

<https://doi.org/10.67290/2026.dw.10>

УДК 637.136.3

Анна Юрьевна Дуганова

Григорий Новомирович Рогов, канд. техн. наук

Нинель Петровна Сорокина

Денис Станиславович Мамыкин, канд. техн. наук

ВНИИМС – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, г. Углич

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ КАК ИНСТРУМЕНТ ОТБОРА ШТАММОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗАКВАСОК ПРЯМОГО ВНЕСЕНИЯ

Повышение кислотности молочных продуктов в процессе хранения, вызванное постферментативной активностью (ПФА) заквасочных культур, является актуальной проблемой современной молочной промышленности. Ключевым биологическим методом её решения выступает целенаправленная селекция природных изолятов с пониженной ферментативной активностью, что позволяет обеспечить стабильность качества и продлить сроки годности продукции. В работе предложен методологический подход к систематизации и отбору коллекционных штаммов для создания заквасок прямого внесения на основе многомерного статистического анализа. Основным инструментом систематизации штаммов в рамках предлагаемого подхода выступает иерархический кластерный анализ с использованием метода Уорда (Ward's method) и евклидовой метрикой расстояния для оценки различий между штаммами, а также метод равных интервалов для предварительной обработки и группировки данных. Обоснована эффективность применения многомерных статистических методов для классификации штаммов по комплексу технологически значимых признаков. Разработанный подход позволяет целенаправленно формировать целевые композиции заквасочных микроорганизмов с контролируемым уровнем ацидофикации, обеспечивающим стабильность кислотности продукта на протяжении всего срока годности.

Ключевые слова: бактериальные закваски, ферментированная молочная продукция, подбор заквасочных культур, постферментативная активность, метод Уорда, евклидово расстояние, метод равных интервалов, иерархическая кластеризация

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке национального проекта по обеспечению технологического лидерства «Новые материалы и химия», тема FGUS-2025-0006.

UDC 637.136.3

Anna Yuryevna Duganova

Grigory Novomirovich Rogov, Candidate of Technical Sciences

Ninel Petrovna Sorokina

Denis Stanislavovich Mamykin, Candidate of Technical Sciences

VNIIMS – Branch of Gorbatov Research Center for Food Systems, Uglich

CLUSTER ANALYSIS AS A TOOL FOR SELECTING STRAINS TO CREATE DIRECT-TO-FOOD STARTER CULTURES

The increase in acidity of dairy products during storage, caused by the post fermentation activity (PFA) of starter cultures, is an important problem for the modern dairy industry. A key biological solution is the targeted selection of natural isolates with reduced enzymatic activity, which makes it possible to ensure product quality stability and extend shelf life. This paper proposes a methodological approach to the systematization and selection of culture collection strains for developing direct to food starter cultures based on multivariate statistical analysis. The main tool for strain systematization in the proposed approach is hierarchical cluster analysis using Ward's method and the Euclidean distance metric to assess differences between strains, together with the equal interval method for preliminary data preprocessing and grouping. The effectiveness of applying multivariate statistical methods to classify strains according to a set of technologically relevant traits is justified. The developed approach enables the targeted formation of specific compositions of starter microorganisms with a controlled level of acidification, ensuring stable product acidity throughout the shelf life.

Keywords: *bacterial starter cultures, fermented dairy products, selection of starter cultures, post fermentation activity, Ward's method, Euclidean distance, equal interval method, hierarchical clustering.*

Funding: *The research was carried out with the support of the national project for ensuring technological leadership "New Materials and Chemistry", project FGUS 2025–0006.*

Ключевая роль в формировании и поддержании качественных характеристик ферментированных молочных продуктов на протяжении срока хранения принадлежит метаболическому потенциалу используемых заквасочных микроорганизмов.

