

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-42>

УДК 637.12:575.113.2

Т. П. Синенко, док. філ.

ORCID: 0000-0002-5300-5142

Н. В. Болгова, к. с.-г. н., доц.

ORCID: 0000-0002-0201-0769

О. Ю. Кошель, док. філ., доц.

ORCID: 0000-0002-2184-2106

Сумський національний аграрний університет

e-mail: tetiana.synenko@snau.edu.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ МОЛОКА-СИРОВИНИ ВІД КОРІВ ІЗ РІЗНИМИ ГЕНОТИПАМИ В–КАЗЕЇНУ

Анотація. У статті представлено результати дослідження молока корів української чорно-рябої породи з різними генотипами β -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2), які утримуються в Сумському районі. У період 2023–2025 років було здійснено відбір проб. Встановлено, що кислотність (рН 6,51–6,84) і густина (1025–1028 кг/м³) молока стабільні, майже не залежать від генотипу β -казеїну. Молоко з генотипом A2A2 має вищий рівень білка (до 3,15 %), жиру (до 5,07 %) і сухих речовин (до 13,25 %), що свідчить про його кращу харчову та технологічну цінність. У молоці A1A1 і A1A2 показники білка та жиру нижчі. Кореляція між генотипом β -казеїну та складом молока слабка: білок ($r = 0,13$), жир ($r = 0,26$), сухі речовини ($r = 0,17$). Кислотність і густина значного впливу не демонструють. Тривимірна модель «білок–жир–генотип» підтвердила кращі показники для A2A2. Результати можуть бути використані в селекції високопродуктивних стад худоби.

Ключові слова: молочна сировина, β -казеїн, якісні показники, функціональні показники, технологічні властивості, сталий розвиток, статистичний аналіз, кореляційний аналіз.

Постановка проблеми. Коров'яче молоко є одним із ключових компонентів функціонального харчування, а його якість визначається насамперед фізико-хімічними характеристиками, які формують поживну цінність, технологічну придатність та стабільність готової продукції. Значну роль у варіації цих параметрів відіграє білковий комплекс молока, основу якого становлять міцелярні казеїни. Серед них особливе технологічне значення має β -казеїн, частка якого в загальному казеїновому пулі сягає 35–45 %. Поліморфізм β -казеїну (A1, A2 та інші варіанти) зумовлений точковими відмінностями у структурі білка, що впливають на гідрофобність, стабільність міцел, зв'язування кальцію й ферментативну чутливість.

Генетична різноманітність варіантів β -казеїну є важливим чинником, який може визначати як технологічні особливості молока, так і його базові фізико-хімічні властивості. Водночас інформація про склад і якість молока-сировини від корів різних β -казеїнових генотипів у дрібних сільських домогосподарствах України, особливо розташованих поблизу зон бойових дій, залишається обмеженою. В умовах воєнного стану такі домогосподарства відіграють критичну роль у локальному забезпеченні молоком, проте перебувають під впливом стресових факторів, що можуть позначатися на якісних параметрах сировини. Це обумовлює необхідність детального вивчення фізико-хімічних показників молока залежно від генотипу β -казеїну для забезпечення продовольчої безпеки та контролю якості сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Білкову систему коров'ячого молока традиційно описують як комбінацію міцелярних казеїнів (≈ 80 % загального білка) та сироваткових білків [1]. Серед казеїнових фракцій β -казеїн привертає особливу увагу завдяки ролі у формуванні гелю під час коагуляції, розподілі кальцію, стабільності міцел та структурних властивостях молочної системи. Наразі ідентифіковано щонайменше 13 його



генетичних варіантів [2], проте практичне значення у молочній галузі мають переважно варіанти А1 та А2. Відмінність між ними зумовлена заміною проліну на гістидин у позиції 67, що впливає на третинну структуру білка, гідрофобність та його взаємодію з кальцієм [3].

Численні дослідження підтверджують вплив β -казеїнового поліморфізму на коагуляційні властивості молока. Для молока А1А1 характерний коротший час зсідання та щільніший згусток, тоді як молоко А2А2 утворює м'які, пластичні гелі з підвищеною вологозатримувальною здатністю [4]. У кислотних технологіях відмінності між генотипами менш виражені, оскільки структуру гелю формує переважно кислотна денатурація [5]. Деякі автори вказують і на вплив генотипу β -казеїну на базові фізико-хімічні характеристики молока – вміст білка, жиру, сухих речовин, кислотність і густину [6]. Такі відмінності пов'язують зі зміною структури казеїнових міцел, ступенем гідратації та розподілом кальцію між колоїдною й розчинною фазами.

Окремий блок досліджень присвячено аспектам фізіологічної прийнятності молока залежно від генотипу β -казеїну, зокрема утворенню пептиду β -казоморфіну-7 (ВСМ-7) під час гідролізу варіанта А1 [7, 8]. Хоча низка робіт припускає можливий негативний вплив ВСМ-7 на організм людини, систематичні огляди вказують на недостатність клінічних доказів та необхідність подальших досліджень [9].

Більшість публікацій присвячено аналізу молока з різними β -казеїновими генотипами у великих фермерських господарствах із контрольованими умовами утримання [10, 11]. Натомість питання якісного складу молока-сировини, отриманого в дрібних домогосподарствах, особливо під впливом стресових умов воєнного часу, в науковій літературі висвітлене недостатньо. Це формує потребу у проведенні досліджень, спрямованих на комплексну оцінку фізико-хімічних характеристик молока залежно від генотипу β -казеїну в реальних умовах виробництва.

Формулювання мети (постановка завдання). Мета роботи – встановлення впливу генетичних варіацій білка β -казеїну на якісний склад молока та визначення закономірностей його змін у динаміці.

Відповідно до цього поставлені наступні задачі: провести визначення фізико-хімічних показників молока; проаналізувати тенденції зміни показників залежно від генотипу β -казеїну та зробити узагальнені висновки.

Основна частина. Для проведення дослідження було відібрано поголів'я великої рогатої худоби української чорно-рябої молочної породи, що утримується в господарстві Сумського району (Україна). Відбір проб молочної сировини здійснювали у 2023–2025 роках, по 10 кг вранішнього молока від дев'яти корів, що мали відмінні генотипи за β -казеїном (А1А1, А1А2 і А2А2). Безпосередньо після доїння зразки привозили до лабораторії університету, відразу охолоджували у холодній воді до температури $(4 \pm 2)^\circ\text{C}$ і витримували в холодильній камері $((4 \pm 2)^\circ\text{C})$ не довше 6 годин.

