

Використання ентропійно-інформаційного аналізу для оцінки молочної продуктивності корів чорно-рябої молочної породи в залежності від їх лінійної приналежності

Анотація. В сучасних реаліях важливе місце для ефективного ведення галузі скотарства є вірно здійснений селекційно-племінний процес з відбором корів, які відмічаються найвищими показниками сукупності продуктивних якостей. В даному випадку застосування ентропійно-інформаційного аналізу є одним із найбільш доцільних, оскільки дає можливість оцінити господарсько-корисні якості тварин максимально повно. Мета дослідження полягає в оцінці та аналізу міри організованості біологічної системи продуктивних ознак молочної худоби під впливом спадкових факторів таких як вік та походження корів. В ході дослідження використовувалися загальноприйняті в зоотехнії методики та методи з використанням інформаційно-ентропійного аналізу, які адаптовані та модифіковані у тваринництві. Одержані дані з проведення ентропійно-інформаційного аналізу демонструють, що для великої рогатої худоби чорно-рябої породи різної лінійної належності рівень організованості систем коливається – R від 0,009 до 1,341 біт. При чому, найбільш стабільною ознакою з точки зору мінливості виявився вміст жиру в молоці, рівень безумовної ентропії у розрізі лактацій дорівнював 3,333-4,550 біт, що вказує на менший вплив дезорганізованих факторів на рівень прояву даної ознаки, а більшу її залежність від спадкових чинників, тобто походження. Хоча в цілому достовірного впливу лінійної належності корів на показники безумовної ентропії та організованості системи не встановлено, але спостерігався вплив вікового фактору на показники ентропії. Таким чином, досліджуване поголів'я за основними селекційними ознаками, за виключенням вмісту жиру в молоці, не характеризується одноманітністю та консолідованістю, що вказує на широкий діапазон мінливості і слугує пластичним матеріалом як для селекційно-племінної роботи так і для підвищення рівня молочної продуктивності. Тож, використання емпіричних даних теорії інформації може бути своєрідним маркером при прогнозуванні спадкових ознак тієї чи іншої продуктивності, оскільки, ентропійно-інформаційний аналіз надає більш ширші та глибші значення мінливості ознаки

Ключові слова: теорія інформації; надій; вміст жиру в молоці; ентропія; організованість системи; міра хаосу

Вступ

Використання ентропійно-інформаційного аналізу (EIA) з 2000-х років приваблює все більше уваги у різних напрямках наукової практики, багато публікацій можна знайти з біології, фізіології, медицини, а з 2018 року широко почали використовувати моделювання та аналіз селекційних процесів з використанням теорії інформації і у тваринництві (Machado *et al.*, 2020; Chanda *et al.*, 2020; Mueller *et al.*, 2021).

Моделювання процесів розвитку системи стає можливим саме за рахунок дослідження механізму передачі інформації, що в свою чергу з урахуванням ступеня організованості, упорядкованості та ускладнення пояснює суть механізму прогресу систем (de Andrade *et al.*, 2022; Fuentes *et al.*, 2022).

Метод ентропійного аналізу дозволяє підвищити рівень досліджень різних показників господарсько-корисних ознак. При аналізі залежностей між ентропією номінальних ознак та його виразності, взаємна інформація природної описової статистики відповідає законам теорії інформації (Karatieieva *et al.*, 2021).

Ентропія як логарифмічна міра безладдя, характеризує середню ступінь невизначеності стану джерела повідомлення. Ступінь невизначеності в інформаційних системах зменшується за рахунок прийнятої інформації, тому в числовому значенні ентропія дорівнює кількості

інформації, тобто виступає кількісною мірою інформації. Ентропії притаманні і властивість адитивності, оскільки загальна ентропія декількох об'єктів дорівнює сумі ентропійних явищ окремо взятих об'єктів (Pidpala *et al.*, 2018).

У сільському господарстві методи математичного моделювання активно застосовуються для вирішення наступних завдань: складання оптимальних раціонів годівлі тварин, визначення статевозрілої структури стада, складання оптимальних термінів вакцинації тварин, складання лактаційних кривих надоїв та інше. Однак для скотарства вони несуть дещо інший характер, це пов'язано з тим, що однією з найважливіших складових для цих тварин є комплексна оцінка великої рогатої худоби, для подальшого їх використання в селекційно-племінному процесі, і одним із передових методів виступає саме метод математичного моделювання (Kramarenko *et al.* 2019).

Використання методу ентропійного аналізу дозволяє виявити природно-екологічні наслідки, які значно впливають на селекційні та продуктивні ознаки, а також підібрати для розведення, з точки зору селекції, найбільш сумісні пари та елюмінувати із селекційного процесу незадовільних тварин, що не відповідають вимогам (Fuentes *et al.*, 2022). Тому метою досліджень було використання теорії інформації, як додаткової моделі для оцінки молочної продуктивності корів, визначення організованості системи, як показника селекційного потенціалу даного стада.

