

Науковий вісник Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.
Серія: Сільськогосподарські науки

Scientific Messenger of Lviv National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.
Series: Agricultural sciences

ISSN 2519-2698 print
ISSN 2707-5834 online

doi: 10.32718/nvlvet-a9914
<https://nvlvet.com.ua/index.php/agriculture>

UDC 636.32/38:677.31:577.1

Sulfur and Cystine Content in Various Sheep Wool Breeds and Their Correlation with Wool Growth and Strength

V. M. Tkachuk¹, N. M. Ohorodnyk¹, N. R. Motko²✉

¹Lviv National University of Nature Conservation, Dubliany, Ukraine

²Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies Lviv, Ukraine

Article info

Received 04.08.2023

Received in revised form

04.09.2023

Accepted 05.09.2023

Tkachuk, V. M., Ohorodnyk, N. M., & Motko, N. R. (2023). Sulfur and Cystine Content in Various Sheep Wool Breeds and Their Correlation with Wool Growth and Strength. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural sciences, 25(99), 84–88. doi: 10.32718/nvlvet-a9914

Lviv National University of
Nature Conservation,
Volodymyra Velykoho Str., 1,
Dubliany, Lviv Region,
80831, Ukraine.

Stepan Gzhytskyi National
University of Veterinary Medicine
and Biotechnologies Lviv,
Pekarska Str., 50, Lviv,
79010, Ukraine.
Tel.: +38-097-579-20-55
E-mail: nataliamotko@ukr.net

This scholarly article presents a comprehensive analysis of sulfur and cystine content in the wool of various sheep breeds, with a particular focus on their relationship with wool growth and strength. The breeds under scrutiny include the Askanian fine-wool, Prekos, Latvian dark-headed, Ukrainian Carpathian mountain, and Karakul breeds. Our research revolves around wool samples extracted from the scapula area before the spring shearing process. Our findings reveal that the highest sulfur content is observed in the wool of Karakul sheep (3.05 %) and Prekos sheep (2.90 %), whereas the lowest sulfur content is noted in Latvian dark-headed sheep (2.65 %). Conversely, the highest cystine content is exhibited in the wool of Askanian fine-wool sheep (11.87 %) and Prekos sheep (11.46 %), while the lowest cystine content characterizes the wool of Karakul sheep (8.99 %) and the Latvian dark-headed breed (10.10 %). The genetic factors, specifically breed-specific characteristics, impact on the rate of wool growth. The most rapid growth rates are observed in Karakul sheep (873 mg/cm/day) and Askanian fine-wool sheep (857 mg/cm/day). Slightly lower growth rates are noted in Prekos breed sheep (844 mg/cm/day) and Ukrainian Carpathian mountain breed sheep (766 mg/cm/day). The lowest growth rates are recorded in Latvian dark-headed sheep (742 mg/cm/day). Furthermore, we establish that the highest tensile strength values are associated with the coarse wool of Karakul sheep (9.6 cN/tex) and the semi-coarse wool of Ukrainian Carpathian mountain sheep (9.3 cN/tex), as these fibers possess the thickest cuticular layer. Conversely, the lowest tensile strength values are observed in the wool of Latvian dark-headed sheep (7.0 cN/tex) and Prekos breed (7.1 cN/tex). An examination of the data reveals that there is no statistically significant correlation between the content of sulfur and cystine and the rate of wool growth. However, a robust direct correlational relationship is identified between the sulfur content and fiber strength (with correlation coefficients of $r = 0.831$ for Karakul breed sheep wool, 0.713 for Latvian dark-headed, 0.698 for Ukrainian Carpathian mountain, 0.544 for Askanian fine-wool, and 0.460 for Prekos breed wool).

Key words: Sheep breeds, Wool, Sulfur, Cystine, Wool growth, Tensile strength, Correlational relationship.

Вміст сульфуру та цистину у вовні різних порід овець і їх зв'язок з ростом вовни та її міцністю