В основе действия любой закваски лежат биохимические процессы, катализируемые молочнокислыми бактериями. Эти микроорганизмы осуществляют ферментативный гидролиз лактозы до глюкозы и галактозы с последующим превращением образовавшихся гексоз в молочную кислоту в процессе гликолиза, что приводит к снижению pH и образованию сгустка. Накопление молочной кислоты закономерно вызывает снижение pH среды, что наряду с образованием вторичных метаболитов (ацетальдегида, диацетила, ацетоина) определяет органолептический профиль,

реологические свойства, а также микробиологическую стабильность кисломолочных продуктов [1, 2].

Ферментативная активность заквасок варьирует в зависимости от штамма и состава среды для активации. Большинство молочнокислых бактерий продуцируют от 0,5 до 1,5 % молочной кислоты, отдельные штаммы – до 3 % за цикл ферментации, что влияет на скорость преобразования белковой фракции молока [3, 4].

Одной из значимых проблем современной молочной промышленности является постферментативная активность (ПФА) молочнокислых микроорганизмов. Под этим термином понимают их способность после охлаждения готового продукта продолжать медленный метаболизм остаточной лактозы с синтезом молочной кислоты. Данный процесс приводит к ухудшению органолептических показателей (возникновению излишне кислого вкуса), нарушению консистенции (в частности, развитию синерезиса) и, как следствие, – к сокращению сроков годности продукции. Особое значение проблема ПФА приобретает при производстве продуктов с длительными сроками хранения (более 14 суток), где даже незначительная остаточная активность заквасочной микробиоты может привести к выходу показателей кислотности за пределы, установленные нормативной документацией [5].

Согласно требованиям ГОСТ 31452–2012 [6] кислотность ферментированной молочной продукции, в частности, сметаны с массовой долей жира 10 % и 20 %, должна находиться в диапазоне от 65 до 100 °Т. Технологически оптимальным считается интервал от 70 до 90 °Т. Для обеспечения стабильности кислотности в указанном диапазоне на протяжении всего срока хранения, составляющего 14–30 суток и более, рекомендуется использовать закваски с пониженной постферментативной активностью.

Для решения проблемы ПФА в мировой практике разрабатываются и выпускаются специализированные заквасочные культуры с пониженной постферментативной активностью [7, 8]. Такие штаммы характеризуются замедленным метаболизмом после достижения заданного уровня кислотности за счет модифицированного транспорта углеводов или пониженной активности основных ферментов в диапазоне низких температур [9, 10].

В настоящее время в России ведутся активные разработки, нацеленные на создание заквасок прямого внесения с заданными технологическими характеристиками. Одной из профильных научно-исследовательских организаций, осуществляющих решение указанной задачи и реализующих прикладные исследования, в том числе в области биотехнологий, является ВНИИМС (филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН). Научно-производственная база института включает опытно-промышленное производство заквасок «Экспериментальная биофабрика», а также «Коллекцию молочнокислых бактерий для производства сычужных сыров и бактериофагов к ним», входящую в структуру Биоресурсного центра ФНЦ пищевых систем. Активные исследования и разработки в этой сфере также ведутся в других научных организациях, например, в ФГБНУ «ВНИМИ», Российском биотехнологическом университете («РОСБИОТЕХ»), Томском государственном университете (ТГУ), «Сириус» и др. Параллельно с научными исследованиями развивается промышленный сектор («Союзснаб», «Угличская биофабрика» и др.).

В рамках данной проблематики во ВНИИМС ведутся исследования по селекции природных изолятов с пониженной ферментативной активностью и комплексом технологически значимых свойств. Разрабатывается метод интегральной оценки культур для целенаправленного подбора штаммов для производства различных видов ферментированной молочной продукции. Реализация перечисленных исследовательских задач направлена на снижение импортной зависимости в сегменте заквасок, повышение качества готовой продукции, расширение ассортимента и оптимизацию технологических процессов молочной промышленности.

