальші міждисциплінарні дослідження є надзвичайно перспективними.

Окрім того, дослідження фізико-хімічних і оптичних властивостей українських бурштинів може бути корисним не лише для археології, історії, ювелірної справи, і для фундаментальних досліджень із таксономії. Так, дослідження біохімічного складу викопних смол є ефективним інструментом у сфері палеобіології (Wolfe et al., 2009). Тому перспективами подальших досліджень є вивчення археологічних артефактів із бурштину з інших пам'яток і колекцій, а також формування бази даних археологічного та геологічного бурштину України, а застосування FTIR-спектроскопії для цього є необхідним інструментом.

Список використаної літератури

- Білинський О.О., Кабанов Д.О. Пам'ятки скіфського часу у верхів'ях Псла. *Археологія і давня історія України*. 2015. Вип. 4 (17). С. 122–127.
- Abdullahi S.S., Güner S., Musa Y.K.I.M., Adamu B.I., Abdulhamid M.I. Simple method for the determination of band gap of a nanopowdered sample using Kubelka Munk theory. *NAMP J.* 2016. 35. P. 241–246.
- Angelini I., Bellintani P. Archaeological ambers from northern Italy: an FTIR-drift study of provenance by comparison with the geological amber database. *Archaeometry*. 2005. 47 (2). P. 441–454. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2005.00212.x>.
- Barbu O.H., Teodor E.D., Virgolici M., Manea M.M., Petroviciu I., Teodor E.S. Romanian Archaeological Amber Artefacts Characterisation Using Vibrational Spectroscopy and Multivariate Data Analysis. *Application of Multivariate Analysis and Chemometry to Cultural Heritage and Environment 3rd ed.*, Taormina, Sicily island, Italy, Europe, 26-29 September 2010 [Електронний ресурс]. URL: <http://surl.li/mlvbg> (дата звернення 12.05.2023)
- Dietz C., Catanzariti G., Quintero S., Jimeno A. Roman Amber Identified as Siegburgite. *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2013. 6 (1). P. 63–72. <https://doi.org/10.1007/s12520-013-0129-4>.
- Gough L.J., Mills J.S. The Composition of Succinite (Baltic Amber). *Nature*. 1972. 239 (5374). P. 527–528. <https://doi.org/10.1038/239527a0>.
- Klochko L.S. Amber in the clothing of the population of Scythia. *Między Bałtykiem a Morzem Czarnym. Szlaki międzymorza: IV–I tys. przed Chr.* 2011. 4. P. 161–173.
- Klochko V.I. Bug-Bog trade route. *Na pograniczu światów. Studia z praziejówmiędzymorza bałtycko-pontyjskiego ofiarowane Profesorowi Aleksandrowi Koško*. 2008. 60. P. 239–249.
- Litescu S.-C., Teodor E.D., Truica G.-I., Tache A., Radu G.-L. Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Useful Analytical Tool for Non-Destructive Analysis, Infrared Spectroscopy – *Materials Science, Engineering and Technology, Prof. Theophanides Theophile (Ed.)*. 2012. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mlxxg> (access date 15.06.2023).
- Malanchuk Z., Moshynskyi V., Malanchuk Y., Korniienko V. Physico-mechanical and chemical characteristics of amber. *Solid State Phenomena*. 2018. 277. P. 80–89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.80>.
- Mänd K., Muehlenbachs K., McKellar R., Wolfe A.P. Distinct Origins for Rovno and Baltic Ambers: Evidence from Carbon and Hydrogen Stable Isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2018. 505. P. 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.004>.
- Odriozola C.P., Garrido Cordero J.Á., Daura J., Sanz M., Martínez-Blanes J.M., Avilés M.Á. Amber imitation? Two unusual cases of Pinus resin-coated beads in Iberian Late Prehistory (3rd and 2nd millennia BC). *PLoS ONE*. 2019. 14(5). P. e0215469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215469>.
- Poulin J., Helwig K. Inside Amber: The Structural Role of Succinic Acid in Class Ia and Class Id Resinite. *Analytical Chemistry*. 2014. 86 (15). P. 7428–7435. <https://doi.org/10.1021/ac501073k>.

Wolfe A.P., Tappert R., Muehlenbachs K., Boudreau M., McKellar R.C., Basinger J.F., Garrett A.A. New Proposal Concerning the Botanical Origin of Baltic Amber. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009. 276 (1672). P. 3403–3412. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0806>.