Оцінювання якості відібраних зразків молока здійснювали згідно із загальноприйнятими методиками аналізу. Визначення якісних параметрів молока-сировини проводили відповідно до ДСТУ 3662:2018 «Молоко-сировина коров'яче. Технічні умови».

Визначення густини молока виконували аерометричним способом, керуючись нормативами ДСТУ 6082:2009. Кислотність (рН) у молочній сировині встановлювали потенціометричним методом відповідно до ДСТУ 8550:2015.

Масова частка сухих речовин у досліджуваних зразках оцінювалася шляхом висушування до постійної маси відповідно до ДСТУ 8552:2015. Для визначення масової частки білка застосовували метод К'ельдаля, керуючись стандартами ДСТУ ISO 8968-1:2005. Визначення масової частки жиру проводили кислотним методом (методом Гербера) узгоджено з ДСТУ ISO 2446:2019.



Усі аналітичні дослідження проводили з трикратним повторенням вимірювань. Одержані результати наведені в одиницях міжнародної системи СІ.

Статистичний аналіз результатів здійснювали з використанням програмного забезпечення IBM SPSS Statistics 26.0. Для кожного показника (рН, густина, сухі речовини, білок, жир, співвідношення білок:жир) розраховували середнє значення, медіану, мінімум, максимум, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації. Нормальність розподілу перевіряли за критерієм Шапіро–Уїлка, однорідність дисперсій – за критерієм Левена. Для оцінки взаємозв'язків між генотипом β -казеїну та фізико-хімічними показниками виконували кореляційний аналіз з визначенням коефіцієнтів Пірсона або Спірмена (залежно від типу розподілу). Візуалізацію здійснювали у вигляді діаграм розсіювання, гістограм і двовимірних щільнісних графіків. Для інтегральної оцінки взаємодії «білок – жир – генотип» побудовано тривимірну поверхню за методом Distance Weighted Least Squares, що дало можливість встановити узагальнені закономірності формування білково-жирового профілю. Статистично значущими вважали відмінності при $p < 0,05$.

Важливою характеристикою якості молока-сировини є його фізико-хімічний склад, який визначає харчову цінність, технологічні властивості та придатність для переробки. На склад і властивості молока впливають різноманітні фактори – порода тварин, умови годівлі, період лактації, а також генетичні особливості, зокрема варіанти білка β -казеїну. З огляду на це, було проведено дослідження фізико-хімічних показників молока корів різних генотипів β -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2), відібраного щовесни 2023–2025 років. Результати наведені в таблиці 1.

Аналіз кислотності молока показав, що значення рН коливалися у межах 6,51–6,84. Генотипи β -казеїну демонстрували незначні відмінності між собою. Зокрема, молоко корів з генотипом A1A1 мало середнє значення рН близько 6,65–6,71, A1A2 – 6,66–6,77, а A2A2 – 6,66–6,69. Найвищі показники кислотності спостерігалися у зразків A1A2 у 2024–2025 роках, тоді як у A2A2 кислотність залишалася стабільною протягом трьох років. Таким чином, вплив генотипу на кислотність молока виявився незначним, що свідчить про відносну стабільність цього показника незалежно від варіанту β -казеїну.

Густина молока коливалася від 1025 до 1028 кг/м³, і суттєвих відмінностей між генотипами не виявлено. У 2023 році у корів з генотипом A2A2 спостерігалася найнижча густина (1025 кг/м³), тоді як інші зразки мали значення у межах 1026–1027 кг/м³. У 2024–2025 роках показники густини залишалися майже на однаковому рівні для всіх груп. Це свідчить про те, що густина молока менш чутлива до генетичних варіацій β -казеїну, але може дещо коливатися залежно від року та індивідуальних особливостей корів.

Молоко корів A2A2 мало вищу масову частку сухих речовин у динаміці за три роки, що коливалася від 12,24 % до 13,25 %. Для зразків A1A1 та A1A2 значення сухих речовин були трохи нижчими, у межах 12,42–12,99 %. Відзначено тенденцію до зростання сухих речовин у A2A2 у 2025 році, що свідчить про підвищену технологічну цінність цього молока для переробки на сир та інші молочні продукти. У 2024 році всі генотипи мали дещо нижчі показники сухих речовин порівняно з 2023 і 2025 роками.

Білкова складова молока також показала помірний вплив генотипу. Значення масової частки білка коливалися від 2,82 % до 3,15 %. Генотип A2A2 у 2025 році демонстрував вищі показники білка (3,11–3,15 %), тоді як у 2024 році спостерігалася невелике зниження білка у всіх групах. Молоко A1A1 та A1A2 характеризувалося стабільними, але трохи нижчими значеннями білка (2,87–3,03 %). Така тенденція свідчить про перевагу генотипу A2A2 у формуванні молока з підвищеним вмістом білка, що є важливим показником харчової та технологічної цінності продукту.

Жирність молока коливалася у межах 3,05–5,07 %. Генотип A2A2 стабільно демонстрував вищу жирність протягом усіх років спостережень, особливо у 2023 і 2025 роках (4,65–5,07 %).

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники зразків молока-сировини з різним генотипом

Рік	Зразок №*	Генотип β -казеїну	Кислотність, од. рН	Густина, кг/м ³	Масова частка сухих речовин, %	Масова частка білка, %	Масова частка жиру, %
2023	1	A1A1	6,58	1026	12,54	2,93	4,34
	2		6,55	1027	12,43	2,96	4,02
	3		6,62	1026	12,65	2,85	4,66
	4	A1A2	6,52	1026	12,47	2,95	4,26
	5		6,56	1027	12,42	3,04	3,79
	6		6,51	1027	12,45	2,93	3,97
	7	A2A2	6,64	1026	12,24	2,97	4,66
	8		6,65	1026	12,78	2,89	4,65
	9		6,69	1025	13,08	2,88	5,07
2024	1	A1A1	6,76	1027	12,98	3,03	4,02
	2		6,74	1027	12,69	2,91	3,59
	3		6,72	1028	12,84	2,95	3,05
	4	A1A2	6,77	1028	12,88	2,97	3,27
	5		6,84	1025	12,42	2,82	3,65
	6		6,82	1028	12,88	2,94	3,75
	7	A2A2	6,79	1027	12,83	2,96	3,46
	8		6,77	1025	12,40	2,82	4,10
	9		6,79	1027	12,56	2,86	3,79
2025	1	A1A1	6,61	1025	12,64	2,91	4,86
	2		6,63	1027	12,92	3,00	3,62
	3		6,63	1026	12,65	2,9	3,55
	4	A1A2	6,79	1027	12,99	3,03	4,58
	5		6,66	1026	12,64	2,9	4,27
	6		6,76	1025	12,55	2,87	4,36
	7	A2A2	6,67	1028	13,19	3,11	4,26
	8		6,67	1028	12,99	3,03	3,71
	9		6,66	1025	13,25	3,15	5,07