Традиционная стратегия подбора культур, ориентированная преимущественно на высокую скорость подкисления и отдельные технологические свойства, ограничивает биоразнообразие и снижает вероятность обнаружения штаммов с уникальной ферментативной активностью. Последовательный скрининг по отдельным признакам не позволяет учесть взаимосвязи между характеристиками и получить интегральную оценку технологического потенциала. Это требует применения более совершенных методов анализа многомерных данных [9, 11-13].

В качестве альтернативного и более эффективного способа предлагается использовать *методы многомерного статистического анализа*. Данный подход позволяет классифицировать заквасочные культуры по комплексу признаков, не предполагая заранее внутреннюю структуру данных. Это обеспечивает объективность и воспроизводимость результатов группировки. Использование методов многомерного статистического анализа успешно применяется в микробиологии для классификации и идентификации молочнокислых бактерий [14, 15].

При наличии выбросов или значительном объеме выборки целесообразно применять предварительную дискретизацию данных. Наиболее распространёнными подходами являются метод равных интервалов и правило Стерджеса, позволяющие преобразовать непрерывные признаки в порядковую шкалу, что снижает чувствительность к аномальным значениям и обеспечивает устойчивость последующей иерархической кластеризации. Предварительная дискретизация методом равных интервалов или применение правила Стерджеса создаёт основу для последующего кластерного анализа, уменьшая влияние выбросов и стандартизуя признаковое пространство [16].

Кластерный анализ представляет собой группу методов статистического анализа для проведения классификации объектов, направленных на выявление однородных кластеров в многомерном пространстве признаков. В контексте подбора заквасочных культур объектами классификации являются отдельные штаммы молочнокислых бактерий или их комбинации, а признаками – технологически значимые параметры:

- активность роста в молочной среде;
- величина и/или скорость кислотообразования;
- постферментативная активность при низких температурах (2–6 °С);
- газообразующая способность;
- продукция ароматообразующих соединений (диацетил, ацетоин);
- устойчивость к бактериофагам;
- антагонистическая активность.

В основе *иерархической кластеризации* лежит понятие расстояния между объектами. Чем ближе объекты в многомерном пространстве признаков, тем более вероятно их отнесение к одному кластеру. Процесс кластеризации управляется метриками расстояния и методами связи между кластерами.

Евклидово расстояние – наиболее распространённая метрика в кластерном анализе является одним из классических алгоритмов, предложенным Дж. Уордом, детально описанным в монографиях по многомерному анализу [17]. Выбор евклидовой метрики обусловлен тремя факторами: во-первых, она остаётся неизменной к линейным преобразованиям после предварительной стандартизации признаков; во-вторых, чувствительна к различиям по всем координатам, что позволяет учитывать весь спектр технологических характеристик; в-третьих, математически обоснована для использования с методом Уорда [18].

Перед вычислением евклидовых расстояний необходимо провести стандартизацию признаков. Это обусловлено тем, что переменные с широким диапазоном значений (например, временной интервал сквашивания от 4 до 12 часов) могут оказывать доминирующее влияние на переменные с более узким диапазоном (например, конечное значение кислотности от 70 до 100 °Т). Одним из наиболее распространённых методов стандартизации является z-стандартизация, включающая центрирование данных и нормирование их на среднеквадратичное отклонение [19].

Среди агломеративных иерархических алгоритмов *метод Уорда (Ward's method)* признаётся наиболее популярным для биотехнологических исследований. На каждом шаге он объединяет два кластера, дающих наименьшее увеличение суммы квадратов отклонений. Преимуществами метода являются: формирование компактных и сбалансированных кластеров, чёткая иерархия и совместимость с методом k-средних для валидации. Важным ограничением является то, что метод Уорда строго выведен для евклидовых расстояний и не должен применяться с другими метриками (например, Манхэттенским расстоянием или расстоянием Хи-квадрат), поскольку математическая строгость критерия минимизации внутриклассовой дисперсии обеспечивается именно для евклидова расстояния [19].