V. M. Tkachuk¹, N. M. Ohorodnyk¹, N. R. Motko²✉

¹Львівський національний університет природокоористування, м. Дубляни, Україна

²Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, м. Львів, Україна

У статті наведено дані про особливості вмісту Сульфуру та цистину у вовні різних порід овець та їх зв'язок з ростом вовни і її міцністю. До уваги взяли такі породи: асканійську тонкорунну, прекос, латвійську темноголову, українську гірськокарпатську та каракульську. Об'єктом досліджень служила вовна, зразки якої відбирали з ділянки шкури за лопаткою перед весняною стрижкою. Показано, що найвищий вміст Сульфуру є у вовні каракульської породи (3,05 %) та породи прекос (2,90 %), а найнижчий — у латвійських темноголових овець (2,65 %). Натомість, найвищий вміст цистину зафіксовано у овець асканійської тонкорунної породи (11,87 %) та породи прекос (11,46 %), а найнижчим його вмістом характеризується вовна каракульських овець (8,99 %) та латвійської темноголової породи (10,10 %). Генетичні чинники, тобто породні особливості, впливають на темпи росту вовни. Найвищими вони є у каракульських овець (873 мг/см/добу) та овець асканійської тонкорунної породи (857 мг/см/добу). Децю нижчими в овець породи прекос (844 мг/см/добу) та української гірськокарпатської породи (766 мг/см/добу), а найнижчими — латвійських темноголових овець (742 мг/см/добу). Встановлено, що найвищі показники міцності на розрив характерні для грубої вовни каракульських (9,6 сН/текс) та напівгрубої українських гірськокарпатських овець (9,3 сН/текс), оскільки саме ці волокна характеризуються найтовстішим кутикулярним шаром. Натомість найнижчі показники міцності характерні для вовни овець латвійської темноголової породи (7,0 сН/текс) та прекос (7,1 сН/текс). У результаті аналізу отриманих даних між вмістом Сульфуру і цистину та інтенсивністю росту вовни не виявлено кореляційних зв'язків. Натомість між вмістом Сульфуру та міцністю волокон існує пряма корелятивна залежність ($r = 0,831$ для вовни каракульської породи овець, $0,713$ для латвійської темноголової, $0,698$ для української гірськокарпатської, $0,544$ для асканійської тонкорунної та $0,460$ для вовни овець породи прекос).

Ключові слова: породи овець, вовна, Сульфур, цистин, природи вовни, міцність, корелятивна залежність.

Вступ

Овеча вовна – це екологічно чистий матеріал, який, маючи унікальні фізико-хімічні властивості та широкі можливості поєднання з іншими волокнистими матеріалами, є цінною та незамінною сировиною для текстильної промисловості. Незамінність вовни зумовлена наявністю притаманного лише їй комплексу властивостей. Зокрема таких, як добрі санітарно-гігієнічні показники та тепловукоізоляція, легкість, м'якість, висока гігроскопічність, валкоздатність, здатність пропускати ультрафіолетові промені (Mureşan et al., 2020; Ibrahim et al., 2022).

Питання якості вовняної сировини і досі залишається актуальним, оскільки вона ще досить низька і не завжди задовольняє вимоги текстильної промисловості. Значна кількість вовни належить до дефектної (Tkachuk et al., 2014). Лише поліпшення її якості надасть змогу конкурувати вовні із синтетичними волокнами (Saha et al., 2019).

Грунтовні знання щодо структури вовни, її хімічного складу та фізичних властивостей слугуватиме базою для подальшого розширення й поглиблення цієї проблематики. Це збагатить теоретичну основу практичного вівчарства у плані повноцінної реалізації генетичного потенціалу овець у продукуванні більшої кількості високоякісної вовни (Rippon, 2003).

Чиста, суха і обезжирена (позбавлена домішок) вовна майже на 96 % складається з білка кератину й лише незначна кількість представлена небілковими компонентами. До них належать ліпіди, продукти вуглеводного та білкового обміну (сечова кислота, пурини, амінокислоти, сечовина, глікоген, лимонна кислота, феноли тощо), мінеральні елементи (Zhang & Fan, 2021; Wu & Irwin, 2018).

Кератин належить до нерозчинних протеїнів зі значним вмістом Сульфуру. Саме кератинове волокно складається з понад 170 білкових молекул з молекулярною масою від декількох тисяч до 100000 Да (Deb-Choudhury, 2018).

До складу кератину входить близько 20 амінокислот, з яких найбільший відсоток припадає на цистин, глютамінову та аспарагінову кислоти, серин, лейцин, аргінін. Різні групи білків кератину вовни, як і морфо-

структурні компоненти, істотно відрізняються за амінокислотним складом (Zahn et al., 2005).

На молекулярному рівні кератини відрізняються від інших структурних протеїнів високим рівнем дисульфідних зв'язків, які забезпечують утворення компактної тривимірної структури, стійкої до біологічної та хімічної деградації.