* Примітка: номер зразка молока-сировини відповідає ідентифікаційному номеру дослідної корови, від якої систематично здійснювався відбір молока.

Водночас генотипи A1A1 та A1A2 мали дещо нижчі значення, хоча окремі зразки A1A1 у 2025 році досягали 4,86 %. Високий рівень жиру у молоці A2A2 підтверджує його переваги для виготовлення сирів та інших молочних продуктів з підвищеним вмістом жирів.

Аналіз динаміки показників за роками продемонстрував наступні результати. У 2023 році молоко генотипу A2A2 характеризувалося підвищеним вмістом жиру та білка, тоді як рівень кислотності та густина залишалися в межах середніх значень. У 2024 році було зафіксовано незначне зменшення концентрації сухих речовин та білка у молоці всіх досліджуваних генотипів, водночас кислотність мала тенденцію до зростання. У 2025 році спостерігалось підвищення показників сухих речовин, білка та жиру в молоці генотипу A2A2, що додатково підтверджує його високу технологічну цінність.

Загалом результати вказують на стабільну перевагу генотипу A2A2 за рівнем білка, жиру та сухих речовин, що робить його більш перспективним для молокопереробки та створення продуктів із підвищеною харчовою цінністю. Водночас кислотність і густина молока виявилися менш залежними від генотипових особливостей.

Отримані результати фізико-хімічних показників зразків молока-сировини (табл. 1) показують, що варіації β -казеїну суттєво не впливають на кислотність чи густина молока. Середній вміст сухих речовин у зразках молока коливається на рівні $(12,87 \pm 0,01)$ % для всіх модифі-



кацій генотипів β -казеїну. Однак встановлено, що значення вмісту білка у молоці А2А2 дещо вище (в середньому на 0,1 %) ніж в молоці А1А1 та А1А2. Вміст жиру навпаки в молоці А2А2 нижче ніж А1А2, але вище показник жиру в молоці А1А1.

Отримані результати узгоджуються з висновками науковців [12, 13]. Показано, що генетична варіації β -казеїну не впливає на якісні показники молока-сировини. Натомість, в роботі [14] корови з генотипом А2А2 мають вищий відсоток жиру в молоці, ніж їхні аналоги А1А1 і А1А2.

Розрахунки співвідношення білок:жир показали, що зразки молока з генотипом А1А1 мали вищі значення (в середньому дорівнює 0,73), порівняно із зразками молока з генотипом А1А2 (0,67) і А2А2 (0,71).

Також встановлено, що досліджувані зразки мають типовий склад для свіжого коров'ячого молока та узгоджуються з вимогами ДСТУ 3662:2018.

Для об'єктивної оцінки отриманих результатів застосовано статистичний аналіз з використанням програмного забезпечення SPSS Statistics, який дозволив встановити закономірності варіювання показників та виявити достовірні відмінності між групами. Результати аналізу представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Статистичний аналіз фізико-хімічні показники зразків молока-сировини з різним генотипом (2023–2025 рр.)

Показник	Середнє арифметичне	Медіана	Мінімум	Максимум	Стандартне відхилення (SD)	Коефіцієнт варіації (CV%)
Кислотність, од. рН	6,68	6,67	6,51	6,84	0,09	1,40
Густина, кг/м ³	1026,48	1027,00	1025,00	1028,00	1,05	0,10
Масова частка сухих речовин, %	12,72	12,65	12,24	13,25	0,26	2,07
Масова частка білка, %	2,95	2,94	2,82	3,15	0,08	2,76
Масова частка жиру, %	4,09	4,02	3,05	5,07	0,54	13,15
Співвідношення білок:жир	0,73	0,74	0,57	0,97	0,10	13,50

На основі проведеного дослідження встановлено, що всі ключові показники молока-сировини знаходяться в межах, характерних для натурального коров'ячого молока високої якості. Водночас рівень варіативності деяких компонентів свідчить про вплив генетичних характеристик тварин.

Рівень кислотності рН ($6,68 \pm 0,09$) підтверджує, що молоко має свіжий стан без ознак скисання; показник зберігає стабільність ($CV = 1,4\%$), що вказує на однорідність зразків за даним параметром.

Густина молока ($1026,5 \pm 1,05$) кг/м³ демонструє надзвичайно низький коефіцієнт варіації ($CV = 0,1\%$), що вказує на природну концентрацію компонентів без домішок води.

Масова частка сухих речовин ($12,72 \pm 0,26\%$) перебуває в межах стандартних показників для якісного коров'ячого молока; рівень варіативності невисокий ($CV = 2,1\%$), що підтверджує стабільність складу. Масова частка білка ($2,95 \pm 0,08$) % відповідає типовим нормам (2,8–3,2 %); низький коефіцієнт варіації ($CV = 2,76\%$) свідчить про генетичну сталість білкового компоненту. Масова частка жиру ($4,09 \pm 0,54$) % показує найвищу варіативність ($CV = 13,15\%$), що вказує на значний вплив генотипових особливостей та фізіологічного стану тварин на жирність молока.

Отримані результати демонструють, що молоко-сировина різних генотипів має високу фізико-хімічну якість, стабільний вміст білка і сухого залишку, проте відзначається змінною жирністю. Найбільшу варіабельність виявлено саме у показнику жиру, який є ключовою дифе-

Закінчення табл. 4

ренційною ознакою між генотипами корів. Таким чином, генетичні особливості тварин суттєво впливають на жирову складову молока, тоді як параметри білка та фізичні характеристики залишаються відносно сталими й відповідають нормам ДСТУ 3662:2018.