На основе изложенных теоретических положений предлагается следующий алгоритм многомерного кластерного анализа подбора штаммов для создания заквасок прямого внесения с пониженной ПФА:

- *формирование исходной выборки*: в анализ включаются штаммы из коллекционных фондов, выделенные из различных источников; определение параметра или набора технологически-значимых признаков для выборки штаммов;
- *предварительная обработка данных*: проведение дискретизации методом равных интервалов и/или с использованием правила Стерджеса;
- *кластерный анализ*: вычисление матрицы евклидовых расстояний между штаммами; проведение иерархической кластеризации методом Уорда; визуализация результатов в виде дендрограмм;
- *выбор числа кластеров и интерпретация*: определение оптимального числа кластеров на основе анализа дендрограмм;

- анализ профиля каждого кластера по исходным признакам: например, идентификация кластеров с низкой ПФА (прирост титруемой кислотности < 10 °Т, $\Delta \text{pH} < 0,3$ ед. за 14 суток хранения при 6 °С);
- формирование заквасочных композиций: отбор штаммов из целевого кластера (например, низкая ПФА) с дополнительными положительными свойствами (вязкость, синергетическая и газообразующая активность, фагоустойчивость);
- проверка антагонистических свойств;
- составление консорциумов.

Предложенный методологический подход, сочетающий иерархическую кластеризацию методом Уорда с использованием евклидовой метрики расстояния и дискретизацию методом равных интервалов представлен в экспериментальной части работы [20]. В рамках данного исследования проведена дифференцированная оценка ферментативной активности штаммов *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* (номера: 429-6, 463-3-6, 738-2-3, 792-7, 618-5, 549-1, 703-2, 637-4, 663-12) из «Коллекции молочнокислых бактерий для производства сычужных сыров и бактериофагов к ним» Биоресурсного центра ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН с целью разработки заквасок прямого внесения.

Подготовку культур и оценку кислотообразующей активности проводили культивированием в 10 % восстановленном стерильном обезжиренном молоке (СОМ) [21]. Инокулят вносили в объёме 3 % от 16-часовой молочной культуры. Титруемую кислотность молока определяли по ГОСТ Р 54669–2011 [22], активную кислотность – потенциометрическим методом с использованием рН-метра (погрешность $\pm 0,01$ ед. рН) [23].

Для моделирования многоступенчатых температурных режимов штаммы культивировали 6 ч при 30 °С, затем охлаждали 2 ч до 20 °С, после чего доохлаждали до 6 °С и хранили 21 сутки. Измерения кислотности проводили после ферментации, после охлаждения до 20 °С, после доохлаждения до 6 °С и далее – каждые 7 суток хранения.

Эксперименты проведены в трёх повторностях. Статистическую обработку данных осуществляли в среде R 4.3.1 с использованием пакетов *cluster*, *factoextra* и *ggplot2*; достоверность различий оценивали при уровне значимости $p < 0,05$.

В соответствии с предложенным алгоритмом первым этапом обработки данных стала дискретизация методом равных интервалов, направленная на предварительную классификацию штаммов по уровню кислотообразующей активности. На рис. 1 разделение штаммов *L. lactis* на кластеры выполнено на основе анализа изменения кислотообразующей активности в процессе ферментации и последующего охлаждения (технологически желательный признак для быстрого сквашивания).

Нумерация кластеров на рис. 1 и 2 осуществлена независимо в рамках каждого эксперимента. Совпадение цифровых обозначений не подразумевает идентичности кластеров, т.к. их выделение проведено на основании различных наборов технологических характеристик и отражает исключительно внутреннюю структуру данных конкретного эксперимента. В результате к первому кластеру в данном случае отнесены культуры с более низким уровнем кислотообразования, а к третьему классу – с самым высоким уровнем за период ферментации и охлаждения.

