

DOI: <https://doi.org/10.36885/nzdpm.2024.40.101-112>

УДК 574.2 (477.87)

Рагуліна М.Є.<sup>1,3</sup>, Орлов О.Л.<sup>1</sup>, Гоблик К.М.<sup>2</sup>, Борняк У.І.<sup>3</sup>, Кіт Л. Я.<sup>3</sup>, Дмитрук Р.Я.<sup>3</sup>

## БІОТИЧНІ АГЕНТИ ТУФОНАГРОМАДЖЕННЯ У ВУГЛЕКИСЛИХ ЖОРСТКОВОДНИХ ДЖЕРЕЛАХ МІЖГІРСЬКОЇ УЛОГОВИНИ ТА ПРИЛЕГЛИХ ТЕРИТОРІЙ

Визначено основні групи біоти, які беруть участь у процесах туфоутворення, їхню функціональну роль у формуванні травертинів на витоках вуглекислих жорстководних джерел Міжгірської улоговини та прилеглих територій. Встановлено, що у формуванні травертинів усіх обстежених локацій важливу роль відіграють представники мікро-, бріо- та фітобіоти, а відтак, досліджувані травертини за своїм походженням є біогенними. Провідну роль у первинних актах туфонагромадження (I стадія) відіграють представники мікробіоти, головно – ціанобактерії порядку *Oscillatoriales*. Такі бактеріогенні ініціальні форми, що можна означити як первинні тромбоїди, представлені дрібно-, зрідка середньозернистими охристо-жовтими агрегатами сферичної форми, діаметром 0,5-2 мм, що активно нагромаджуються на виходах джерел. Ці «згустки» (мезоклоти) з часом наростають та ущільнюються, формуючи слабкоцементовані тромболіти які є скупченням окремих агрегатів разом із часточками піску, мулу, гірських порід, рослинних решток тощо. Наступна, пост-піонерна стадія (II), маркується за появою спеціалізованої амфібійної бріобіоти. У формуванні туфових відкладів наступної стадії (III) провідну роль відіграє мохова рослинність союзу *Pellion endiviifoliae*, мінералізовані дернини якої утворюють легкі, крихкі пористі бріоліти охристого забарвлення. Бріоліти зазвичай містять сезонні шари, рясно інкрустовані листям дерев, що ростуть поблизу джерела. Зважаючи на специфіку та цінність біотичної (кальцифільна бріобіота) та абіотичної, насамперед – геологічної (озалізнені травертини), складової, жорстководні туфогенні джерела Міжгірської улоговини можна вважати цінними пам'ятками природи Закарпаття. Проте не зважаючи на природоохоронний статус більшості джерел (гідрологічні пам'ятки природи місцевого значення), вони нерідко потерпають від стихійного благоустрою, несанкціонованого відбору води, надмірного потоку рекреантів та потребують підсилення заходів охорони.

**Ключові слова:** туфогенна біота, ціанобактерії, мохоподібні, жорстководні джерела, травертин (вапняковий туф), рідкісні оселища.

Травертини (вапнякові туфи) в Карпатах репрезентують сучасне мінералоутворення. Це специфічні карбонатні породи осадового типу, що утворюються в результаті низки хімічних реакцій у процесі виділення розчиненого вуглекислого газу з поверхневих чи підземних вод, збагачених  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{HCO}_3^-$  з активної участі живих організмів. В Українських Карпатах вони є достатньо поширеними та зазвичай пов'язані з джерелами мінеральних вод – вуглекислих, гідрокарбонатно-кальцієвого складу (Лемко та ін., 2005), які є однією з найбільших груп мінеральних вод Закарпаття (Білак, 2018). Травертини приурочені до зони розломів у флішовій товщі та обумовлені процесами термометаморфізму і наявністю карбонатної речовини у породах. Найвищий вміст кальцію (до 656,0 г/дм<sup>3</sup>) мають води Сойминсько-Келечинської групи, поширені в межах Міжгірської улоговини. Ці води вирізняються з-поміж інших вуглекислих мінеральних вод високим вмістом заліза (до 59,0 г/дм<sup>3</sup>) (Лемко та ін., 2005). Вони є переважно холодними (рідко –

субтермальними) та різної мінералізації: від прісних до солонуватих (1-10 г/дм<sup>3</sup>), з притаманною їм високою газонасиченістю (1,5-18 г/дм<sup>3</sup>). Зазвичай, вуглекислі мінеральні води виходять на денну поверхню у вигляді джерел, що пульсують. У місцях виходу води вони втрачають частину вуглекислоти, внаслідок чого навколо джерел відкладається твердий карбонат кальцію – вапняковий туф (травертин) (Чомко та ін., 2021).

На «значну кальцифікуючу силу» джерел Міжгірської улоговини звертали увагу ще у позаминулому сторіччі (Szilágyi, 1876). Проте дослідження джерел Межгірщини мали здебільшого бальнеологічне спрямування (Wiesner, 1935, Білак, 2018), тоді як їхні туфотвірні властивості залишались поза увагою дослідників. Найближчі до досліджуваного району знахідки травертинів описано у межах Чорногірського хребта та у долині р. Тиса (Матковський та ін., 2014). Результати наших попередніх досліджень окремих гідрологічних об'єктів Міжгір'я та прилеглих територій були висвітлені у низці праць (Борняк та ін., 2023а, 2023б, Рагуліна та ін., 2023а, 2023б).

Відомо, що на особливості формування та мінералогію травертинів визначальний вплив мають температура води, її склад, а також локальна біотична активність (Дідух та ін., 2018, Рагуліна та ін., 2023б). Відтак, туфотвірні (травертинові) джерела (petrifying springs) є результатом складної комплексної тісної взаємодії абіо- та біотичних чинників.