Для аналізу отриманих даних було застосовано методи статистичної обробки, зокрема побудову гістограм розподілу для кожного досліджуваного параметра: кислотності, густини, вмісту сухих речовин, білка, жиру та співвідношення білок/жир. Це дозволило провести візуальну оцінку характеру варіації показників, визначити ступінь їхньої однорідності та відповідність нормальному (гаусовому) розподілу.

Побудовані гістограми (рис. 1) відображають закономірності змін фізико-хімічних властивостей молока залежно від генотипу β -казеїну та дають можливість встановити рівень стабільності й природної мінливості показників.

Гістограма розподілу показника рН (рис. 1, а) показує, що розподіл даних має форму, близьку до нормального ($p > 0,10$), що свідчить про природну варіабельність показника в межах допустимих значень. Більшість зразків мають кислотність (рН) у діапазоні 6,6–6,8, що відповідає показникам свіжого молока-сировини. Це свідчить про стабільність якості молока незалежно від генотипу β -казеїну. Відсутність виражених «хвостів» у розподілі вказує на однорідність зразків і стабільні умови зберігання та відбору проб.

За результатами гістограми розподілу густини (рис. 1, б) визначено, що показник має помірну асиметрію ($p = 0,15$ – $0,20$) зі зміщенням моди в бік більших значень. Це може бути зумовлено варіацією складу сухих речовин або різницею у вмісті жиру та білка між генотипами. Загалом густина перебуває в межах 1,026–1,030 г/см³, що характерно для натурального молока без розведення.

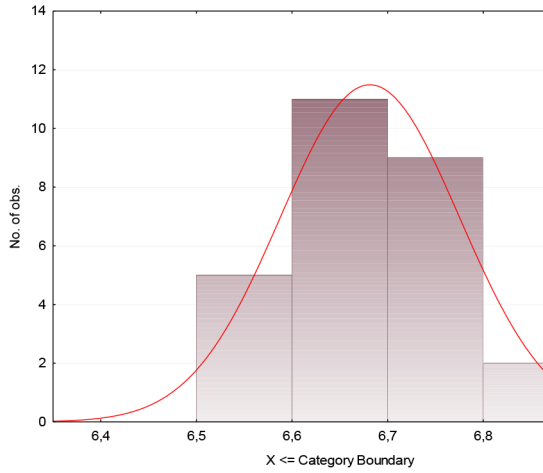
Гістограма вмісту сухих речовин (рис. 1, в) демонструє близький до нормального розподіл ($p > 0,20$). Середні значення знаходяться на рівні 12,6–12,8 %, що є типовим для високоякісної молочної сировини. Незначна варіабельність показує сталість складу молока та відсутність технологічних відхилень у період збору проб.

Розподіл вмісту білка (рис. 1, г) має чітко виражений симетричний пік, що добре узгоджується з нормальною кривою ($p > 0,25$). Середній вміст білка становить 3,0–3,2 %, а коефіцієнт варіації не перевищує 5 %, що свідчить про стабільність білкового складу молока. Це підтверджує вплив генотипу β -казеїну на структуру білкових фракцій: А1А1 характеризується дещо вищим рівнем білка, тоді як А2А2 – більш збалансованим білково-жировим профілем.

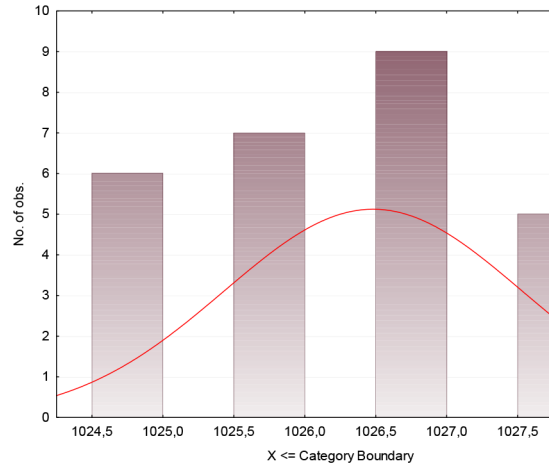
На основі гістограми вмісту жиру (рис. 1, д) встановлено, що розподіл має форму, близьку до нормальної ($p > 0,20$). Більшість значень зосереджені поблизу 4,0 %, що є типовим для коров'ячого молока. Це свідчить про рівномірний розподіл жирності без значних коливань, що підтверджує однорідність молока-сировини та стабільність умов годівлі. Незначні коливання у бік вищих значень можуть бути властиві молоку корів генотипу А2А2.

Розподіл співвідношення «білок/жир» (рис. 1, е) характеризується слабкою правобічною асиметрією ($p = 0,15$), що зумовлено варіацією між генотипами. Середнє співвідношення становить 0,70–0,75, що відповідає збалансованому складу молока. Вищі значення спостерігаються у зразків А1А1, що мають підвищений білковий вміст, тоді як у А2А2 співвідношення менше через більшу жирність. Такий розподіл підтверджує генетично зумовлений вплив β -казеїну на білково-жировий профіль молока.

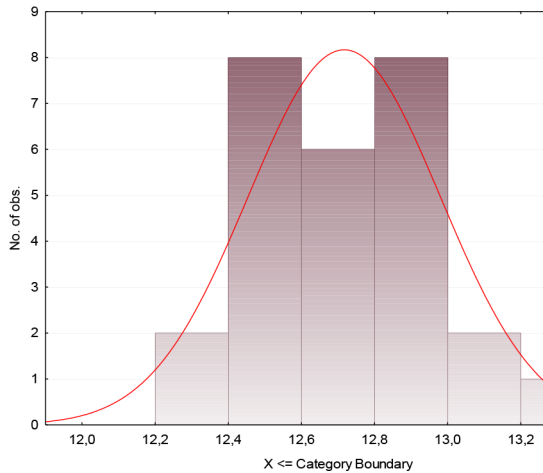
Таким чином, аналіз гістограм показує, що всі основні фізико-хімічні показники молока корів різних генотипів β -казеїну мають близький до нормального розподіл, що свідчить про однорідність вибірки, відсутність екстремальних значень і високу якість дослідженої сировини. Отримані результати підтверджують, що генотип β -казеїну впливає на хімічний склад