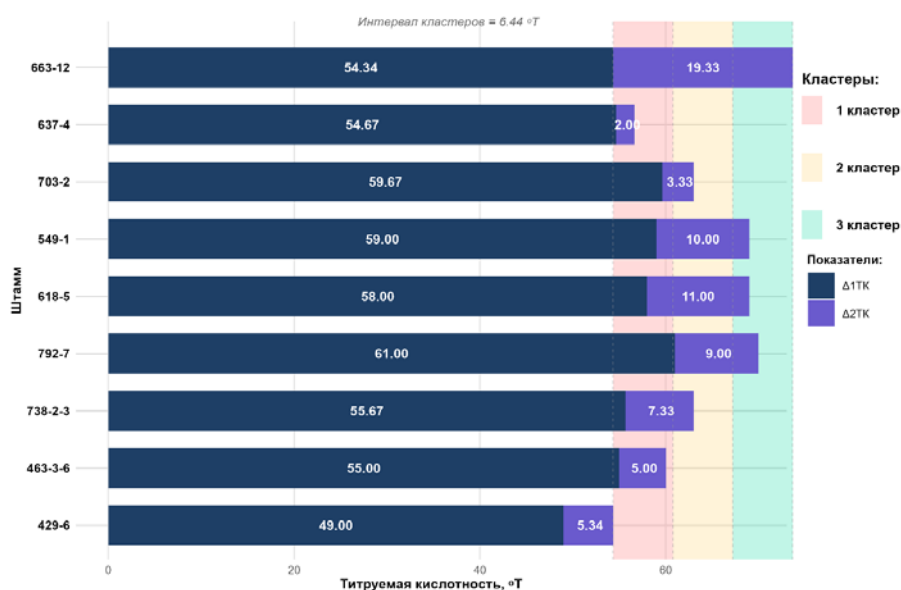


Рисунок 1. Прирост титруемой кислотности штаммов *L. lactis* в процессе ферментации и охлаждения:
 Δ1TK – за период ферментации;
 Δ2TK – за период охлаждения до (6 ± 1) °C.

На рис. 2 представлена динамика изменения титруемой кислотности в период длительного холодильного хранения коллекционных культур *L. lactis* в течение 21 суток при температуре (6 ± 1) °C.

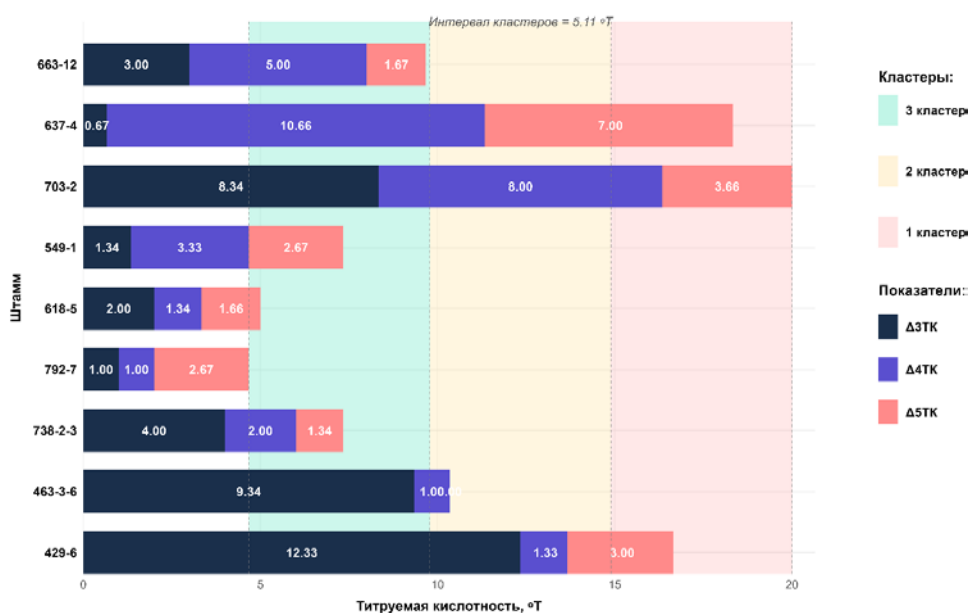


Рисунок 2. Прирост титруемой кислотности штаммов *L. lactis* в процессе хранения:
 Δ3TK – за период хранения 1–7 сут;
 Δ4TK – за период хранения 8–14 сут;
 Δ5TK – за период хранения 15–21 сут.