Зауважимо, що саме цистин у вовні поперечно зв'язує головні поліпептидні ланцюги, які з'єднані дисульфідними зв'язками. Ці зв'язки утворюються в процесі формування волокна на останній стадії кератинізації. З ними тісно пов'язані фізико-механічні властивості вовни, наприклад повна нерозчинність у воді, спиртї, розбавлених розчинах солей, лугів і кислот, органічних розчинників, стійкість до травних ферментів та особлива міцність і висока пружність волокон. Волокна є тим жорсткіші, чим частіше їх компоненти об'єднані в сітку за допомогою поперечних дисульфідних зв'язки між залишками амінокислоти цистеїну. Варто зауважити, що ці дисульфідні зв'язки можуть видозмінюватися, руйнуватися або зміцнюватися і викликати значні зміни хімічних і фізико-механічних властивостей волокна (Plowman et al., 2021).

Основну частину вовни (80 %), розчинену після попереднього окиснення або відновлення, можна розділити на дві групи білків: з великою молекулярною масою і низьким вмістом Сульфуру – фібрилярна структура та з меншою молекулярною масою і високим вмістом Сульфуру – глобулярна структура (Flanagan et al., 2002). Сульфур у вовні перебуває в складі різних сульфуровмісних сполук, але найбільша його кількість є у цистині (в середньому близько 75 %). Значно менший відсоток припадає на цистеїн, метіонін, лантіонін та цистеїнову кислоту. Отже, будь-яка зміна загального балансу Сульфуру вовни залежатиме, передусім, від цистину. Проте ймовірно, що перерозподіл інших сульфуровмісних сполук також матиме відповідний вплив. Ця регуляція відбувається під дією генетичних чинників (Chai et al., 2021).

До основних фізико-механічних показників вовни належать її міцність, довжина, тонина, звивистість, колір, блиск, пружність, еластичність і пластичність. Міцність вовни – це опір волокон на розрив. Вона залежить від хімічного складу і структури вовняного

волокна і тісно пов'язана з тониною. Зокрема, чим грубше волокно, тим більша його міцність (Stapaj et al., 2019). Від міцності залежить стійкість волокон при первинній обробці, а також тривалість використання готових виробів. Міцність вовни на розрив виражають в абсолютних і відносних показниках. Абсолютна міцність характеризується зусиллям, під дією якого волокно розривається, а відносна – величиною розривного зусилля, що припадає на одиницю площі поперечного перетину волокна. У процесі переробки вовни, починаючи з її миття, карбонізації, чесання, відбілювання тощо, міцність волокон зазвичай зменшується. На міцність вовни також впливають конституція тварини, її фізіологічний стан, індивідуальні властивості, умови годівлі та утримання (Starkova et al., 2022). Отже, вовна володіє цілим комплексом ознак, що характеризують її фізичні, а отже – й технологічні властивості.

Мета дослідження

Метою нашого дослідження було вивчення зв'язку росту вовни та її міцності з вмістом у ній Сульфуру і цистину у різних порід овець, зокрема прекос, асканійської тонкорунної, латвійської темноголової, української гірськокарпатської та каракульської.

Матеріал і методи досліджень

Експериментальна частина роботи виконана на вівцematках таких порід овець: асканійській тонкорунній, прекос, латвійській темноголової, українській гірськокарпатській та каракульській. Вівцematки породи прекос утримувалися у ННВЦ “Комарнівське” Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького, асканійської тонкорунної та каракульської порід належали дослідному господарству Інституту тваринництва степових районів ім. М. Ф. Іванова “Асканія-Нова”, вівцematки латвійської темноголової породи – господарству “Грядя”, тварини української гірськокарпатської породи (УГКП) – ФГ “Прометей” Коломийського району Івано-Франківської області.

Об'єктом біохімічних досліджень слугувала вовна, зразки якої відбирали з ділянки шкіри за лопаткою перед весняною стрижкою у чотирьох вівцematок з кожної породи. Перед дослідженнями вовну промивали в нейтральному миючому розчині при температурі 45–50 °С, ретельно ополіскували і висушували. Залишковий жир (віск) видаляли шляхом екстрагування взірців вовни в апараті Сокслетта чотирьохлористим вуглецем протягом 5 годин, а потім сумішшю спиртефіру.