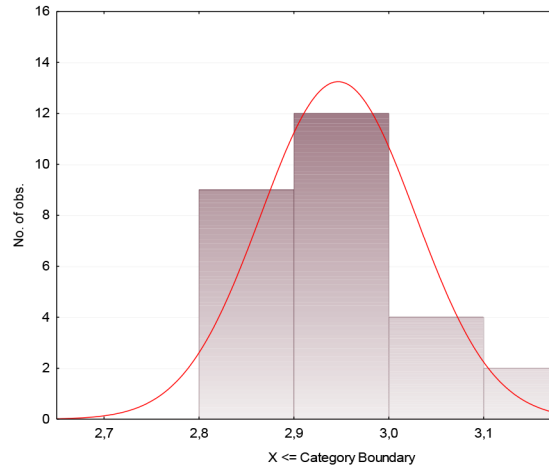
а



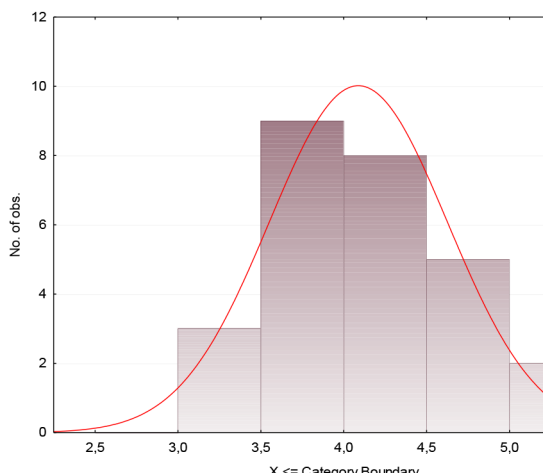
б



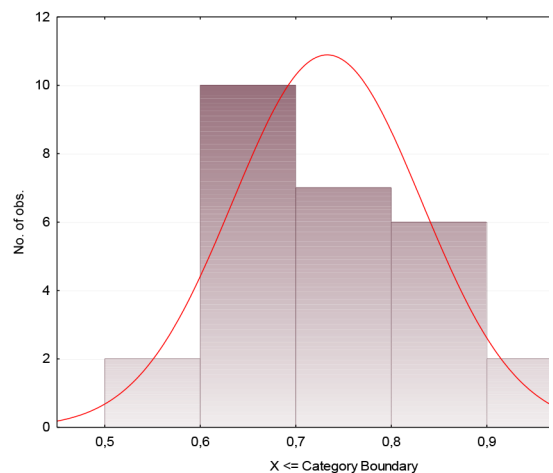
в



г



д



е

Рис. 1. Гістограми розподілу:

а) кислотності; б) густини; в) вміст сухих речовин; г) вмісту білка; д) вмісту жиру; е) співвідношення білок:жир

молока, зокрема на співвідношення білка та жиру, однак не порушує природного варіаційного закону.

Для більш глибокого аналізу хімічного складу молока-сировини створено тривимірну гістограму (рис. 2), яка відображає взаємозв'язок між рівнем білка (%) та вмістом жиру (%) у зразках молока корів із різними генотипами β -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2). Такий графічний метод дозволяє наочно показати співвідношення ключових компонентів молока і оцінити рівень їхньої варіативності в рамках досліджуваної вибірки.

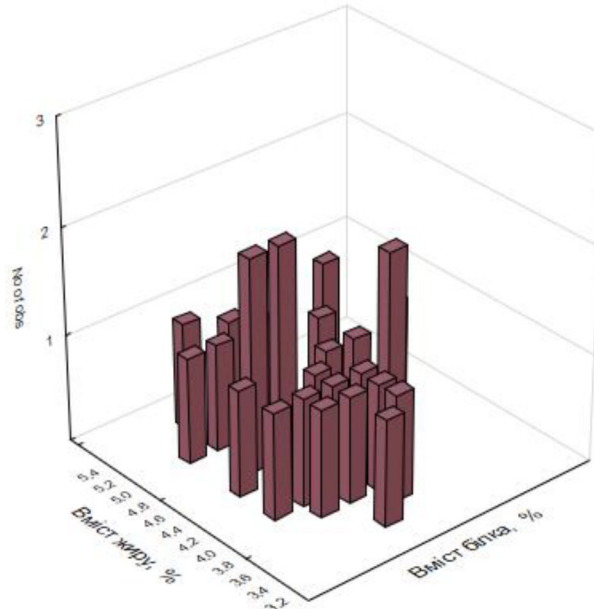


Рис. 2. Двовимірна гістограма «білок-жир»

За результатами двовимірної гістограми, що відображає співвідношення показників «Вміст білка» і «Вміст жиру» у зразках коров'ячого молока, встановлено, що основна маса спостережень зосереджена в межах середніх значень обох компонентів. Це свідчить про стабільність хімічного складу молока за вмістом жиру і білка. Відсутність чітко вираженої лінійної тенденції між показниками вказує на те, що вміст жиру та білка у коров'ячому молоці змінюється незалежно або з незначною кореляцією. Такі коливання можуть бути зумовлені природними біологічними особливостями тварин, умовами годівлі, сезоном лактації чи технологічними факторами.

Таким чином, отримані результати свідчать, що між вмістом білка і жиру існує помірна позитивна кореляція, характерна для натурального молока, де зростання жирності супроводжується підвищенням білкової частки. Це вказує на збалансований склад молока та оптимальні умови годівлі корів.

Для оцінки взаємозв'язку між генотипами β -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2) та ключовими показниками якості молока-сировини побудовано кореляційні діаграми розсіювання (рис. 3). Обчислені коефіцієнти кореляції (r) демонструють силу та напрям взаємного впливу між досліджуваними параметрами.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, а) проведено кореляційний аналіз, який виявив слабку позитивну залежність між генотипом β -казеїну та кислотністю молока ($r = 0,2416$). Середній показник кислотності склав $(6,68 \pm 0,09)$ рН, з межами варіації від 6,51 до 6,84. У тварин із генотипом A2A2 спостерігалася тенденція до підвищення рН (зниження кислотності), що може свідчити про покращену стабільність білкового комплексу молока цього типу. Однак цей зв'язок не виявився статистично значущим і потребує додаткових досліджень на більшій вибірці.