У формуванні травертинів залізистих джерел, як термальних, так і холодноводних, скрізь у світі активну участь беруть живі організми, головно – бактерії та водорості. Серед бактерій провідними групами є ціанобактерії (Cyanobacteria), зокрема, представники порядку Oscillatoriales (Kamran et al., 2021, Della Porta et al, 2022) і залізобактерії двох класів: термофільні Zetaproteobacteria, які колонізують гарячі джерела (Takasima Ch. et al., 2008; Kanellopoulos C., 2018) та психро-мезофільні Betaproteobacteria, які надають перевагу холодним та помірно-холодним водам до 20° С (Schmid B. et al., 2014). Водорості залізистих травертинових джерел (як термальних, так і холодноводних) зазвичай репрезентовані класами Bacillariophyceae та Chlorophyceae (Stanković et al, 2023).

Метою нашої роботи було визначення основних груп біоти, що беруть участь у процесах туфоутворення, їхньої функціональної ролі у формуванні травертинів на витоках вуглекислих жорстководних джерел Міжгірської улоговини та прилеглих територій, а також комплексна соціологічна оцінка досліджуваних об'єктів.

### **Методика і матеріали досліджень**

Згідно геоморфологічної регіоналізації Українських Карпат (Кравчук, 2021, Сливка, 2001) досліджувана територія знаходиться в межах двох морфоструктур – Вододільно-Верховинських (Міжгірська верховина і Привододільні (Внутрішні) Горгани) та Полонинсько-Чорногірських Карпат (Полонина-Боржава і Полонина-Красна). Меридіональною віссю досліджуваних теренів є долина Ріки. У районі Міжгір'я долина Ріки розширюється, утворюючи овальної форми пониження – Міжгірську улоговину.

Основні матеріали для роботи зібрані упродовж 2023 р. Моделлю для досліджень обрано 5 груп травертинових джерел, розташованих у межах смт Міжгір'я та прилеглих територій: в околицях населених пунктів Верхній Бистрий, Сойми, Міжгір'я, Келечин та Колочава. За температурним режимом досліджувані джерела

належать до холодних (+11,0-14,0 °C), за реакцією середовища – від слабкокислих до нейтральних (рН 5,0-6,4) (Горохтін М., 1987).

Для кожної з локацій зазначали (табл.1): розташування (географічні координати, висота над рівнем моря), ступінь природності витоків та русла (природні – N (без видимих змін), квазіприродні – QN (слабко трансформовані) та антропогенні – A (сильно трансформовані зі зміною характеру витоків, річища та течії), площу біотично активної зони (BAZ), залучену в процеси сучасного туфогенезу за участі живих організмів. (Орлов ті ін., 2023). Фізичні особливості та хімічний склад наведено за літературними даними (Білак, 2018, Лемко та ін., 2005, Природно-заповідний фонд).

Таблиця 1

**Характеристика туфотвірних джерел Міжгірської улоговини та прилеглих територій**

Параметри	Розташування / назва або № джерела				
	Верхній Бистрий № 1 (ВБ)	Сойми № 1 (С)	Міжгір'я № 3 (М)	Келечин № 226 (К)	Колочава «Боркут» (КБ)
<b>Загальна характеристика</b>					
Координати	48.6366 23.5307	48.5604 23.4890	48.5511, 23.4887	48.6108, 23.3899	48.4128 23.6839
Висота, м н.р.м.	595	560	470	545	550
Загальна мінералізація, г/дм <sup>3</sup>	9,7	6,7	9,2	2,5	4,3
рН	6,3	6,2	6,0	5,7	6,2
Температура, °C	15	9	15	7	12
Ступінь природності	A	A	QN	A	A
Тип загосподарювання	каптаж	каптаж	грот	каптаж	каптаж
BAZ, м <sup>2</sup>	30	20	10	5	10
<b>Хімічний склад води (основні катіони та аніони), мг/дм<sup>3</sup></b>					
CO <sub>2</sub>	1331,0	1800,0	1197,0	2000,0	1500,0
Ca <sup>2+</sup>	559,6	656,0	380,0	275,7	202,3
Fe	45,0	4,7	2,3	55,8	4,0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2776,0	2836,5	2714,5	268,4	2013,0

За характером процесів туфонагромадження досліджувані утворення ділили на активні та неактивні (інактивовані) (Pentecost, 1994); типи мікробіолітів ідентифікували як строматоліти / тромболіти (Kennard & James, 1986). Стадії туфонагромадження (I-III) визначали за домінантними групами туфотвірної біоти візуально за фізіогномічними ознаками.

Фітоценотичні описи та визначення рослинних угруповань здійснювали за флористичною класифікацією (методом Браун-Бланке) (Westhoff & Maarel, 1973). Назви синтаксонів мохової рослинності наведено за європейськими продромусами (Bardat & Hauguel, 2002, Bardat et al., 2004).

Типи природних оселищ, пріоритетних для охорони, наведено за переліком «Natura-2000» (NATURA 2000), оселища, важливі для збереження мохоподібних – згідно з концепцією «hot spot» (Tan, Iwatsuki, 1996). Індикаторні для оселища

жорстководних джерел (Petrifying springs: 7220) види судинних та мохоподібних подано за зведеним переліком (Bensettiti et al., 2002; Lyons & Kelly, 2016, Boucard, Ballaydier, 2016, Farr, Graham, 2017). Назви таксонів судинних рослин наведено за базою «Plants of the World Online» (Plants of the World, 2023), мохоподібних – за «Чеклістом бріофітів Європи, Мікронезії та Кіпру» (Hodgetts et al., 2020), водоростей – за «Listing the World's Algae» (Guiry & Guiry, 2024), бактерій – за «LPSN» (Parte et al., 2020).