В данном случае кластеризация коллекционных штаммов лактококков выполнена по признаку постферментативной активности в процессе холодильного хранения (нежелательному признаку, который необходимо минимизировать). Поэтому, кластер 1 объединяет штаммы с высокой постферментативной активностью, а кластер 3 — с низкой. В частности, штаммы 549-1, 618-5 и 792-7 (кластер 3) демонстрировали низкую активность с первой недели и до конца хранения, причём штаммы 618-5 и 792-7 имели самый низкий уровень ацидофикации (4,67 и 5,00 °Т) за весь период.

Предварительная кластеризация методом равных интервалов, обладает очевидными преимуществами, но не позволяет в полной мере учитывать многообразие физиологических характеристик штаммов и выявлять тонкие различия в их метаболических профилях. В связи с этим для минимизации риска утраты технологически ценных культур, обладающих уникальными метаболическими свойствами, потребовалась реализация более совершенных методов многомерного статистического анализа. Для этой цели был применён иерархический кластерный анализ, основанный на алгоритме Уорда и евклидовой метрике расстояния. Данный подход позволил объективно сгруппировать штаммы по сходству физиологических профилей (рис. 3) и сохранить в выборке культуры, различающиеся по метаболической активности и обладающие потенциально ценными технологическими характеристиками для производства различных видов ферментированной молочной продукции.