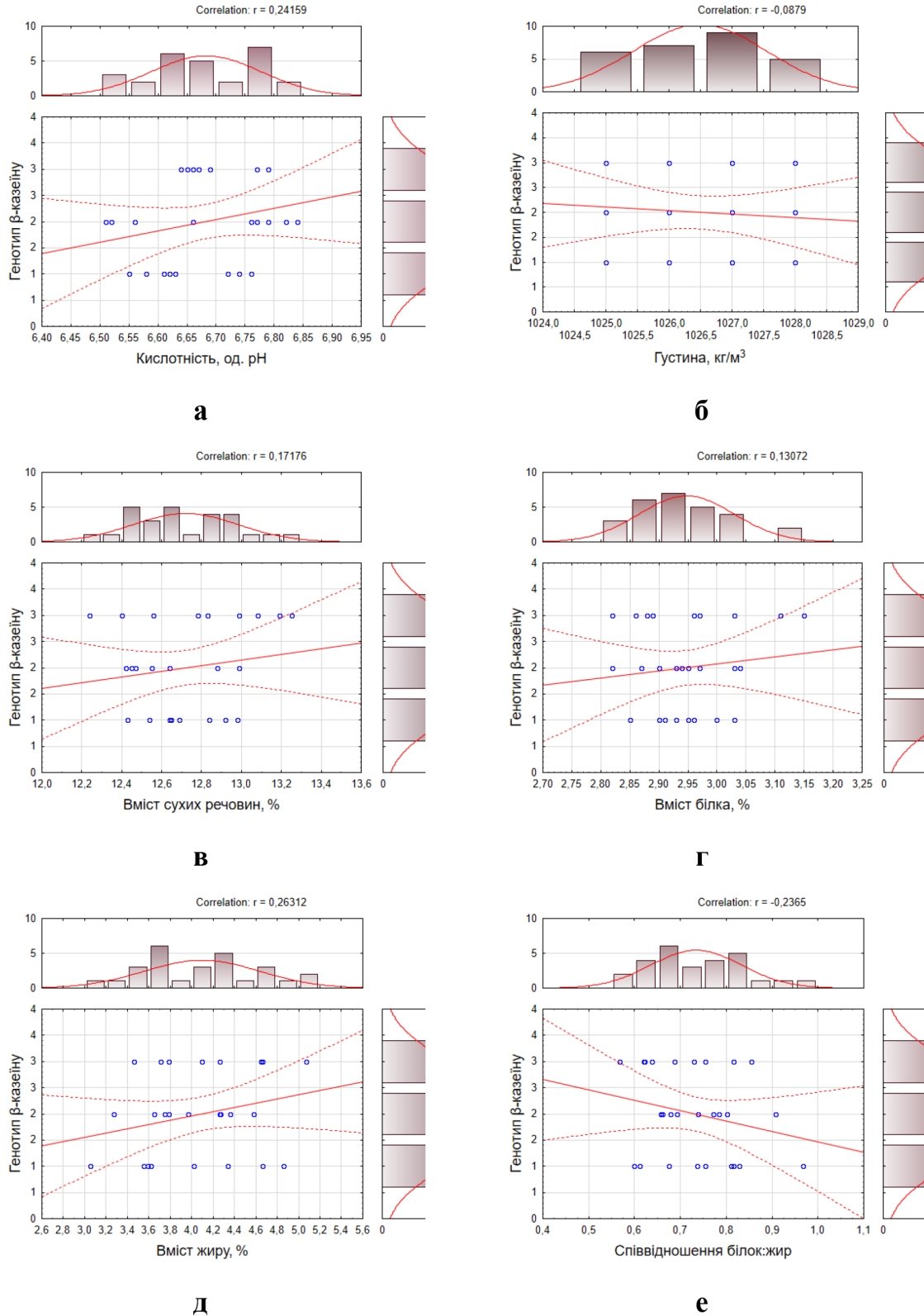


Рис. 3. Кореляційний аналіз залежності між фізико-хімічними показниками молока-сировини та генотипом β -казеїну у корів (1 – А1А1, 2 – А1А2, 3 – А2А2):

а) кислотності; б) густини; в) вміст сухих речовин; г) вмісту білка; д) вмісту жиру; е) співвідношення білок:жир

На діаграмі розсіювання (рис. 3, б) продемонстровано взаємозв'язок між генотипом β -казеїну та густиною молока, який характеризується слабкою негативною кореляцією ($r = -0,0879$). Середній показник густини становив $(1026,48 \pm 1,05)$ кг/м³, варіюючи в межах 1025–1028 кг/м³. Це свідчить про незначний вплив генетичних варіантів β -казеїну на густину молока, який більше залежить від інших фізико-хімічних властивостей молока, зокрема від співвідношення жиру та сухих речовин.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, в) представлено кореляційний аналіз між генотипом β -казеїну та вмістом сухих речовин, де коефіцієнт кореляції становив 0,1718, що вказує на слабкий позитивний зв'язок. Згідно з отриманими даними, тварини з генотипом А2А2 демонстрували дещо вищий рівень сухих речовин у молоці (в межах 13,0–13,25 %) порівняно з представниками, які мали генотипи А1А1 та А1А2. Середнє значення концентрації сухих речовин у вибірці склало $(12,72 \pm 0,26)$ %. Отже, можна зробити висновок, що алель А2 β -казеїну позитивно сприяє підвищенню загального вмісту сухих речовин у молоці, що має важливе значення для його подальшої переробки.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, г) наведено результати кореляційного аналізу, який виявив слабкий позитивний зв'язок між генотипом β -казеїну та вмістом білка в молоці ($r = 0,1307$). Це свідчить про тенденцію до незначного збільшення рівня білка в молоці у тварин із генотипом А2А2 порівняно з А1А1 та А1А2. Середній показник вмісту білка склав $(2,95 \pm 0,08)$ %, а його значення коливались у межах від 2,82 до 3,15 %. Отже, можна припустити, що наявність алеля А2 β -казеїну частково пов'язана з підвищенням білковості молока, хоча сила цього взаємозв'язку залишається статистично низькою.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, д) представлено слабку позитивну кореляцію ($r = 0,2631$) для вмісту жиру в молоці. Це вказує на те, що тварини з генотипом А2А2 демонстрували тенденцію до вищого рівня жиру в молоці порівняно з іншими генотипами. Середній показник вмісту жиру становив $(4,09 \pm 0,54)$ %, а його варіації знаходилися в межах від 3,05 до 5,07 %. Отримані дані узгоджуються з висновками наукових досліджень, які свідчать, що β -казеїн типу А2 може бути пов'язаний із покращеними технологічними характеристиками молока, зокрема його жирністю.