Контроль за вовною продуктивністю досліджуваних тварин здійснювався шляхом обліку приросту волокон на обліковій площі шкіри розміром 100 см². Сульфур визначали за методом І. А. Макара та співавторів, який ґрунтується на нефелометрії сульфату барію, стабілізованого гліцерином (Makar et al., 1989). Вміст цистину – за методом Фоліна-Марензі у модифікації Г. Цана і К. Траумана, принцип якого полягає у тому, що гідролізат вовни з фосфо-9-вольфрамовою

кислотою дає синювате забарвлення, інтенсивність якого залежить від вмісту цистину у досліджуваній пробі (Zahn & Traumann, 1954). Міцність вовни на розрив досліджували за допомогою апарата ДШ–3М (Vlizlo et al., 2012).

Одержані цифрові дані опрацьовано статистично за допомогою програми Microsoft EXCEL.

Результати та їх обговорення

Синтез кератину невід'ємно пов'язаний з інтенсивним використанням сульфуровмісних сполук, головним чином амінокислоти цистеїну. Адже саме з двох молекул цистеїну складається цистин. Сполуки, в яких є –SH– групи, з одного боку – слугують пластичним матеріалом, а з іншого – визначають активність ензимів, які каталізують обмінні процеси у волосяних фолікулах. Сама кератинізація вовнового волокна супроводжується окисненням сульфгідрильних груп у дисульфідні зв'язки.

Будь-яка зміна кількості загального Сульфуру у вовни залежить передусім від вмісту цистину. Зі зниженням його вмісту зменшується і вміст Сульфуру. Дисульфідні зв'язки у вовні, з якими тісно пов'язані її фізико-механічні властивості, формуються поліпептидними ланцюгами за допомогою цистину (Zhang, & Fan, 2021).

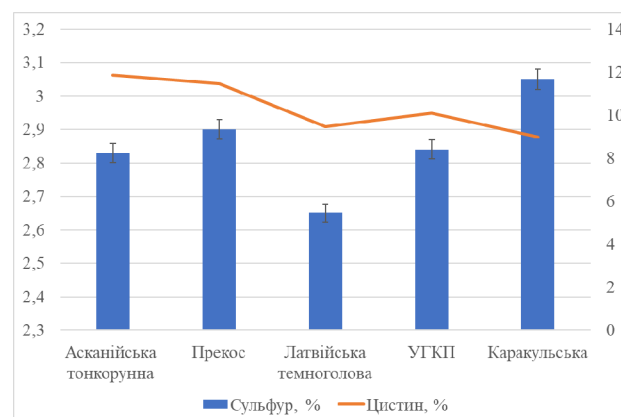


Рис. 1. Вміст Сульфуру та цистину у вовні різних порід овець

Результати досліджень насамперед засвідчили (рис. 1), що вміст у вовні Сульфуру та цистину значною мірою залежить від породи овець. Так, найвищий вміст Сульфуру виявили у овець каракульської породи (3,05 %) та породи прекос (2,90 %), а найнижчий – у латвійських темноголових овець (2,65 %). Натомість найвищий вміст цистину зафіксовано в овець асканійської тонкорунної породи (11,87 %) та породи прекос (11,46 %), а найнижчим його вмістом характеризується вовна каракульських овець (8,99 %) та овець латвійської темноголової породи (10,10 %). Ці особливості, очевидно, пов'язані з відмінностями у структурній організації вовни, оскільки, як відомо, каракульські вівці належать до грубововнових, українські гірськокарпатські – до напівгрубововнових, латвійські темноголові – до напівтонкорунних, а тварини аска-

нійської тонкорунної та породи прекос – до тонкорунних.

Встановлено, що генетичні чинники мали чіткий вплив на процеси росту вовни. Із даних **рис. 2** видно, що темпи росту вовни у тварин різних порід відрізнялись: найвищими вони виявилися у каракульських овець (873 мг/см/добу) та овець асканійської тонкорунної породи (857 мг/см/добу). Дещо нижча інтенсивність росту вовни спостерігалася у вівцематок породи прекос (844 мг/см/добу) та української гірськокарпатської породи (766 мг/см/добу), а найнижча була у латвійських темноголових овець (742 мг/см/добу).

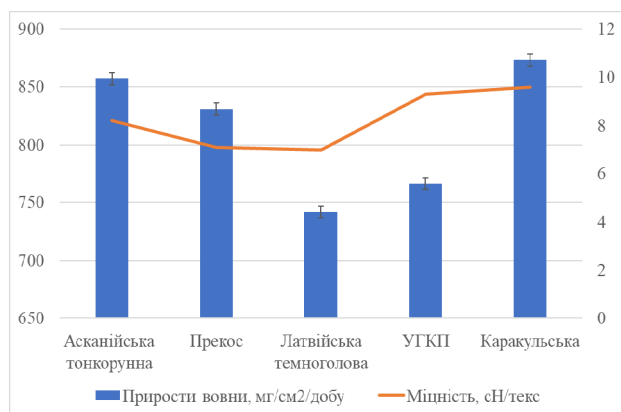


Рис. 2. Прирости вовни та показники її міцності у різних порід овець

Міцність вовни чи не найважливіший з фізичних показників, що характеризує її технологічні властивості. Від міцності залежить стійкість волокон при первинній обробці вовни, зносостійкість та тривалість використання готових виробів.