Огляд літератури

Перші роботи з теорії інформації почали з'являтися в математиці та інформатиці. Так, американський математик С. Shannon (1948), є засновником математичної теорії інформації, і в своїх дослідженнях, поняття ентропії використовував при створенні «кодів стійких до перешкод» та для встановлення критичної швидкості при передачі інформації. Цей підхід, з використанням статистичної термодинаміки та ймовірнісної функції ентропії виявився доречним і в біологічних науках (de Andrade *et al.*, 2022).

Поняття ентропії для розуміння біологічних систем вперше застосував Е. Schrödinger (1944a), використавши при цьому явища життя, окремі біологічні процеси та навіть життєдіяльність людини. Пізніше продовжив його дослідження М. Delbrück, (1962) взявши за основу природу міжмолекулярних сил, що спостерігаються у біологічних процесах.

T.P. Knowles *et al.* (2007) за використання ентропійного аналізу з'ясували молекулярне походження властивостей матеріалу фібрил і показали, що основний внесок у їх жорсткість походить від загальної мережі водневих зв'язків між кістяками, яка модулюється різними взаємодіями бічних ланцюгів.

Отже, ймовірнісна функція ентропії дозволяє досліджувати усі етапи переходу біологічної системи від максимальної дезорганізованості, тобто, стану повного хаосу, для якого притаманне рівне значення ймовірностей та максимально можливе значення самої ентропії, до стану максимально допустимої впорядкованості системи, при якому спостерігався би єдиний можливий стан сегментів біологічної системи (Landete-Castillejos & Gallego, 2000; Gray, 2011).

Багато вчених розглядають живий організм, з точки зору ентропії, як складну відкриту систему в якій відбуваються фізико-хімічні процеси, що перебуває в дезорганізованому, нестационарному стані (Gray, 2011; Pidpala *et al.*, 2018; Kramarenko *et al.*, 2019)

Тому процес моделювання в біології за своїми характеристиками унікальний і водночас досить складний, він нерозривно пов'язаний з такими елементами, як: гіпотеза, абстракція, аналогія та інші. Цей метод розглядається як процес побудови, вивчення та застосування математичних моделей. Якщо такий аналіз не буде проведено, відбуватиметься значне зниження показників розвитку тваринництва (Lemaу *et al.*, 2009; Mueller *et al.*, 2021).

Оскільки у живих організмах всі процеси обміну збалансовані, це викликає зниження ентропії і сприяє максимальній організації всієї біологічної системи. Тому завдяки ентропійному аналізу можна надати характеристику життєдіяльності біологічної системи чи її елемента. Яка не обмежується простим набором хіміко-фізичних, мікробіологічних, фізіологічних процесів, а їй притаманний ряд інших складних процесів саморегуляції. Що

наведено в дослідженнях різних вчених (Erill, 2012; Ritchie & Van Steen, 2018; Fuentes *et al.*, 2022).

P.T. Krishnan *et al.* (2020) за допомогою інтропійно-інформаційного аналізу встановили декілька кореляцій між диференціально експресованими генами та порушеннями психічних розладів. Автори використали підхід, ентропії Cell Signaling Network, який складався з ймовірності взаємодії генів за допомогою кількісного визначення матричної РНК (рибонуклеїнова кислота), розраховуючи поширення сигналу всередині мережі. Отримані дані, демонстрували зміну виразу генів у розладах. Однак ентропія стільникової мережі сигналізації в кожній патології не показала відмінностей порівняно з відповідними контрольними значеннями. Для порівняння, клітини-попередники, стовбурові клітини та пухлинні клітини показали велику ентропію, тобто менше інформації у передачі сигналів клітини. Таким чином, автор дійшов висновку, що порушення змінює клітинну передачу сигналів у периферичних тканинах, але підтримує диференціювання клітин та кількість інформації (Krishnan *et al.*, 2020).

Подібні дослідження були проведені М.М. Breve *et al.* (2022), засновані на максимальній ентропії та використанні ознак, витягнутих із графіків, для класифікації послідовностей мРНК та нкРНК. Результати показали адекватність запропонованої методології, досягнення більш високої точності, ніж у дослідженнях з використанням варіаційної статистики. Крім того, запропонований метод виконував класифікацію з меншим часом обробки, що вказує на зниження складності за збереження впевненості в класифікації.

Метод, заснований на ентропії, більш потужний, ніж звичайні методи, і може бути корисним для виявлення епістазу рідкісних генів, у тому числі і у тваринництві (Schrödinger, 1944b; Nezhlukchenko, 1999; Pidpala *et al.*, 2018).

Китайські вчені S. Liu *et al.* (2023) використали комбінацію гіперспектральної візуалізації та методу ентропії для комплексної оцінки активності антиоксидантних ферментів у танової баранини. Проведені дослідження вказують, що ентропійний аналіз може мати великий потенціал для майбутніх досліджень різних ферментів у м'ясі.