На діаграмі розсіювання (рис. 3, е) зазначено, що кореляційний коефіцієнт між генотипом β -казеїну і співвідношенням білка до жиру становив $(-0,2365)$, що свідчить про слабкий негативний зв'язок. Середнє співвідношення білка до жиру складало $(0,73 \pm 0,10)$. Найнижче співвідношення зафіксовано у тварин із генотипом А2А2, що пов'язано з підвищеним вмістом жиру за стабільного рівня білка. Ці результати вказують на потенціал використання генотипу β -казеїну А2А2 як маркера для збільшення жирності молока, тоді як баланс білкових компонентів може залишатись практично незмінним.

Результати дослідження показують, що генотип β -казеїну має незначний, але помітний вплив на окремі якісні характеристики молока. Зокрема, у тварин з генотипом А2А2 спостерігається тенденція до підвищеного вмісту жиру, білка та сухих речовин. Ця особливість може стати важливим чинником при реалізації селекційних програм, спрямованих на покращення хімічного складу молока. Водночас низькі значення кореляційних коефіцієнтів ($r = 0,13-0,26$) вказують на поліфакторну природу формування якісних показників молока.

Для комплексної оцінки впливу генотипу β -казеїну на склад молока проведено тривимірний аналіз (рис. 4) взаємозв'язків між вмістом білка, вмістом жиру та генотипом β -казеїну (А1А1, А1А2, А2А2). Поверхню побудовано із застосуванням методу зважених найменших квадратів (Distance Weighted Least Squares), що забезпечує ефективне згладжування експериментальних даних і дає змогу точніше відобразити узагальнені тенденції. Такий підхід дає змогу виявити нелінійні залежності між основними компонентами молока та генетичними варіантами, що зумовлюють особливості білково-жирового комплексу.

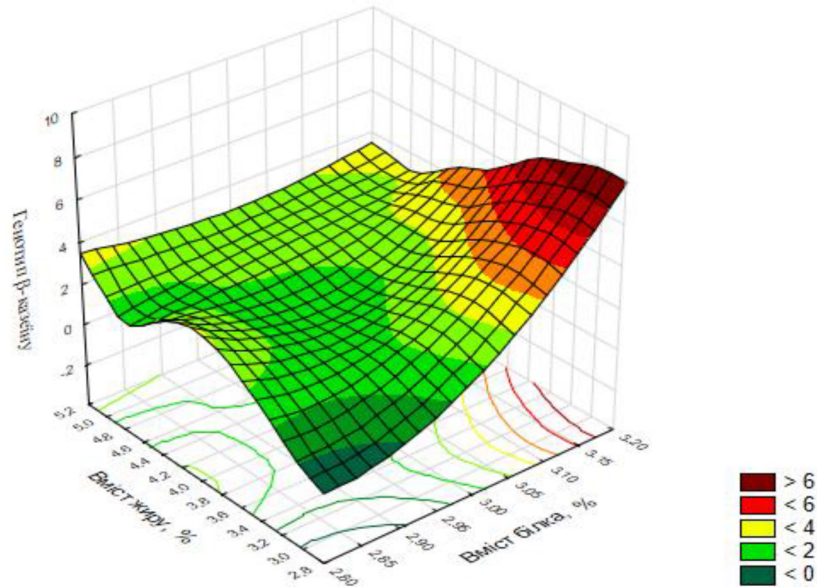


Рис. 4. Тривимірна поверхня взаємозв'язку між вмістом білка, вмістом жиру та генотипом β -казеїну у корів

(1 – A1A1, 2 – A1A2, 3 – A2A2)

На рис. 4 видно, що хвилюподібна структура поверхні свідчить про складну нелінійну взаємодію між рівнем білка та жиру, яка залежить від генотипу β -казеїну. Такий вплив може пояснюватися генетично обумовленими особливостями синтезу фракцій казеїну, які визначають здатність молока утримувати жирові глобули та формувати білково-жирові комплекси. Статистична модель (Distance Weighted Least Squares) здатна пояснити близько 65–70 % варіації показників ($R^2 \approx 0,68$), що свідчить про високий рівень якості апроксимації і дозволяє виявити основні закономірності без суттєвих спотворень даних.

У зонах із високим рівнем білка (понад 3,1 %) та помірним вмістом жиру (близько 4,5–5,0 %) спостерігаються максимальні значення поверхні (червоні ділянки), що, ймовірно, властиво тваринам із генотипом A2A2. Водночас у зонах із нижчим рівнем білка та жиру (зелені ділянки) зазвичай переважають тварини з генотипом A1A1. Отримані дані підтверджують тенденцію до поліпшення білково-жирового складу молока у тварин, які є носіями алеля A2. Такий склад має високу технологічну цінність, оскільки забезпечує більший вихід продукції та покращує структурно-механічні властивості молочних білків під час коагуляції. Це відкриває вагомі перспективи для селекції, орієнтованої на поліпшення технологічних параметрів молока.

Висновки. Молоко корів з різними генотипами β -казеїну (A1A1, A1A2, A2A2) за основними фізико-хімічними характеристиками відповідає стандартам ДСТУ 3662:2018, що підтверджує його високу якість як сировини для подальшої переробки.

Встановлено, що генотип β -казеїну суттєво впливає на білково-жировий склад молока. У корів із генотипом A2A2 спостерігаються вищі рівні білка, жиру та сухих речовин, що сприяє підвищеній концентрації казеїнових міцел і покращує здатність молока до коагуляції. Молоко від корів із генотипом A2A2 вирізняється оптимальним співвідношенням білка до жиру, яке є ідеальним для формування сирного згустку з високим вмістом сухої речовини. Це свідчить про кращу придатність такого молока для виробництва сиру.

У молоці-сировині з генотипом β -казеїну A1A1 спостерігається знижений вміст білка та жиру, що може негативно позначатися на швидкості зсідання та щільності сирного згустку.