### Результати та обговорення

Травертинові джерела Міжгірської улоговини прив'язані до берегів потоків та річок у підніжжі гірських гряд, на висоті 470-595 м н.р.м. Відомо, що мінеральні води досліджуваної території здавна використовувало місцеве населення, насамперед – на потреби бальнеотерапії. Навантаження на джерела суттєво зросло наприкінці XIX – початку XX ст., коли місцевість навколо Міжгір'я була визнана курортною. Відтак, усі досліджувані джерела, так чи інакше, зазнали антропогенного втручання. Наближеними до природних можна вважати штучно гротоподібно розширені виходи джерел з тріщин у гірській породі. Проте більшість витоків цілком втратили свій натуральний характер та зазнали каптування (колодязь або свердловина) за період від 50-х рр. XX ст. Така трансформація призвела до повної або часткової інактивації травертинових масивів, сформованих у догосподарчий період. Але, незважаючи на втручання, більшість джерел зберегли свої туфотвірні властивості навіть після техногенного втручання та активно нагромаджують відклади вапнякового туфу на сучасному етапі свого розвитку.

Травертинові джерела Міжгірської улоговини та прилеглих територій відзначаються значним різноманіттям форм туфоутворення, представлених відкладами різного віку (від ініціальних до давніх інактивованих масивів), потужності (від 0,01 до 5-10 м) та кольору (від світло-сірих до насичено охристо-бурих) тощо. В їхньому формуванні активну участь беруть представники різних груп біоти, зокрема – ціанобактерії, водорості, мохоподібні.

Прояви ініціальних процесів туфоутворення (I стадія) зафіксовані на всіх досліджуваних об'єктах (ВБ, С, М, К, КБ). Це природні височування вод, що пробиваються з порід переважно на урвистих берегах в каньйонах потоків, а також джерела, на яких провадиться активна господарська діяльність, через що їхні витoki зазнають постійного впливу людської діяльності, зокрема – розчищення.

Провідну роль у первинних актах туфонагромадження відіграють представники мікробіоти, головнo – ціанобактерії порядку Oscillatoriales, які утворюють глекку вохристу масу та нитчасті слизуваті обростання чорно-зеленого забарвлення за участі представників роду *Leptolyngbya* sp., *Lyngbya* sp. та *Phormidium* sp. (табл. 2).

Високий вміст заліза у воді досліджуваних джерел та сприятливі екологічні умови (помірно холодні води з нейтральною реакцією) обумовили тут активний розвиток колоній залізобактерій, які візуалізуються за гелеподібною субстанцією яскраво-червоного кольору, що рясно вкриває дно потоків та бетонні стінки каптажів. Колонії залізобактерій широко розповсюджені у природних і штучних водоймах, збагачених залізом. Відомо, що в екосистемах Північної півкулі вони зазвичай репрезентовані психро-мезофільним нейтрофільним комплексом SLG (Schmid et al., 2014), до складу

якого входять аеробні та мікроаеробні прісноводні бактерії родів *Sphaerotilus*, *Leptothrix*, *Gallionella* класу Betaproteobacteria (Spring, 2006).

Таблиця 2

**Туфотвірна біота травертинових джерел Міжгірської височини та прилеглих територій**

Форми туфоутворення	Група біоти	Представники (таксони / синтаксони)
		АКТИВНІ (ЕДИФІКАТОРИ)
Ініціальні утвори: Мікробіоліти (ВБ, С, М, К, КБ)	Cyanobacteria	Oscillatoriales: <i>Leptolyngbya</i> sp., <i>Lyngbya</i> sp., <i>Phormidium</i> sp.
	Betaproteobacteria	SLG ( <i>Sphaerotilus-Leptotrix-Gallionella</i> )
	Algae	Bacillariophyceae
Натічні сталактитоподібні (ВБ, КБ)	Cyanobacteria + Algae	CGA (Oscillatoriales + Chlorophyceae)
Бріоліти (К, КБ)	Bryobionta	<i>Pellion</i> : <i>Pellia</i> sp., <i>Cratoneuron</i> sp.
Комплексні (ВБ, С, К, КБ)	Tracheobionta + живі організми	ПАСИВНІ
		Деревні ( <i>Fagus sylvatica</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Salix</i> sp.) та трав'яні ( <i>Equisetum</i> sp., <i>Poa trivialis</i> ) рослини

Визначальною особливістю залізобактерій є їхня здатність до біологічного окиснення заліза (Fe (II)) та активне утворення на поверхні клітин капсул, рясно інкрустованих продуктами їхнього окиснення – бактеріогенним гідроксидом Fe(OH)<sub>2</sub>. Завдяки цьому водойми, колонізовані цими мікроорганізмами, набувають специфічного яскраво-червоного забарвлення та драглистої консистенції (Van Veen et al., 1978; Schmid et al., 2014). Заселяючи джерела гідрокарбонатно-кальцієвого складу, колонії SLG можуть опосередковано виступати в ролі біогенного агента ініціальних етапів туфогенезу шляхом осадження карбонатів на слизуватих капсулах. Відомо, що бактеріогенні гідроксиди заліза є ефективними природними сорбентами (Seder-Colomina et al., 2014), а відтак збільшують концентрацію іонів металів (Ca<sup>2+</sup>) та можуть сприяти зародженню центрів кристалізації та осадженню слабкорозчинних карбонатів *in situ*.