Таким чином, застосування методик ентропійного аналізу та теорії інформації в селекційній роботі з молочною худобою надасть більш поглиблені знання та сформує уявлення біологічної системи з точки зору мінливості за показниками оцінки, заснованої на критеріях фізіологічних факторів, генетичних факторів та факторів навколишнього середовища, які впливають на дану біологічну систему.

Матеріали і методи

Дослідження проводилися на базі сільськогосподарського виробничого кооперативу «Агрофірма «Миг-Сервіс-Агро» Миколаївської області, Україна, в період 2019-2021 рр. Для дослідження в експерименті було використано ентропійно-інформаційний аналіз молочної продуктивності корів чорно-рябої молочної породи залежно від їх лінійної належності, які походять від трьох бугаїв плідників – Чемпіона, Драгуна та Голіафа.

На першому етапі досліджень для досконалої характеристики молочної продуктивності тварин було здійснено біометричну обробку вихідної інформації методами варіаційної статистики, та використано методик N.A. Plokhinsky (1964). Далі було проведено ентропійно-інформаційний аналіз ознак молочної продуктивності (у перерахунку на 305 дн. першої, другої, третьої і вищої лактацій у корів користуючись при цьому методикою K. Shannon (1983) в модифікованому варіанті O.S. Kramarenko *et al.* (2019). Опираючись на рекомендації Yu.G. Antamonov (1977) було проведено класифікацію біологічних систем.

Внутрішньо-популяційну величину безумовної ентропії кількісних ознак було визначено користуючись формулою:

$$H = - \sum_{i=1}^k (p_i \cdot \log_2 \cdot p_i), \quad (1)$$

де H – ентропія конкретної статистичної системи; p_i – ймовірність (або частота) варіювання ознаки по градаціях варіаційного ряду; k – кількість можливих варіантів системи (ознаки).

Для даного етапу системи на максимально можливому рівні теоретично визначену ентропію було розраховано за формулою:

$$H_{max} = \log_2 \cdot k, \quad (2)$$

де H_{max} – максимальна невизначеність системи або міра складності; k – максимальне число становищ системи ознаки.

Рівень абсолютної організованості системи було визначено за формулою:

$$O = H_{max} - H, \quad (3)$$

Відносну організованість системи, та її рівень було обрховано за формулою:

$$R = 1 - H \div H, \quad (4)$$

Саме коли рівень ентропії дорівнює нулю, системі притаманний найвищий рівень організованості. У детермінованих систем значення відносної ентропії сягає найвищого значення і досягає одиниці. Показник $R=0$ зустрічається у повністю дезорганізованих системах.

При дослідженні, автори використовували вказівки ARRIVE (n.d.) як контрольний список та дотримувалися всіх відповідних етичних норм.

Результати і обговорення

Використання показників різноманітності має довгу історію в популяційній екології, у той час як у популяційній генетиці натомість переважали показники, засновані на дисперсії, що є технічною прогалиною, яка уповільнює селекційний прогрес стада чи породи. Використовуючи ентропію в селекційній роботі, на відміну від дисперсії, спочатку створюється модель безперервного хаотичного розмаїття, а потім будується багаторазово вкладений поділ різноманітності алелів, особин, популяцій і видів, кожен компонент якого демонструє поведінку відповідних метрик різноманітності, а потім переводяться ці компоненти в масштабовану форму організації системи (Shannon, 1948). При цьому, також використовуються непараметричні статистичні тести компонентів усередині популяції, породи чи стада, та нові тести однорідності компонентів різноманітності усередині популяції на будь-якому ієрархічному рівні (Schrödinger, 1944a; Narinc *et al.*, 2013; Liu *et al.* 2023).

Розрахунки, які були виконані, встановили, що межі відносної організованості біосистеми для корів лінії Чемпіона (Табл. 1) за перші три та вищу лактації становили $R=0,027-0,679$. В зміні рівня молочної продуктивності в проведеному дослідженні вік корів не був значною рушійною силою, тому це значення носило досить коливальний характер. Значні показники значення безумовної ентропії – $H=3,612$ біт, спостерігалися в першу лактацію. Рівень безумовної ентропії по другій лактації знизив своє значення до $1,688$ біт, проте знову піднявся за третьої лактації – до $3,429$ біт, також, показала тенденцію до спаду вища лактація – $H=1,067$ біт, що вказує на рівень зменшення ентропії, а відповідно система стає більш упорядкованою.

Досліджуючи вміст жиру в молоці, ситуація характеризувалась значною стабільністю, так рівень безумовної ентропії в першій лактації дорівнював $H=4,222$ біт, за другої дещо знизився – $3,333$ біт, дані протяжністю з третьої по вищу лактації були тотожними – $H=4,550$ біт.

Кількість молочного жиру, що також підпадала під дослідження, не показала значного прояву безумовної ентропії і його позитивної кореляції з віком тварин.