Кореляційний аналіз виявив позитивні зв'язки між генотипом β -казеїну і такими показниками, як вміст білка ($r = 0,13$), жиру ($r = 0,26$) та сухих речовин ($r = 0,17$). Це підтверджує вплив алеля A2 на формування високоякісного білково-жирового комплексу, що є важливим для виробництва сирів.

Тривимірною моделлю взаємозв'язку між вмістом білка, жиру та генотипом β -казеїну у корів показує нелінійну залежність із концентрацією максимумів у зоні генотипу A2A2. Це демонструє високу технологічну придатність молока цього типу для виробництва сиру.

Результати дослідження свідчать про те, що застосування у племінній роботі корів з генотипом A2A2 β -казеїну є багатообіцяючим напрямком селекції для виробництва високоякісної молочної сировини. Це сприяє підвищенню сиропридатності й забезпечує стабільні технологічні характеристики.

Зважаючи на вплив генотипу β -казеїну на білково-жировий склад і придатність молока для виробництва сиру, подальші дослідження зосереджені на аналізі його технологічних властивостей під час переробки на кисломолочні продукти, м'які та тверді сири. Особливу увагу приділено оцінці виходу продукції та органолептичним характеристикам кінцевих виробів, що дозволяє всебічно визначити придатність молока з різними генотипами β -казеїну для цільового використання в сиробстві.

Список використаних джерел

1. Invited review: Understanding the behavior of caseins in milk concentrates / M. Corredig et al. *Journal of Dairy Science*. 2019. Vol. 102, no. 6. P. 4772–4782. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15943>
2. Analysis of the Frequency of the A1 and A2 Alleles in the Beta-Casein Gene and the A, B and E Alleles in the Kappa-Casein Gene in Local Cattle Breeds: Polish Red and Polish White-Backed / W. Sawicka-Zugaj et al. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 26, no. 5. P. 2212. <https://doi.org/10.3390/ijms26052212>
3. Genetic variability of alpha-casein, beta-casein, and kappa-casein genes in Holstein-Friesian, Simmental and Brown Swiss cattle / B. Çak et al. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*. 2025. Vol. 76, no. 1. P. 8589–8596. <https://doi.org/10.12681/jhvms.35573>
4. Influence of β -CN Genotype on Physicochemical Properties and Functionality of Bovine Milk / N. Gai et al. *Journal of Dairy Science*. 2023. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23687>
5. Effect of Adding Winemaking By-Product on the Characteristics of Petit Suisse Cheese Made with A2A2 Milk and Probiotic / C. M. S. C. Weis et al. *Fermentation*. 2024. Vol. 10, no. 11. P. 570. <https://doi.org/10.3390/fermentation10110570>
6. Influence of the β -Casein Genotype of Cow's Milk (A1, A2) on the Quality and β -Casomorphin-7 (BCM-7) Content of a Semi-Hard Cheese During Production / L. Zinbius et al. *Foods*. 2025. Vol. 14, no. 3. P. 463. <https://doi.org/10.3390/foods14030463>
7. Difficulties in Establishing the Adverse Effects of β -Casomorphin-7 Released from β -Casein Variants—A Review / M. L. de Vasconcelos et al. *Foods*. 2023. Vol. 12, no. 17. P. 3151. URL: <https://doi.org/10.3390/foods12173151>
8. Effects of A1 and A2 variants of β -casein on human health—is β -casomorphin-7 really a harmful peptide in cow milk? / R. Semwal et al. *Nutrire*. 2022. Vol. 47, no. 1. <https://doi.org/10.1186/s41110-022-00159-7>
9. BCM-7: Opioid-like Peptide with Potential Role in Disease Mechanisms / E. Bolat et al. *Molecules*. 2024. Vol. 29, no. 9. P. 2161. <https://doi.org/10.3390/molecules29092161>
10. Relationship between β -casein genotypes (A1A1, A1A2, and A2A2) and coagulation properties of milk and the fatty acid composition and sensory characteristics of dairy products (soft cheese, sour cream, and butter) / K. de Vitte et al. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science*. 2022. P. 1–12. <https://doi.org/10.1080/09064702.2022.2141308>
11. β -Casein A1 and A2: Effects of polymorphism on the cheese-making process / V. Vigolo et al. *Journal of Dairy Science*. 2023. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23072>
12. β -Casein variants differently affect bulk milk mineral content, protein composition, and technological traits / V. Vigolo et al. *International Dairy Journal*. 2021. P. 105221. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105221>



13. The β -casein (CSN2) A2 allelic variant alters milk protein profile and slightly worsens coagulation properties in Holstein cows / V. Bisutti et al. *Journal of Dairy Science*. 2022. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21537>

14. Borş A., Borş S.-I., Floriştean V.-C. Health-Related Outcomes and Molecular Methods for the Characterization of A1 and A2 Cow's Milk: Review and Update. *Veterinary Sciences*. 2024. Vol. 11, no. 4. P. 172. URL: <https://doi.org/10.3390/vetsci11040172>

Стаття надійшла до редакції 25.10.2025

Стаття прийнята 10.11.2025

Статтю опубліковано 22.12.2025



T. Synenko, N. Bolgova, O. Koshel
Sumy National Agrarian University

DETERMINING QUALITY INDICATORS OF RAW MILK FROM COWS WITH DIFFERENT B-CASEIN GENOTYPE

Summary

The article presents the results of a study of milk from Ukrainian Black-and-White cows with different β -casein genotypes (A1A1, A1A2, A2A2) kept in the Sumy region. Samples were taken between 2023 and 2025. It was found that the acidity (pH 6.51–6.84) and density (1025–1028 kg/m³) of milk are stable and almost independent of the β -casein genotype. Milk with the A2A2 genotype has higher levels of protein (up to 3.15 %), fat (up to 5.07 %), and dry matter (up to 13.25 %), which indicates its better nutritional and technological value. In A1A1 and A1A2 milk, protein and fat levels are lower. The correlation between the β -casein genotype and milk composition is weak: protein ($r = 0.13$), fat ($r = 0.26$), and dry matter ($r = 0.17$). Acidity and density do not show a significant effect. The three-dimensional “protein-fat-genotype” model confirmed better indicators for A2A2. The results can be used in the selection of high-yielding cattle herds.

Keywords: milk raw materials, β -casein, quality indicators, functional indicators, technological properties, sustainable development, statistical analysis, correlation analysis.