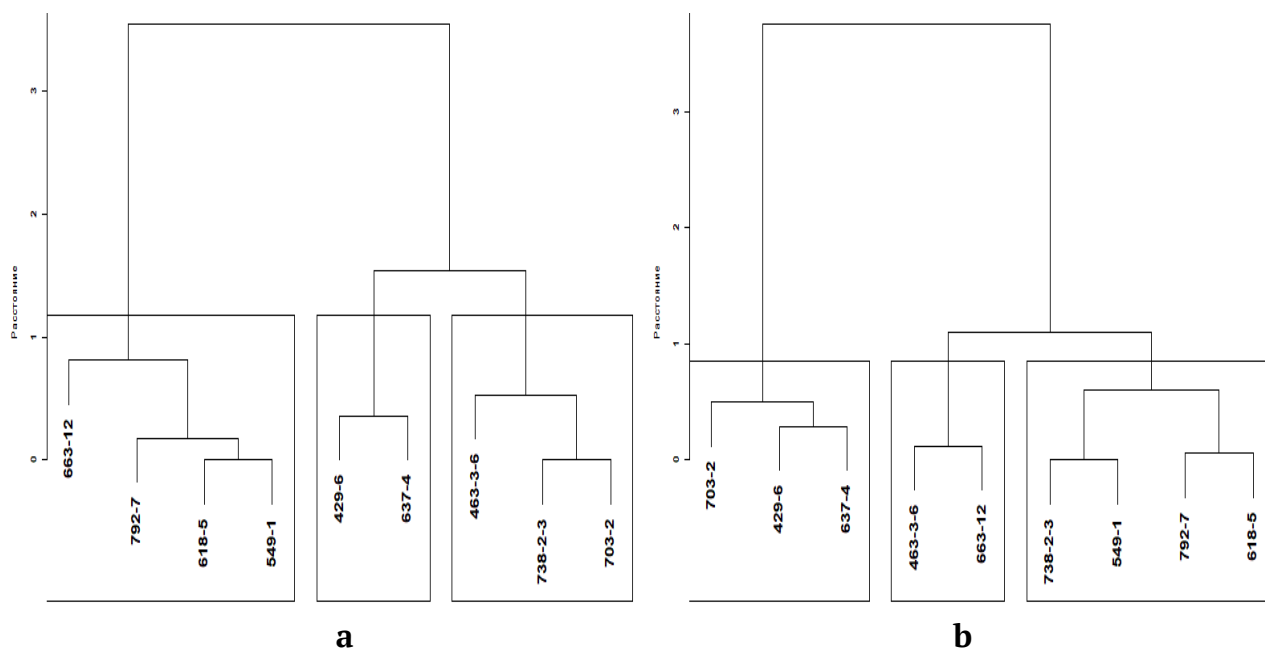


Рисунок 3. Дендрограммы результатов иерархической кластеризации:
 а – ΔВТХ – прирост титруемой кислотности во время выработки и охлаждения;
 б – ΔХТК – прирост титруемой кислотности во время хранения.

Согласно результатам кластерного анализа, штаммы 618-5 и 792-7 образуют обособленную группу, отличающуюся минимальным уровнем увеличения кислотности как в ходе ферментации, так и при последующем хранении. В данном исследовании

довании [20] доля культур активных кислотообразователей с низким уровнем пост-ферментации при хранении составила 3 штамма, что составляет 33 % от числа исследованных штаммов.

Экспериментальная апробация разработанного подхода на девяти штаммах *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* подтвердила его функциональность и применимость для дифференциации культур по степени ацидофикации. Предлагаемая методология скрининга позволяет повысить эффективность и воспроизводимость отбора штаммов благодаря объективному математическому обоснованию.

Для целенаправленного формирования заквасочных композиций оптимальной признана комбинация евклидовой метрики расстояния (с обязательной предварительной стандартизацией признаков) и метода Уорда, выступающего в качестве алгоритма иерархической кластеризации. Такое сочетание обеспечивает получение компактных и интерпретируемых кластеров и совместимо с методом k-средних, используемым для валидации.

Разработанный алгоритм отбора штаммов, включающий этапы формирования выборки, кластеризации, интерпретации кластеров и составления консорциумов, создаёт методологическую базу для целенаправленного конструирования заквасок прямого внесения с заданными свойствами, в том числе с пониженной пост-ферментативной активностью. Практическая реализация предложенного подхода позволит ускорить импортозамещение в сегменте специализированных заквасок для молочной промышленности, а также повысить стабильность качества отечественных ферментированных молочных продуктов.

Список использованной литературы:

1. **Leroy, F.** Lactic acid bacteria as functional starter cultures for the food fermentation industry / F. Leroy, L. De Vuyst // Trends in Food Science & Technology. 2004. Vol. 15. № 2. P. 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.004>
2. **Hutkins, R.W.** Microbiology and Technology of Fermented Foods / R.W. Hutkins. 2nd-ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2018 - 624 P. <https://doi.org/10.1002/9780470277515>
3. **Wang, Y.** Metabolism characteristics of lactic acid bacteria and the expanding applications in food industry / Y. Wang, J. Wu, M. Lv, Z. Shao, M. Hungwe, J. Wang [et al.] // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2021. Vol. 9. Article 612285. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.612285>
4. **Витушкина, М.А.** Заквасочные культуры для молочной промышленности / М.А. Витушкина // Вестник науки. 2021. № 1(34) [Электронный ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zakvasochnye-kultury-dlya-molochnoy-promyshlennosti> (дата обращения: 22.04.2026)
5. **Deshwal, G.K.** Review on factors affecting and control of post-acidification in yoghurt and related products / G.K. Deshwal, S. Tiwari, A. Kumar, R.K. Raman, S. Kadyan // Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 109. P. 499–512. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.057.6>
6. ГОСТ 31452–2012 «Сметана. Технические условия». М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.
7. **Abarquero, D.** Evaluation of technological properties and selection of wild lactic acid bacteria for starter culture development / D. Abarquero, C. Bueren, A. B. Flórez, B. Mayo // LWT – Food Science and Technology. 2022. Vol. 171. Article 114121. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114121>
8. Chr. Hansen launches the next generation of FreshQ® food cultures for fermentation-enabled bioprotection of dairy products [Press release] / Chr. Hansen // Novonesis. 2021. 28 April. URL: <https://www.novonesis.com/en/news/chr-hansen-launches-next-generation-freshq-food-cultures-fermentation-enabled-bioprotection-dairy-products> (дата обращения: 24.04.2026).