Ще однією групою мікробіоти, виявлених у досліджуваних джерелах, є діатомові мікроводорості (Bacillariophyceae), головно – представники родів *Navicula* та *Pinnularia*, які на загал широко поширені у різного роду мінеральних джерелах (Aude, 2020). Вони також належать до активних агентів біотуфогенезу, позаяк продукують слиз, який відіграє важливу роль як «біологічний клей» у процесі утворення ініціальних травертинових утворів шляхом захоплення та зв'язування зерен кальциту (Winsborough, 2000). Проте на досліджуваних локаціях ця група не досягала значного різноманіття та була представлена лише неспеціалізованими поширеними родами.

Отже, на ініціальній стадії формування травертинів провідну роль відіграють кальціфікуючі мікроорганізми – бактерії та водорості, які формують біоплівку на поверхні об'єктів, занурених у воду. В процесах біокальцифікації на досліджуваних джерелах домінують ціанобактерії. Як фотосинтезуючі організми, вони беруть активну участь у процесах поглинання CO<sub>2</sub> з води, ініціюючи випадання карбонатів з

розчину (Kamran et al., 2021). Також ціанобактерії стимулюють осадження карбонатів завдяки продукції позаклітинних полімерних речовин з негативним зарядом, які притягують катіони  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$ , сприяючи цим первинній седиментації солей (Turner & Jones, 2005).

Такі бактеріогенні ініціальні форми, що можна означити як первинні тромбоїди, представлені дрібно-, зрідка середньозернистими охристо-жовтими агрегатами сферичної форми, діаметром 0,5-2 мм, що активно нагромаджуються на виходах джерел. Ці «згустки» (мезоклоти) з часом нарастають та ущільнюються, формуючи слабкозцементовані тромболіти, які є скупченням окремих агрегатів разом із часточками піску, мулу, гірських порід, рослинних решток. Вони, як правило, посезонно перешаровані рештками рослин, головно – листям дерев. Такі комплексні структури утворюють біогерми в руслі потоків у вигляді дамб (висотою до 2-3 см), що оконтурюють численні мікротераси. Мікробіолітам притаманна шаруватість, яка відображає нерівномірність відкладання вапнякових туфів упродовж року. У тілі травертину нерідко можна спостерігати шари, рясно інкрустовані листям дерев – *Salix* sp. (С) або *Fagus sylvatica* L. та *Carpinus betulus* L. (ВБ).

Цікавим прикладом пролонгованої ініціальної стадії є джерела, розташовані у Міжгір'ї (М) та Соймах (С), де виходи джерел розташовані безпосередньо у прирусловій частині заплави Ріки. «Вічна молодість» травертинових утворів тут обумовлена регулярним затопленням повеневими та паводковими водами, які перешкоджають стабілізації умов туфонагромадження та переходу до наступних стадій.

Мохова рослинність, що формується на вогкому ґрунті по берегах потічків (ВБ, С), представлена безранговими угрупованнями союзу *Funarion hygrometricae* Nadac in Klika ex v. Hübschmann 1957. Тут трапляються невибагливі піонерні види *Marchantia polymorpha* L., *Funaria hygrometrica* Hedw., *Bryum argenteum* Hedw., *Ptychostomum imbricatum* (Müll.Hal.) Holyoak & N.Pedersen тощо, які не беруть активної участі у процесах туфонагромадження. Спеціалізовані мохоподібні на ініціальній стадії відсутні.

У межах однієї з ділянок (ВБ) зафіксований ще один різновид сучасного травертиноутворення – натічні форми світло-сірого забарвлення, що формуються у невеликому гроті у заглибині під терасою. Основою для таких сталактитоподібних утворень слугують травертини більш ранньої генерації. Натічні карбонати відкладаються не безпосередньо на травертинову основу, а на органічний матрикс, який вирізняється яскравим світло-зеленим забарвленням та репрезентований обростаннями нитчастих та кокоїдних кальцифільних зелених мікроводоростей (calcareous green algae) (Bruno, 2012) (табл. 2). Мікроплівка фотосинтезуючих організмів, насамперед – ціанобактерій порядку *Oscillatoriales*, на поверхні натічних форм створює сприятливі умови для процесів кальцифікації, які визначають темпи приросту сталактитів (Mules et al. 2007). На зламі «бурульок» можна спостерігати концентричні шари, в яких чергуються темні (рештки біоти) та світліші ділянки (кальцит). Ймовірно, товщина відкладів кожного шару лімітована прозорістю кальциту, що при потовщенні стає бар'єром для сонячного світла та перешкоджає нормальному розвитку організмів-фотосинтетиків. Згодом відбувається реколонізація поверхні мікроорганізмами та наростання нового мінерального шару. Живі колонії

нитчастих та кокоїдних форм у досліджуваних джерелах (**ВБ**) були знайдені під поверхнею кірки з напівпрозорих кальцитів товщиною до кількох мм.

Наступна пост-піонерна стадія (II), маркується за появою перших спеціалізованих мохоподібних. По ходу течії потоків (**М, К, КБ**) можна спостерігати численні точкові (крапельні та струменеві) височування озалізненних вод, приурочені до тріщинуватих порід у флішовій товщі, помітні за іржавим кольором. На їхніх виходах формуються натічні травертинові утворення у вигляді охристо-бурих кірок товщиною до 1-2 см, які швидко колонізують амфібійні кальцифільні мохоподібні, насамперед – маршанцієфіт *Pellia endiviifolia* (Dicks.), для якого властиве активне нестатеве розмноження за допомогою спеціальних лопатей – виростів талому, що легко відриваються течією, сприяючи його поширенню у нові локації.