Як показали дослідження (**рис. 2**), міцність вовни насамперед залежить від породи овець, а саме типу

волокон. Зокрема, найвищими показниками міцності на розрив характеризується груба вовна каракульських (9,6 сН/текс) та напівгруба українських гірськокарпатських овець (9,3 сН/текс). І це закономірно, оскільки, як показано у наших попередніх дослідженнях, саме ці волокна характеризуються найвищими показниками вмісту кількості внутрішніх ліпідів та бетакератоли, тобто кутикулярного шару волоса (**Tkachuk & Staraj, 2014**). Натомість найнижчі показники міцності характерні для вовни овець латвійської темноголової породи (7,0 сН/текс) та прекос (7,1 сН/текс).

Результати досліджень фізичних властивостей вовни до певної міри віддзеркалюють особливості хімічного складу волокон, зокрема найвищі показники міцності вовни на розрив характерні для овець каракульської породи, і саме у цій вовні зафіксовано найвищий вміст Сульфуру. Натомість вовна латвійських темноголових овець, яка характеризується найнижчими показниками міцності, містить і найменшу кількість Сульфуру. Нагадаємо, що за міцність волокон відповідають дисульфідні зв'язки, які формуються саме за допомогою Сульфуру. Завдяки цим зв'язкам кератинові волокна також нерозчинні у воді та стійкіші до дії хімічних та фізичних чинників порівняно з іншими білками (**Deb-Choudhury et al., 2016**).

На жаль, у результаті аналізу отриманих даних (**табл. 1**) не виявлено зв'язків між вмістом у вовні Сульфуру та цистину з інтенсивністю росту вовни, натомість встановлено, що між вмістом Сульфуру та міцністю волокон існує пряма корелятивна залежність ($r = 0,831$ – для вовни каракульської породи овець, $0,713$ – для латвійської темноголової, $0,698$ – для української гірськокарпатської, $0,544$ – для асканійської тонкорунної та $0,460$ – для вовни овець породи прекос).

Таблиця 1

Взаємозв'язки між міцністю та інтенсивністю росту вовни і вмістом у ній Сульфуру та цистину

Показники	Порода овець				
	Асканійська тонкорунна	Прекос	Латвійська темноголовя	УГКП	Каракульська
	Міцність				
Сульфур	0,544	0,460	0,713	0,698	0,831
Цистин	-0,234	0,145	0,354	-0,701	0,102
	Інтенсивність росту вовни				
Сульфур	0,542	-0,147	0,502	0,311	0,298
Цистин	0,374	-0,762	-0,440	-0,165	0,274

Отже, ріст вовни овець, її міцність, вміст у ній Сульфуру та цистину значною мірою залежать від генетичних чинників, тобто породних особливостей тварин.

Висновки

1. Встановлено породні особливості росту вовни, її міцності, вмісту в ній Сульфуру та цистину. Показано, що найвищий вміст Сульфуру притаманний вовні каракульської породи та породи прекос, а найнижчий – латвійським темноголовим вівцям. Найвищий вміст цистину зафіксовано у вовні овець асканійської тон-

корунної породи та породи прекос, а найнижчий – у каракульських овець та латвійської темноголової породи.

2. Між вмістом Сульфуру та міцністю волокон існує пряма корелятивна залежність ($r = 0,831$ для вовни каракульської породи овець, $0,713$ для латвійської темноголової, $0,698$ для української гірськокарпатської, $0,544$ для асканійської тонкорунної та $0,460$ для вовни овець породи прекос).

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть спрямовані на охопленням більшої кількості порід овець різного напрямку продуктивності, а також впливу сезонних та годівельних чинни-

ків на формування фізико-хімічних властивостей вовняних волокон.

Відомості про конфлікт інтересів

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів у даній роботі.