Якщо аналізувати рівень відносної дезорганізованості системи (R), то слід відмітити, що за класифікацією Yu. Antamonov (1977), дана біологічна система ні за віком, ні за ознаками продуктивності не мала сталого характеру і у більшості випадків відносилася до стохастичної (R=0,003-0,088 біт) чи квазідетермінованої (R=0,158-0,271 біт) системи, лише повна дезорганізація системи відмічалася за надром у віці другої та вищої лактації (R=0,492-0,679 біт). В той час анентропія незалежно від віку та ознаки продуктивності набувала негативних значень, що відображає більш високий ступінь диференціації та неоднорідності даної біологічної системи (A=-3,740- -4,080 біт).

Table 1. ЕІА молочної продуктивності чорно-рябої молочної породи лінії Чемпіона

Ознака	n	Параметри ентропійно-інформаційного аналізу ознаки				
		H±SE _H	H _{max}	O	R	A
перша лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	3,615±0,452	3,322	0,293	0,088	-3,939
Вміст жиру в молоці, %	20	4,222±0,444	3,322	0,900	0,271	-3,935
Кількість молочного жиру, кг	20	3,846±0,512	3,322	0,524	0,158	-3,980
друга лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	1,688±0,048	3,322	1,634	0,492	-3,780
Вміст жиру в молоці, %	20	3,333±0,319	3,322	0,011	0,003	-3,897
Кількість молочного жиру, кг	20	2,063±0,095	3,322	1,259	0,379	-3,839
третя лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	3,429±0,371	3,322	0,107	0,032	-3,939
Вміст жиру в молоці, %	20	4,550±0,487	3,322	1,228	0,370	-3,747
Кількість молочного жиру, кг	20	3,231±0,347	3,322	0,091	0,027	-3,797
вища лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	1,067±0,002	3,322	2,255	0,679	-3,780
Вміст жиру в молоці, %	20	4,550±0,487	3,322	1,228	0,370	-3,747
Кількість молочного жиру, кг	20	3,563±0,358	3,322	0,241	0,072	-4,080

Примітки: n – кількість тварин, які підлягали дослідженню

Джерело: авторська розробка

Проводячи ентропійно-інформаційний аналіз для корів лінії Драгуна (Табл. 2), слід відмітити, що за рівнем надром показник максимально можливої ентропії досяг H_{max}=3,322 біт. А максимального значення безумовної ентропії надій набув за третю лактацію – зі значенням H=3,133 біт.

Table 2. ЕІА молочної продуктивності корів чорно-рябої породи лінії Драгуна

Ознака	n	Параметри ентропійно-інформаційного аналізу ознаки				
		H±SE _H	H _{max}	O	R	A
перша лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	2,000±0,101	3,322	1,322	0,398	-3,839
Вміст жиру в молоці, %	20	2,647±0,174	3,322	0,675	0,203	-3,971
Кількість молочного жиру, кг	20	1,000±0,008	3,322	2,322	0,699	-3,622
друга лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	3,059±0,234	3,322	0,263	0,079	-3,997
Вміст жиру в молоці, %	20	3,813±0,413	3,322	0,491	0,148	-4,030
Кількість молочного жиру, кг	20	2,067±0,097	3,322	1,255	0,378	-3,822
третя лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	3,133±0,280	3,322	0,189	0,057	-3,922
Вміст жиру в молоці, %	20	1,133±0,012	3,322	4,455	1,341	-3,522
Кількість молочного жиру, кг	20	2,000±0,079	3,322	1,322	0,398	-3,839
вища лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	2,563±0,168	3,322	0,759	0,229	-3,813
Вміст жиру в молоці, %	20	2,286±0,138	3,322	1,036	0,312	-3,780

Кількість молочного жиру, кг	20	2,813±0,205	3,322	0,509	0,153	3,839
------------------------------	----	-------------	-------	-------	-------	-------

Примітки: n – кількість тварин, які підлягали дослідженню

Джерело: авторська розробка

Детальніше порівнявши показники першої та другої лактацій, можна помітити, що рівень ентропії знижувався від $H=3,059$ до $H=2,000$ біт. Рівень відносної та абсолютної організованості ознаки за надоєм виявив чітке домінування за першу лактацію, для якої їх значення становили – $O=1,322$; $R=0,398$ відповідно. При цьому рівень безумовної ентропії для вищої лактації досяг значення в $H=2,563$ біт. Корови лінії Драгуна за надоєм характеризувалися як складно-стахастичні системи ($R=0,0179-0,148$ біт.), але за другу та вищу лактації вони були простими-квазідетермінованими системами ($R=0,229-0,398$ біт).

За вмістом жиру в молоці рівень організованості системи порівняно зі значенням надою мав вищі показники і сягав за другу і третю лактації – $O=0,491$ та $O=4,455$ біт відповідно. А це в свою чергу автоматично знизило рівень безумовної ентропії від $H=3,813$ біт до $H=1,133$ біт.