На сухішому камінні поблизу потоків, у зоні утворення та досяжності бризок, розвивається піонерна кальцифільна рослинність союзу *Grimmaldion fragrantis* Šmarda et Nadač in Nadač et Šmarda 1944 за участі *B. argenteum*, *Ptychostomum funkii* (Schwägr.) J. R. Spence, *Tortula muralis* Hedw., *Tortula lanceola* R. H. Zander (**М**). Ці види також є ініціаторами заростання свіжих інактивованих (сухих) ділянок травертинових каскадів (**КБ**) (табл. 3).

Таблиця 3

**Бріобіота інактивованих травертинових масивів Міжгірської височини та прилеглих територій**

Форми туфоутворення	Стадія заростання	Представники (синтаксони / таксони)
Масив (тіло)	Піонерні ( <b>ВБ, М, КБ</b> ):	<b>Grimaldion:</b> <i>Barbula</i> sp., <i>Tortula</i> sp., <i>Bryum argenteum</i> , <i>Ptychostomum funkii</i>
	Стабілізовані ( <b>ВБ, К, КБ</b> ):	<b>Ctenidion:</b> <i>Marchantia quadrata</i> , <i>Plagiochila</i> sp., <i>Encalypta</i> sp., <i>Schistidium apocarpum</i> , <i>Didymodon</i> sp., <i>Tortella tortuosa</i>

Зазначимо, що рослинність згаданого типу не бере безпосередньої участі у процесах туфонагромадження, проте її осередки є «hot-spot» локусами для регіонального бріорізноманіття, позаяк карбонатні породи в зоні флішових Карпах є рідкісними та трапляються лише локально (Головченко, Кшановська, 2004).

Мохова стадія (III)

У формуванні туфових відкладів (**К, КБ**) активну участь бере мохова рослинність союзу *Pellion endiviifoliae* Bardat in. Bardat et al. 2004, мінералізовані дернини якої утворюють легкі, крихкі пористі бріоліти охристо-бурого забарвлення, у структурі яких виразно «читаються» залишки таломів маршанцієфітів *P. endiviifolia* та *Conocepalum conicum* (L.) Dumort. ex Cogn. Бріоліти зазвичай містять сезонні шари, рясно інкрустовані листям дерев, що ростуть поблизу джерела.

Отож, у квазіприродних та антропогенних джерелах з тривалим періодом пост-антропогенного самовідновлення, провідною групою біоти є мохоподібні. У досліджуваних джерелах вони репрезентовані союзом *Pellion*, в цілому характерним для травертинових джерел рівнинних та низькогірних (передгірських) областей

Європи (Boucard E., Ballaydier A., 2016). У досліджуваних джерелах мінералізовані рештки мохоподібних з часом формують потужні відклади травертинів товщиною понад 3 м (**КБ**). Виступаючи активним чинником біомінералізації, бріобіота жорстководних струмків відіграє важливу середовищевісну роль, утворюючи складну систему «прісноводних рифів» – біогерм, які є осередками існування багатьох живих організмів, насамперед – бентосних безхребетних (Dražina et al., 2013).

Мохова рослинність *Pellion* маркує раритетне оселище «7220: Petrifying springs with tufa formation», яке входить до європейського переліку рідкісних біотопів, пріоритетних для охорони (Bensettiti et al., 2002; NATURA 2000). Під одним з джерел (**К**) на мочаристій ділянці виявлено зарості гігантського хвоща *Equisetum telmatea* Ehrh., який є діагностичним видом для природних травертинових джерел Європи (Lyons & Kelly, 2016). Оселища туфогенних жорстководних джерел скрізь мають «точкове» поширення та вразливість до зовнішніх чинників, що і обумовлює їхню природоохоронну цінність (NATURA 2000).

Зазначимо, що мохова рослинність *Pellion* є досить вразливою до антропогенного втручання: спеціалізовані амфібійні обростання особливо залежать від субстрату, який вони створили, а саме – від мінералізованої основи своїх колоній. Знищення згромаджень (конгрегацій) бріолітів, яке нерідко можна спостерігати під час благоустрою загосподарьованих джерел, призводить до повернення екосистеми до ініціального етапу розвитку та його швидку реколонізацію представниками мікробіоти. Проте, як показує приклад джерела у Келечині (**К**), що було загосподарьовано понад 100 р. тому (мурована підпірна стінка з металевою трубою) природна мохова рослинність з часом відновлюється, якщо навантаження надалі є стабільно низьким.

Старі інактивовані ділянки, осушені понад 25-50 років тому через природні чи антропогенні причини (зменшення потужності водотоку чи штучне спрямлення річища), характеризуються умовами виростання, на загал притаманними вапняковим відслоненням різної генези. На них формуються малопотужні (до 10 см) ініціальні літикові калькарікові лептосоли (Lithic Calcaric Leptosols), а у разі періодичного затоплення паводковими водами – їхніх акрофлювиковий різновид (Lithic Calcaric Leptosols Akrofluvic).