References

- Chai, Y., Sun, Y., Liu, B., Guo, L., Liu, Z., Zhou, L., Dai, L., Jia, C., Zhang, W., & Li, C. (2021). Role of sulfur metabolism gene and high-sulfur gene expression in wool growth regulation in the cashmere goat. *Front Genet*, 12, 715526. DOI: 10.3389/fgene.2021.715526.
- Deb-Choudhury, S. (2018). Crosslinking between trichocyte keratins and keratin associated proteins. *Adv Exp Med Biol*, 1054, 173–183. DOI: 10.1007/978-981-10-8195-8_12.
- Deb-Choudhury, S., Plowman, J. E., & Harland, D. P. (2016). Isolation and analysis of keratins and keratin-associated proteins from hair and wool. *Methods Enzymol*, 568, 279–301. DOI: 10.1016/bs.mie.2015.07.018.
- Flanagan, L. M., Plowman, J. E., & Bryson W. G. (2002). The high sulphur proteins of wool: Towards an understanding of sheep breed diversity, 2(9), 1240–1246. DOI: 10.1002/1615-9861(200209)2:9<1240::AID-PROT1240>3.0.CO;2-#.
- Ibrahim, N. A., Amin, H. A., Abdel-Aziz, M. S., & Eid, B. M. (2022). A green approach for modification and functionalization of wool fabric using bio- and nano-technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24, 3287–3302. DOI: 10.1007/s10098-022-02385-z.
- Makar, I. A., Gumenyuk, V. V., Lukashevsky, Z. F., & Stapay, P. V. (1989). Study of Wool Formation Processes. Methodical recommendations. Lviv, 19–20 (in Ukrainian).
- Mureşan, S. I. B., Tiuc, A. E., Nemeş, O., Vermeşan H., & Vasile, O. (2020). Innovative use of sheep wool for obtaining materials with improved sound-absorbing properties. *Materials (Basel)*, 13(3), 694. DOI: 10.3390/ma13030694.
- Plowman, J. E., Miller, R. E., Thomas, A., Grosvenor, A. J., Harland, D. P., & Deb-Choudhury, S. (2021). A detailed mapping of the readily accessible disulphide bonds in the cortex of wool fibres. *Proteins*, 89(6), 708–720. DOI: 10.1002/prot.26053.
- Rippon, J. A. (2003). *Wool. Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. New York: Interscience.
- Saha, S., Arshad, M., Zubair, M., & Ullah, A. (2019). Keratins as Biopolymer. In: *Keratin as a Protein Biopolymer*. Springer, Cham, 163–185. DOI: 10.1007/978-3-030-02901-2_6.
- Stapaj, P. V., Tkachuk, V. M., Sedilo, G. M., & Ogorodnik, N. Z. (2019). Lipidi shkiri ta vovni ovec', ih rol' u procesah vovnoutvorennja i zberezheni prirodnih vlastivostej volokon. L'viv: Bona (in Ukrainian).
- Starkova, O., Sabalina, A., Voikiva, V., & Osite, A. (2022). Environmental effects on strength and failure strain distributions of sheep wool fibers. *Polymers (Basel)*, 14(13), 2651. DOI: 10.3390/polym14132651.
- Tkachuk, V. M., & Stapaj, P. V. (2014). Porivnialna kharakterystyka makrostruktury, khimichnoho skladu ta fizychnykh pokaznykiv vovni ovets riznykh porid. *Biologija tvaryn*, 16(4), 166–170 (in Ukrainian).
- Tkachuk, V. M., Havrylyak, V. V., Stapay, P. V., & Sedilo, H. M. (2014). Internal lipids of felted, yellowed and pathologically thin wool. *Ukr Biochem J*, 86(1), 131–138. DOI: 10.15407/ubj86.01.131.
- Vlizlo, V. V., Fedoruk, R. S., Ratych, I. B. et al. (2012). Laboratory methods of investigation in biology, stock-breeding and veterinary. Lviv (in Ukrainian).
- Wu, D. D., & Irwin, D. M. (2018). Evolution of trichocyte keratin associated proteins. *Adv Exp Med Biol*, 1054, 47–56. DOI: 10.1007/978-981-10-8195-8_5.
- Zahn, H., & Traumann, K. (1954). Zur Cystinanalyse von Wolle, Arbeitsvorschriften und Anwendungsbeispiele. *Melliand Textilber*, 35, 1069–1973.
- Zahn, H., Wortmann, F.-J., Wortmann, G. et al. (2005). *Wool*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Zhang, W., & Fan, Y. (2021). Structure of keratin. *Methods Mol Biol*, 2347, 41–53. DOI: 10.1007/978-1-0716-1574-4_5.