Досліджуючи кількість молочного жиру в молоці відмічалась схильність до підвищення значення безумовної ентропії. Так, за першу лактацію її показник становив $H=1,000$ біт, а за вищу $H=2,813$ біт. Що сприяло зниженню з віком показника умовної організованості системи – від $O=2,322$ біт за першу лактацію до $O=0,509$ біт за вищу лактацію. Відповідно відбувалося зниженні показника відносної організації системи. Так, рівень відносної ентропії за першу лактацію становив $R=0,699$ біт, що характеризувало дане стадо як дезорганізовану систему. В той час коли, з віком відмічалася тенденція до зниження даного параметра: $R=0,378$ біт друга лактація та $R=0,153$ біт вища лактація. Що сприяло і поступовій впорядкованості системи і переводило тварин із хаотичної повністю дезорганізованої системи, спочатку в казідетерміновану систему ($R=0,378$ біт) – друга лактація, а потім і в детерміновану впорядковану систему ($R=0,153$ біт) – вища лактація.

В межах допустимих значень відмічалися показники анентропії від $A=-3,522$ біт до $A=-4,030$ біт, незалежно від віку тварин та селекційної ознаки спостерігалися від'ємні її значення. Аналогічна тенденція відмічається при характеристиці ентропії селекційних та продуктивних ознак корів лінії Голяфа (Табл. 3).

Table 3. ЕІА молочної продуктивності корів чорно-рябої породи лінії Голяфа

Ознака	n	Параметри ентропійно-інформаційного аналізу ознаки				
		$H \pm SE_H$	H_{max}	O	R	A
перша лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	3,125±0,256	3,322	0,197	0,059	-3,913
Вміст жиру в молоці, %	20	3,500±0,298	3,322	0,178	0,054	-3,954
Кількість молочного жиру, кг	20	3,438±0,322	3,322	0,116	0,035	-3,939
друга лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	1,867±0,072	3,322	1,455	0,438	-3,780
Вміст жиру в молоці, %	20	3,941±0,410	3,322	0,619	0,186	-4,013
Кількість молочного жиру, кг	20	2,867±0,221	3,322	0,455	0,137	-3,822
третя лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	3,250±0,279	3,322	0,072	0,022	-3,880
Вміст жиру в молоці, %	20	3,625±0,355	3,322	0,303	0,091	-3,803
Кількість молочного жиру, кг	20	2,267±0,118	3,322	1,055	0,318	-3,780
вища лактація						
Надій за 305 дн, кг	20	3,000±0,236	3,322	0,322	0,097	-3,813
Вміст жиру в молоці, %	20	1,667±0,055	3,322	1,655	0,498	-3,739
Кількість молочного жиру, кг	20	3,353±0,285	3,322	0,031	0,009	-3,913

Примітки: n – кількість тварин, які підлягали дослідженню

Джерело: авторська розробка

Характеристика надою корів у розрізі лактацій встановила хвилеподібне коливання ентропії з віком корів. Так, значне зниження показника рівня ентропії за надоем спостерігалось у віці першої та другої лактацій, і її рівень складав $H=3,125$ біт та $H=1,867$ біт відповідно. Під час третьої лактації відмічалось підвищення значення до $3,250$ біт, а за вищу лактацію її рівень знову знизився до $H=3,000$ біт.

Значення абсолютної організованості системи також характеризувалось достатньою відносністю, як і показник прояву попередньої ознаки мало хвилеподібну тенденцію. А саме, в першу лактацію абсолютна організованість системи становила $O=0,197$ біт, у віці другої лактації її значення підвищилось до $1,455$ біти і знову знизилось $O=0,072$ біт за третю лактацію, а у віці вищої лактації набуло максимального значення – $O=0,322$ біт. В той же час відносна її організація володіла іншими показниками і мала тенденцію до поступового зниження $R = 0,059-0,022$ біт, за виключенням другої лактації – $R = 0,438$ біт. Що характеризувало досліджені об'єкти в першому випадку як стохастичну детерміновану систему, а в другому як повністю дезорганізовану.

За рівнем безумовної ентропії вміст жиру в молоці з першої по третю лактації був відносно стійким – $H=3,500-3,941-3,625$ біт відповідно, і радикального зниження зазнав лише у віці вищої лактації – $H=1,667$ біт.

Слід відмітити що за вмістом жиру в молоці корови лінії Голіафа були простими стохастичними $R=0,054-0,186$ біт, за виключенням вищої лактації – $R=0,498$ біт, де досліджувані корови перетворилися в хаотичну систему, що може бути пов'язано з тим що вища лактація є достатньо суб'єктивним показником, оскільки до неї входять корови різного віку. Висока детермінація ознаки притаманна коровам в усі вікові періоди – відповідно $O=0,178$; $O=0,619$; $O=0,303$; $O=1,655$ біт. Також, слід зазначити, що ентропія полігенів, які відповідають за реалізацію ознаки вміст жиру в молоці з віком корів слабшає.