Сухі травертинові відслонення (**К**, **КБ**) або їхні уламки (**ВБ**) заселяють раритетні для флішової зони Карпат кальцифільні угруповання союзу *Ctenidion mollusci* Stefureac 1941 за участі *Marchantia quadrata* Scop., *Plagiochila asplenioides* (L.) Dumort., *Encalypta streptocarpa* Hedw., *Fissidens dubius* P. Beauv., *Schistidium apocarpum* (Hedw.) Bruch & Schimp., *Didymodon vinealis* (Brid.) R. H. Zander, *Tortella tortuosa* (Hedw.) Limpr., *Homalothecium sericeum* (Hedw.) Schimp. (див. табл. 3). Вони в цілому є характерними для сухих травертинів Європи, як природних, так і антропогенних (Poronessi et al., 2020). Інактивовані ділянки травертинових масивів виступають локусами «hot spot» для поширення петрофільно-кальцифільної мохової рослинності *Ctenidion*, оскільки в межах досліджуваної території, як і у флішових Карпатах загалом, виходи карбонатних порід є рідкісними (Головченко, Кшановська, 2004). Не зважаючи на те, що обростання союзів *Grimaldion* та *Ctenidion* не беруть активної участі у процесах біомінералізації, вони є типовими компонентами рослинності інактивованих ділянок травертинових джерел та підвищують загальне біорізноманіття оселищ «7220» (Poronessi et al., 2020).



Судинні рослини, як правило, не беруть безпосередньої активної участі в утворенні травертинів, проте їх живі та відмерлі частини нерідко «вбудовуються» у відклади. Так, основою для утворення натічних форм на вертикальних ділянках каскадів часто стають гілки дерев, знесені потоком, на які наростають концентричні шари вапняного туфу. Обабіч струмків оселяються гідрофільні хвоці (*Equisetum telmatea*) (К) та злаки (*Poa trivialis* L.) (КБ), стебла яких, занурені у відклади травертину, показують високу швидкість осадження – до 4 см за вегетаційний сезон. Листя дерев, як вже згадувалось, утворює сезонні шари у товщі травертинового масиву. Отже, судинні відіграють лише пасивну, опосередковану роль органічної основи для біо- та хемогенної седиментації карбонатів, які осаджуються на рослинних рештках, що потрапили до водотоку. Конструктивно частини рослин, залучені до процесів туфоутворення можна поділити на дві групи:

- інкрустовані (від лат. «incrustare» – вкриватись корою), які формують сезонні шари на поверхні активних травертинів;
- імпринтовані (від лат. «imprimere» – опечатувати), які формують «стрижні» для шаруватих утворів, які наростають концентрично.

У досліджуваних джерелах перші представлені листям та плодами дерев, другі – гілками дерев та стеблами хвоців і злаків. Зазначимо, що такі утвори лише зрідка лишаються переважно хемогенними. Зазвичай, їхню поверхню успішно колонізують представники мікро- та бріобіоти, які утворюють складні, гетерогенно структуровані відклади-конгрегації (від лат. «congregatio» – об'єднання), нерідко з чергуванням абіо- та біогенних прошарків, репрезентованих мікро- або бріолітами.

### Висновки

У формуванні травертинів усіх обстежених локацій важливу роль відіграють представники мікро-, бріо та фітобіоти, а відтак, досліджувані травертини за своїм походженням є переважно біогенними. При цьому, участь живого в утворенні травертинів може бути як активною, так і пасивною (опосередкованою). Зокрема бактерії, водорості та мохоподібні є активними агентами туфогенезу, тоді як судинні рослини є лише пасивними продуцентами органічного матриксу. На початковому етапі формування травертинів провідну роль відіграє мікробіота, тоді як надалі основним травертиноформуючим агентом є амфібійна бріобіота.

Зважаючи на специфіку та цінність біотичної (кальцифільні мохоподібні) та і абіотичної – геологічної (озалізнені травертини) складової, жорстководні туфогенні джерела Міжгірської улоговини є цінними пам'ятками природи Закарпаття. Незважаючи на природоохоронний статус більшості досліджуваних джерел (гідрологічні пам'ятки природи місцевого значення), вони часто потерпають від стихійного облаштування, несанкціонованого відбору води, надмірного потоку рекреантів, а тому потребують підсилення заходів охорони.

- Білак С. 2018. Мінеральні води Закарпаття (хімічний склад, генезис, перспективи використання. Ужгород: «ФОП Сабов А.М.». 182 с.
- Борняк У., Рагуліна М., Орлов О. 2023. Систематизація та стислий огляд травертинових джерел Міжгірської верховини (Закарпатська область). *Проблеми геології України*: Зб. наук. праць за матеріалами XIV Всеукр. наук. конф. (5-6 жовтня 2023 р., Львів). С. 63–65.
- Борняк У.І., Рагуліна М.Є., Орлов О.Л. 2023. Травертини урочища Квас – перспективна пам'ятка природи Закарпатської області // XI наук.-практ. конф. «Мінерально-сировинні