9. **Piraino, P.** Use of unsupervised and supervised artificial neural networks for the identification of lactic acid bacteria on the basis of SDS-PAGE patterns of whole cell proteins / P. Piraino, A. Ricciardi, G. Salzano, T. Zotta, E. Parente // Journal of Microbiological Methods. 2006. 66(2). P. 336–346. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2005.12.007>
10. **Wong, A.** Novonesis brings you Bioprotection in Fermented Milk [Electronic resource] / A. Wong // LinkedIn. 2024. 31 August. URL: https://www.linkedin.com/posts/amyewongmy_novonesis-freshq-culture-activity-7236072976813596672-pSoK (дата обращения: 24.04.2026).
11. **Fortina, M.G.** Effectiveness of Chemometric Techniques in Discrimination of *Lactobacillus helveticus* Biotypes from Natural Dairy Starter Cultures on the Basis of Phenotypic Characteristics / M.G. Fortina, P.L. Manachini, A. Rossi, C. Prati, C. Parini // Applied and Environmental Microbiology. 1999. 65(4). P. 1450–1454. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.4.1450-1454.1999>
12. **Treguier, S.** Identification of lactic acid bacteria *Enterococcus* and *Lactococcus* by near-infrared spectroscopy and multivariate classification / S. Treguier, C. Couderc, H. Tormo, D. Kleiber, C. Levasseur–Garcia // Journal of Microbiological Methods. 2019. 165. Article 105693. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2019.10569313>
13. **Усманов, Р.Р.** Основы научных исследований в биотехнологии (с расчетами в программе Excel): учебно-практическое пособие / Р. Р. Усманов. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2022. – 122 с.
14. **Балыклов, Н.С.** Кластерный анализ / Н.С. Балыклов, В.Н. Дятлов, К.К. Хисамова [и др.] // Научный альманах. 2017. № 5–3 (31). С. 35–38. <https://doi.org/10.17117/na.2017.05.03.035.23>
15. **Воронцов, К.В.** Алгоритмы кластеризации и многомерного шкалирования: курс лекций / К.В. Воронцов. М.: МГУ, 2007 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ccas.ru/voron/download/Clustering.pdf> (дата обращения: 05.05.2026)
16. **Sturges, H.** The choice of a class–interval / H. Sturges // Journal of the American Statistical Association. 1926. 21(153). P. 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161.14>
17. **Дюран, Б.** Кластерный анализ / Б. Дюран, П. Оделл; пер. с англ. Е.З. Демиденко; под ред. А.Я. Боярского. М.: Статистика, 1977. – 128 с.
18. **Ward, J. H.** Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function / J.H. Ward // Journal of the American Statistical Association. 1963. № 58(301). P. 236–244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
19. **Афонин, П. Н.** Статистический анализ с применением современных программных средств: учебное пособие / П. Н. Афонин, Д. Н. Афонин. СПб.: Интермедия, 2017. - 100 с.
20. **Дуганова, А.Ю.** Дифференцированная оценка ферментативной активности *Lactococcus* для создания заквасок прямого внесения / А.Ю. Дуганова, Н.П. Сорокина, Д.С. Мамыкин [и др.] // Пищевые системы. 2025. Т. 8. № 4. С. 566–575. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-4-566-575>
21. ГОСТ 52791–2007 «Консервы молочные. Молоко сухое. Технические условия». М.: Стандартиформ, 2008. – 10 с.
22. ГОСТ Р 54669–2011 «Молоко и продукты переработки молока. Методы определения кислотности». М.: Стандартиформ, 2013. - 10 с
23. ГОСТ 32892–2014 «Молоко и молочная продукция. Метод измерения активной кислотности». М.: Стандартиформ, 2015. - 10 с.