Серед досліджуваних тварин даної групи показник кількості молочного жиру відзначався досить стабільним рівнем безумовної ентропії $H=2,267-3,438$ біт. В цілому за кількістю молочного жиру корови лінії Голіафа у віці першої та вищої лактацій були виявлені, як складні стохастичні системи, а от у віці другої лактації – простими квазидетермінованими системами ($R=0,035$ біт; $R = 0,009$ біт та $R=0,137$ біт). Це підтверджує думку, що корови з віком можуть стійко і достатньо тривалий період часу зберігати високий потенціал продуктивності.

Схожими роботами також займалася низка вчених R. Fan *et al.* (2011), F.V. Lishout *et al.* (2013), M.D. Ritchie & K.V. Steen (2018), які використовували емпіричні дані із застосуванням ентропійного аналізу для виявлення взаємодій між генами та ознаками які вони зумовлюють.

Взаємозв'язок показників молочної продуктивності та генів асоційованих з нею досліджували H. Dehghanzadeh *et al.* (2020). В результаті досліджень з вивчення метаболічних шляхів генів на основі анотацій генів було виявлено, що запропонований метод кластеризації дає правильні, логічні та швидкі результати.

A. Vorowska *et al.* (2018) використовували теорію інформації як альтернативний статистичний підхід для виявлення ділянок геному та генів-кандидатів, пов'язаних з господарсько корисними ознаками худоби. Результати дослідження показали, що важливі ділянки геному та гени-кандидати, які визначають змінні якості сперми бугаїв, розташовані на кількох хромосомах. Вчені довели достовірність впливу Single Nucleotide Polymorphism (SNP) на деякі змінні якості сперми голштино-фризських бугаїв за допомогою ентропійного аналізу.

На основі ентропії, вченими O. Fukuda *et al.* (2013) була побудована модель нейронної мережі Radial basis function (RBF) для прогнозування живої маси свиней за параметрами зростання свиноматок породи Ландрас. Результати показали, що метод моделювання на основі нейронної мережі RBF з використанням ентропійного аналізу був ефективним способом побудови моделі прогнозування живої маси свиней. Ентропія усунула колінеарність незалежних змінних в аналізі лінійної регресії та дозволила спрогнозувати живу масу свиней краще, ніж модель лінійної регресії.

E. Karatieieva *et al.* (2021) підтвердили, що тварини з високим рівнем упорядкованості систем за живою масою, відповідно, матимуть високий рівень упорядкованості систем,

представлених основними показниками молочної продуктивності. Доцільність використання теорії інформації підтверджують і M.S. Kwon *et al.* (2014), та доводять, що використання ентропійного аналізу взаємодії генів (GGI) зможе розкрити велику частину незрозумілої успадкованості складних ознак.

Таким чином, отримані результати дають можливість стверджувати, що використання теорії інформації при селекційній роботі з тваринами може бути використане як додатковий показник їх оцінки за основними господарсько корисними ознаками, зокрема їх молочної продуктивності. Що дозволить отримати більш точну та повну оцінку та спрогнозувати їхню майбутню молочну продуктивність ще на ранніх етапах розвитку.

Висновки

Досліджено процеси, що мають вплив на міру детермінованості системи продуктивних якостей корів різної лінійної належності залежно від їх віку. Встановлено, що фактичний ступінь значень безумовної та умовної ентропії показує результат комбінативної мінливості між полігенами та ознаками, які вони контролюють, а зміна самих ознак в процесі онтогенезу є ефектом експресії генів та їх взаємодії з факторами середовища. Так, проведені розрахунки ентропійно-інформаційного аналізу, демонструють, що велика рогата худоба чорно-рябої породи, відносно значення організованості біологічних систем, які були представлені основними ознаками молочної продуктивності, не володіють однозначним рівнем прояву їх організації. Для досліджуваних корів спостерігалася хвилеподібна динаміка рівня безумовної ентропії, тобто вона за окремими ознаками такими, як надій та кількість молочного жиру, то зменшувалася, то збільшувалася. В той час коли за вмістом жиру в молоці відмічалася поступове зменшення рівня безумовної ентропії, що може бути викликано селекційно-племінною роботою та дією стабілізуючого відбору у стаді. При цьому не виявлено залежності між походженням корів та показниками їх упорядкованості чи дезорганізованості. Тобто ентропійний аналіз не підтвердив впливу спадкового фактору – походження корів на рівень їх організованості системи. Але в той час, досліджувані тварини за основними ознаками селекції, як в розрізі віку так і в розрізі лінійної належності не є однотипними та одноманітними і за ступенем організованості системи, відносяться до різних класифікаційних груп: стохастичні, квазидетерміновані, детерміновані, прості та складні, це вказує на високий ступінь мінливості в даному стаді. Що в свою чергу є добрим показником, оскільки досліджуване поголів'я має високий потенціал та резерв, як для підвищення рівня молочної продуктивності, так і для подальшої селекційної роботи з даним стадом. З метою всебічної оцінки даного стада, в подальшому, за допомогою ентропійно-інформаційного аналізу, планується дослідити вплив паратипових відтворювальних якостей, таких як вік першого осіменіння та сезон отелення, на показники молочної продуктивності, оскільки вони є суттєвими чинниками при формуванні селекційних ознак та мають вірогідний вплив на рівень продуктивних якостей.