- багатства України: шляхи оптимального використання» (6 жовтня 2023 р., Хорошів). Тези доповідей. С. 208–213.
- Головченко Д., Кшановська Т. Мінеральний склад та поширення карбонатних утворень кросненської світи Українських Карпат. *Мінералогічний збірник*. 2004. № 54, вип. 2. С. 230-234.
- Дідух Я.П., Чорней І.І., Буджак В.В. та ін. 2018. Рідкісний туфогенний біотоп у басейні Дністра. *Український ботанічний журнал*. Т. 75 № 2. С. 149–159.
- Кравчук Я. 2021. Рельєф Українських Карпат: Монографія. Львів: КНУ імені Івана Франка. 576 с.
- Лемко І. С., Фекийшгазі Б. М., Киртич Л. П. та ін. 2005. Мікроелементний склад мінеральних вод та медико-географічне районування Закарпаття. *Медична гідрологія та реабілітація*. Т. 3 № 2. С. 4–13.
- Матковський О., Білоніжка П., Возняк Д. та ін. 2014. Мінерали Українських Карпат. Процеси мінералоутворення. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка. 584 с.
- Орлов О.Л., Рагуліна М.Є., Дмитрук Р.Я., Борняк У.І., Омельчук О.С. 2023. Травертинові джерела східних околиць Львова – цінні об'єкти живої та неживої природи. Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. Вип. 1 (15). С. 133–153.
- Природно-заповідний фонд. URL:<https://ecozakarp.net.ua>
- Рагуліна М., Орлов О., Борняк У., Дмитрук Р., Кіт Л. 2023. Оселище вуглекислих залізистих травертинових джерел Міжгірської Верховини (Українські Карпати). Міжнар. наук.-практ. конф. «Навоколишнє середовище для майбутнього через наукову освіту» (1-2 червня 2023 р.). Збірник матеріалів. С. 125–128.
- Рагуліна М.Є., Орлов О.Л., Дмитрук Р.Я., Борняк У.І. 2023. Травертинові джерела Львівського Розточчя: ретроспектива та сучасний стан. *Наукові записки Державного природознавчого музею*. Вип. 39. С. 77–88.
- Сливка Р. 2001. Геоморфологія Вододільно-Верховинських Карпат. Львів: Вид-во ЛНУ імені Івана Франка. 152 с.
- Торохтін М.Д. 1987. Курортні фактори та перспективи їх використання. Природні багатства Закарпаття. Ужгород: Карпати. С. 239-258.
- Чомко Ф. В., Чомко Д. Ф., Удалов І. В. та ін. 2021. Загальна гідрогеологія: навч. посібник. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна. 196 с.
- Aude V., Voltaire O., Carlos W. et al. 2020. Biodiversity and ecology of diatoms in mineral springs of the area of Sainte Marguerite (Saint-Maurice-ès-Allier, Massif central, France). *BIOM - Revue scientifique pour la biodiversité du Massif central*. 1 (1). P. 21–34.
- Bardat J., Bioret F., Botineau M. et al. 2004. Prodrôme des végétations de France. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, FR. 171 p.
- Bardat J., Hauguel J-C. 2002. Synopsis bryosociologique pour la France. *Cryptogamie Bryologie*. Vol. 23. P. 279–343.
- Bensettiti F., Gaudillat V. & Hauray J. 2002. Cahiers d'habitats. Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 3. Habitats humides. Paris: La Documentation française. 457 p.
- Boucard E., Ballaydier A. 2016. Etude complémentaire et cartographie des sources pétrifiantes avec formation de travertins (Cratoneurion – code Natura 2000: \*7220) du site Natura 2000 FR4301334 : «Petite Montagne du Jura». Communauté de communes de la Petite Montagne. 40 p.
- Bruno G. 2012. The contribution of calcareous green algae to the production of limestones: A review. *Geodiversitas*. Vol. 34(1): P. 35–60.
- Della Porta G, Hoppert M, Hallmann C. et al. 2022. The influence of microbial mats on travertine precipitation in active hydrothermal systems (Central Italy). *Depositional Rec.* Vol. 8. P. 165–209.

- Dražina T., Špoljar M., Primc B., Habdija I. 2013. Small-scale patterns of meiofauna in a bryophyte covered tufa barrier (Plitvice Lakes, Croatia). *Limnologica*. Vol. 43 (6). P. 405–416.
- Farr G., Graham J. 2017. Survey, characterisation and condition assessment of Palustriella dominated springs 'H7220 Petrifying springs with tufa formation (Cratoneurion)' in Gloucestershire, England. British Geological Survey. 141 p.
- Guiry, M.D., Guiry, G.M. 2024. AlgaeBase. World-wide electronic publication, University of Galway. URL: <https://www.algaebase.org>
- Hodgetts N., Söderström L., Blockeel T. et al. 2020. An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus. *Journal of Bryology*. Vol. 42 (1). P. 1–116.
- Kamran A., Sauter K., Reimer A. et al. 2021. Cyanobacterial Mats in Calcite-Precipitating Serpentinite-Hosted Alkaline Springs of the Voltri Massif, Italy. *Microorganisms*. Vol. 9 (1). 62.
- Kanellopoulos C., Tomas C., Xirokostas N., Ariztegui D. 2019. Banded Iron Travertines at the Iliia Hot Spring (Greece): An interplay of biotic and abiotic factors leading to a modern Banded Iron Formation analog? *The Depositional Record*. 5. 10.1002/dep2.55.
- Kennard, J.M., James, N.P. 1986. Thrombolites and Stromatolites: Two Distinct Types of Microbial Structures. *PALAIOS*. Vol. 1 (5). P. 492–503.
- Lyons M.D., Kelly D.L. 2016. Monitoring guidelines for the assessment of petrifying springs in Ireland. *Irish Wildlife Manuals*. № 94. 73 p.
- Mulec, Janez et al. 2007. Algae promote growth of stalagmites and stalactites in karst caves (Škocjanske Jame, Slovenia). *Carbonates and Evaporites*. Vol. 22. P. 6–9.
- NATURA 2000. URL: <https://natura2000.eea.europa.eu>
- Parte A.C., Sardà Carbasse J., Meier-Kolthoff J.P. et al. 2020. List of Prokaryotic names with Standing in Nomenclature (LPSN) moves to the DSMZ. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 70. P. 5607–5612.
- Pentecost A., Viles H. 1994. A review and reassessment of travertine classification. *Géographie physique et Quaternaire*. Vol. 48 (3). P. 305–314.
- Plants of the World Online. POWO (2023). Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew.* URL: <http://www.plantsoftheworldonline.org/>
- Poponessi S., Aleffi M., Sabovljević M., Venanzoni R. 2020. Bryophyte diversity hotspot: the Marmore Waterfalls Regional Park (Umbria, central Italy). *Italian Botanist*. Vol. 10 (1). P. 33–45.
- Schmidt B., Sánchez L.A., Fretschner T. et al. 2014. Isolation of Sphaerotilus–Leptothrix strains from iron bacteria communities in Tierra del Fuego wetlands. *FEMS Microbiology Ecology*, Vol. 90 (2). P. 454–466.
- Seder-Colomina M., Morin G., Benzerara K. et al. 2014. Sphaerotilus natans, a Neutrophilic Iron-Related Sheath-Forming Bacterium: Perspectives for Metal Remediation Strategies. *Geomicrobiology Journal*. Vol. 31 (1). P. 64–75.
- Spring, S. 2006. The Genera *Leptothrix* and *Sphaerotilus*. *The Prokaryotes*. Springer, New York, NY. P. 758–777.
- Stanković I., Szabó B., Hauer T., Gligora Udovic M. 2023. Benthic Algae on Tufa Barriers. *Plitvice Lakes*. P. 189–214.
- Szilágyi I. 1876. Máramaros vármegye egyetemes leírása: a magyar orvosok és természetvizsgálók 1876-ban Szigeten tartott XIX-dik nagygyűlésének alkalmából. Budapest: Magyar Királyi Egyetemi Könyvnyomda. 516 p.
- Takashima, C., Kano, A., Naganuma, T., & Tazaki, K. 2008. Laminated iron texture by iron - oxidizing bacteria in a calcite travertine. *Geomicrobiology Journal*. Vol. 25(3–4). P. 193–202.
- Tan, B.C., Z. Iwatsuki. 1996. Hot spots of mosses in East Asia. *Anales Inst. Biol. Univ. Nac. Autón. México*, Ser. Bot. Vol. 67. P. 159–167.
- Turner, E.C., Jones B. 2005. Microscopic calcite dendrites in cold-water tufa: implications for nucleation of micrite and cement. *Sedimentology*. Vol. 52. P. 1043–1066.