References (translated & transliterated)

Bilynskyi, O., & Kabanov, D. (2015). Pamiatky skifskoho chasu u verkhiviakh Psla [Scythian Time Sites on the Upper Psel]. *Arkheolohiia i davnia istoriia Ukrainy [Archeology and ancient history of Ukraine]*, 4 (17), 122-127 [in Ukrainian].

Abdullahi, S.S., Güner, S., Musa, Y.K.I.M., Adamu, B.I., & Abdulhamid, M.I. (2016). Simple method for the determination of band gap of a nanopowdered sample using Kubelka Munk theory. *NAMP J*, 35, 241-246 [in English].

Angelini, I., & Bellintani, P. (2005). Archaeological ambers from northern Italy: an FTIR-drift study of provenance by comparison with the geological amber database. *Archaeometry*, 47 (2), 441–454. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2005.00212.x> [in English].

Barbu, O.H., Teodor, E.D., Virgolici, M., Manea, M.M., Petroviciu, I., & Teodor, E.S. (2010). Romanian Archaeological Amber Artefacts Characterisation Using Vibrational Spectroscopy and Multivariate Data Analysis. *Application of Multivariate Analysis and Chemometry to Cultural Heritage and Environment 3rd ed.*, Taormina, Sicily island, Italy, Europe, 26-29 September 2010. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mlvbg> (access date 12.05.2023) [in English].

Dietz, C., Catanzariti, G., Quintero, S., & Jimeno, A. (2013). Roman Amber Identified as Siegburgite. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 6 (1), 63–72. <https://doi.org/10.1007/s12520-013-0129-4> [in English].

Gough, L.J., & Mills, J.S. (1972). The Composition of Succinite (Baltic Amber). *Nature*. 239 (5374), 527–528. <https://doi.org/10.1038/239527a0> [in English].

Klochko, L.S. (2011). Amber in the clothing of the population of Scythia. *Między Bałtykiem a Morzem Czarnym. Szlaki międzymorza: IV—I tys. przed Chr.*, 161–173 [in English].

Klochko, V.I. (2008). Bug-Bog trade route. *Na pograniczu światów. Studia z praziejówmiędzymorza bałtycko-pontyjskiego ofiarowane Profesorowi Aleksandrowi Koško*, 239–249 [in English].

Litescu S.-C., Teodor E.D., Truica G.-I., Tache A., & Radu G.-L. (2012). Fourier Transform Infrared Spectroscopy - Useful Analytical Tool for Non-Destructive Analysis, *Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology, Prof. Theophanides Theophile (Ed.)*. [Electronic resource] URL: <http://surl.li/mlxxg> (access date 15.06.2023) [in English].

Malanchuk, Z., Moshynskyi, V., Malanchuk, Y., & Korniienko, V. (2018). Physico-mechanical and chemical characteristics of amber. *Solid State Phenomena*, 277, 80–89. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.277.80> [in English].

Mänd, K., Muehlenbachs, K., McKellar, R., & Wolfe, A.P. (2018). Distinct Origins for Rovno and Baltic Ambers: Evidence from Carbon and Hydrogen Stable Isotopes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 505, 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.06.004> [in English].

Odriozola, C.P., Garrido Cordero, J.Á., Daura, J., Sanz, M., Martínez-Blanes, J.M., & Avilés, M.Á. (2019). Amber imitation? Two unusual cases of Pinus resin-coated beads in Iberian Late Prehistory (3rd and 2nd millennia BC). *PLoS ONE*, 14(5), e0215469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215469> [in English].

Poulin, J., & Helwig, K. (2014). Inside Amber: The Structural Role of Succinic Acid in Class Ia and Class Id Resinite. *Analytical Chemistry*, 86 (15), 7428–7435. <https://doi.org/10.1021/ac501073k> [in English].

Wolfe, A.P., Tappert, R., Muehlenbachs, K., Boudreau, M., McKellar, R.C., Basinger, J.F., & Garrett, A.A. (2014). New Proposal Concerning the Botanical Origin of Baltic Amber. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276 (1672), 3403–3412. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.0806> [in English].

Отримано: 03.08.2023
Прийнято: 23.10.2023