Подяки

Автори дякують власнику, співробітникам приватного сільськогосподарського підприємства, де проводилися експериментальні дослідження «СВК «Агрофірма «Миг-Сервіс-Агро» Миколаївської області, Україна, в особі директора підприємства Сергія Іванова. Та співробітникам редакції за англійську редакцію рукопису.

Конфлікт інтересів

Немає.

References

- [1] Antamonov, Yu.G. (1977). *Modeling of biological system*. Kyiv: Naukova dumka.
- [2] ARRIVE Guidelines. (n.d.). Retrieved from <https://arriveguidelines.org/>.
- [3] Borowska, A., Szwaczkowski, T., Kamiński, S., Hering, D.M., Kordan, W., & Lecewicz, M. (2018). Identification of genome regions determining semen quality in Holstein-Friesian bulls using

- information theory. *Animal Reproduction Science*, 192, 206-215. [doi: 10.1016/j.anireprosci.2018.03.012](https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2018.03.012).
- [4] Breve, M.M., Pimenta-Zanon, M.H., & Lopes, F.M. (2022). BASiNETEntropy: An alignment-free method for classification of biological sequences through complex networks and entropy maximization. *arXiv:2203.15635*. [doi: 10.48550/arXiv.2203.15635](https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.15635).
- [5] Chanda, P., Costa, E., Hu, J., Sukumar, S., Van Hemert, J., & Walia, R. (2020). Information theory in computational biology: Where we stand today. *Entropy*, 22(6), 627. [doi: 10.3390/e22060627](https://doi.org/10.3390/e22060627).
- [6] de Andrade, E.C., Pinheiro, P.R., de Paula Barros, A.L.B., Nunes, L.C., Pinheiro, L.I.C.C., Pinheiro, P.G.C.D., & Filho, R.H. (2022). Towards machine learning algorithms in predicting the clinical evolution of patients diagnosed with COVID-19. *Applied Sciences*, 12(18), 8939. [doi: 10.3390/app12188939](https://doi.org/10.3390/app12188939).
- [7] Dehghanzadeh, H., Ghaderi-Zefrehei, M., Mirhoseini, S.Z., Esmailkhaniyan, S., Haruna, I. L., & Najafabadi, H.A. (2020). A new DNA sequence entropy-based Kullback-Leibler algorithm for gene clustering. *Journal of Applied Genetics*, 61, 231-238. [doi: 10.1007/s13353-020-00543-x](https://doi.org/10.1007/s13353-020-00543-x).
- [8] Delbrück, M. (1962). Knotting problems in biology. *Proceedings of Symposia in Applied Mathematics*, 14, 55-63. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/community.31022230>.
- [9] Erill, I. (2012). Information theory and biological sequences: Insights from an evolutionary perspective. In *Information Theory: New Research* (pp. 1-28). New York: Nova Science Publishers.
- [10] Fan, R., Zhong, M., Wang, S., Zhang, Y., Andrew, A., Karagas, M., & Moore, J.H. (2011). Entropy-based information gain approaches to detect and to characterize gene-gene and gene-environment interactions/correlations of complex diseases. *Genetic Epidemiology*, 35(7), 706-721. [doi: 10.1002/gepi.20621](https://doi.org/10.1002/gepi.20621).
- [11] Fuentes, S., Viejo, C.G., Tongson, E., Dunshea, F.R., Dac, H.H., & Lipovetzky, N. (2022). Animal biometric assessment using non-invasive computer vision and machine learning are good predictors of dairy cows age and welfare: The future of automated veterinary support systems. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100388. [doi: 10.1016/j.jafr.2022.100388](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100388).
- [12] Fukuda, O., Nabeoka, N., & Miyajima, T. (2013). Estimation of marbling score in live cattle based on ICA and a neural network. In *2013 IEEE International Conference on systems, man, and cybernetics* (pp. 1622-1627). Manchester: IEEE. [doi: 10.1109/SMC.2013.280](https://doi.org/10.1109/SMC.2013.280).
- [13] Gray, R.M. (2011). *Entropy and information theory*. New York: Springer Science & Business Media.
- [14] Karatieieva, H., Galushko, I., Kravchenko, H., & Gill, M. (2021). Use of entropic and information analysis of living weight of dairy cows for productivity. *Scientific Papers. Series D. Animal Science*, 64(2), 58-63. Retrieved from https://animalsciencejournal.usamv.ro/pdf/2021/issue_2/Art7.pdf.
- [15] Knowles, T.P., Fitzpatrick, A.W., Meehan, S., Mott, H.R., Vendruscolo, M., Dobson, C.M., & Welland, M.E. (2007). Role of intermolecular forces in defining material properties of protein nanofibrils. *Science*, 318(5858), 1900-1903. [doi: 10.1126/science.1150057](https://doi.org/10.1126/science.1150057).
- [16] Kramarenko, O.S., Kuzmichova, N.I., & Zhuk, I.O. (2019). Entropy and information analysis of cow's milk production. *Taurida Scientific Herald*, 106, 185-190. Retrieved from http://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/106_2019/28.pdf.
- [17] Krishnan, P.T., Raj, A.N.J., Balasubramanian, P., & Chen, Y. (2020). Schizophrenia detection using Multivariate Empirical Mode Decomposition and entropy measures from multichannel EEG signal. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40(3), 1124-1139. [doi: 10.1016/j.bbe.2020.05.008](https://doi.org/10.1016/j.bbe.2020.05.008).
- [18] Kwon, M.S., Park, M., & Park, T. (2014). IGENT: Efficient entropy based algorithm for genome-wide gene-gene interaction analysis. *BMC Medical Genomics*, 7(1), 1-11. [doi: 10.1186/1755-8794-7-S1-S6](https://doi.org/10.1186/1755-8794-7-S1-S6).
- [19] Landete-Castillejos, T., & Gallego, L. (2000). The ability of mathematical models to describe the shape of lactation curves. *Journal of Animal Science*, 78(12), 3010-3013. [doi: 10.2527/2000.78123010x](https://doi.org/10.2527/2000.78123010x).