- Van Veen W, Mulder E., Deinema M. 1978. The *Sphaerotilus-Leptothrix* group of bacteria. *Microbiol Rev.* Vol. 42 (2). P. 329–56.
- Westhoff V., Maarel E. 1973. The Braun-Blanquet approach. Handbook of vegetation science. Ordination and classification of vegetation. Hague. Vol. 5. P. 619–726.
- Wiesner I.F. 1935. Vodstvo a minerální prameny země Podkarpatoruské. Praha: Politika. 65 s.
- Winsborough, B.M. 2000. Diatoms and Benthic Microbial Carbonates. *Microbial Sediments*. Springer, Berlin, Heidelberg. P.758–777.

<sup>1</sup> Державний природознавчий музей НАН України, м. Львів  
e-mail: funaria@ukr.net, orlov0632306454@gmail.com

<sup>2</sup> Ужгородський національний університет  
e-mail: kschkirta@ukr.net

<sup>3</sup> Львівський національний університет ім. І. Франка  
e-mail: u.bornyak@ukr.net, kit.lyuba.lviv@gmail.com, r.ya.dmytruk@gmail.com

*Ragulina M., Orlov O., Goblyk K., Borniak U., Kit L., Dmytruk R.*

**Biotic agents of tufa formation in carbon dioxide enriched hard-water springs of Mizhhirya basin and adjacent territories**

*The main groups of biote and their functional role in the calcareous tufa formation at the hard-water springs enriched by carbon dioxide of the Mizhhirya basin and adjacent territories were investigated. It has been studied that in the formation of calcareous tufa of all surveyed locations, representatives of micro-, bryo and phytobiota play an important role, and therefore, the studied sedimentary rock are mainly biogenic in their origin. Microbiota agents, mainly cyanobacteria of the order Oscillatoriales, play a leading role in the initial acts of calcareous tufa accumulation (stage I). These bacteriogenic initial forms, which can be defined as initial thromboids, are represented by small- or medium-grained, ocher-yellow aggregates of a spherical shape, with a diameter of 0.5-2 mm, which actively accumulate at the springs exits. These congestions (mesoclots) are growing and compacting over time and forming weakly cemented thrombolites, which are a cluster of separate aggregates together with particles of sand, silt, rocks, plant remains, etc. The next post-pioneer stage (II) is marked by the appearance of specialized amphibious Bryophytes vegetation of the Pellion endiviifoliae alliance and pioneer caliciophilic vegetation of the Grimmaldion fragrantis alliance. In the formation of calcareous tufa deposits of the next stage (III), the leading role is played by the Bryophytes vegetation of the Pellion endiviifoliae alliance. Their mineralized turfs are modeling light, fragile and porous bryolithes of an ocher-brown color. Bryolithes usually contain seasonal layers richly encrusted with leaves of trees, which growing near the spring. Base on the specificity and ecological value of the biotic (calicolous Bryobiota) and abiotic, primarily geological (calcareous iron tufa) component, the hard-water tufagenic springs of Mizhhirya Verkhovyna can be considered significant natural monuments of Transcarpathia region. However, regardless of the nature protection status of most hard-water iron springs (they are hydrological monuments of nature of local importance), they often suffer from human's improvement, illegal water extraction, high recreational load etc. Thus, they need applying of conservation measures and nature protection management planning.*

**Keywords:** tufagenic biote, cyanobacterias, bryophytes, hard-water springs, calcareous tufa (travertines), rare habitats.