- [20] Lemay, D.G., & *et al.* (2009). The bovine lactation genome: Insights into the evolution of mammalian milk. *Genome Biology*, 10, 1-18. [doi: 10.1186/gb-2009-10-4-r43](https://doi.org/10.1186/gb-2009-10-4-r43).
- [21] Lishout, F.V., Mahachie John, J.M., Gusareva, E.S., Urrea, V., Cleynen, I., Théâtre, E., & Steen, K.V. (2013). An efficient algorithm to perform multiple testing in epistasis screening. *BMC Bioinformatics*, 14(1), 1-10. [doi: 10.1186/1471-2105-14-138](https://doi.org/10.1186/1471-2105-14-138).
- [22] Liu, S., Dong, F., Hao, J., Qiao, L., Guo, J., Wang, S., & Cui, J. (2023). Combination of hyperspectral imaging and entropy weight method for the comprehensive assessment of antioxidant enzyme activity in Tan mutton. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 291, 122342. [doi: 10.1016/j.saa.2023.122342](https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.122342).
- [23] Machado, J.T., Rocha-Neves, J.M., & Andrade, J.P. (2020). Computational analysis of the SARS-CoV-2 and other viruses based on the Kolmogorov's complexity and Shannon's information theories. *Nonlinear Dynamics*, 101(3), 1731-1750. [doi: 10.1007/s11071-020-05771-8](https://doi.org/10.1007/s11071-020-05771-8).
- [24] Mueller, J.P., Getachew, T., Rekek, M., Rischkowsky, B., Abate, Z., Wondim, B., & Haile, A. (2021). Converting multi-trait breeding objectives into operative selection indexes to ensure genetic gains in low-input sheep and goat breeding programmes. *Animal*, 15(5), 100198. [doi: 10.1016/j.animal.2021.100198](https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100198).
- [25] Narinc, D., Karaman, E., Aksoy, T., & Firat, M.Z. (2013). Investigation of nonlinear models to describe long-term egg production in Japanese quail. *Poultry Science*, 92(6), 1676-1682. [doi: 10.3382/ps.2012-02511](https://doi.org/10.3382/ps.2012-02511).
- [26] Nezhlukchenko, T.I. (1999). The use of informational and statistical methods to assess the level of consolidation of a new type of sheep of the Askanian thin-fleece breed. *Animal Breeding and Genetics*, 31-32, 167-168. Retrieved from <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/>.
- [27] Pidpala, T.V., Kramarenko, O.S., & Zaitsev, Y.M. (2018). The use of entropy analysis to assess the development of traits in Holstein dairy cattle. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*, 20(84), 3-8. [doi: 10.15421/nvlvet8401](https://doi.org/10.15421/nvlvet8401).
- [28] Plokhinsky, N.A. (1964). *Heritability*. Novosibirsk: Department of SO AS USSR.
- [29] Ritchie, M.D., & Van Steen, K. (2018). The search for gene-gene interactions in genome-wide association studies: Challenges in abundance of methods, practical considerations, and biological interpretation. *Annals of Translational Medicine*, 6(8), 157. [doi: 10.21037/atm.2018.04.05](https://doi.org/10.21037/atm.2018.04.05).
- [30] Schrödinger, E. (1944a). The affine connexion in physical field theories. *Nature*, 153(3889), 572-575. [doi: 10.1038/153572a0](https://doi.org/10.1038/153572a0).
- [31] Schrödinger, E. (1944b). *What is life? The physical aspect of the living cell and mind*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [32] Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. [doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x](https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x).
- [33] Shannon, K. (1983). *Works on information theory and cybernetics*. Moscow: Ripol Classic.