

Е.А. Йылдырым^{1,2} ✉

В.А. Филиппова^{1,2}

К.А. Соколова^{1,2}

Е.А. Корочкина³

Е.Ю. Финагеев³

М.А. Шубина³

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

²ООО «БИОТРОФ+», Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины, Санкт-Петербург, Россия

✉ deniz@biotrof.ru

Поступила в редакцию: 05.08.2025

Одобрена после рецензирования: 11.12.2025

Принята к публикации: 26.12.2025

© Йылдырым Е.А., Филиппова В.А., Соколова К.А., Корочкина Е.А., Финагеев Е.Ю., Шубина М.А.

Elena A. Yildirim^{1,2} ✉

Valentina A. Filippova^{1,2}

Ksenya A. Sokolova^{1,2}

Elena A. Korochkina³

Evgeny Yu. Finageev³

Maria A. Shubina³

¹Saint Petersburg State Agrarian University, Pushkin, Saint Petersburg, Russia

²“BIOTROF” Ltd, Saint Petersburg, Russia

³Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine, Saint Petersburg, Russia

✉ deniz@biotrof.ru

Received by the editorial office: 05.08.2025

Accepted in revised: 11.12.2025

Accepted for publication: 26.12.2025

© Yildirim E.A., Filippova V.A., Sokolova K.A., Korochkina E.A., Finageev E.Yu., Shubina M.A.

Микробиом семенной жидкости *Bos taurus*: таксономическое разнообразие, влияние на фертильность и потенциал пробиотической модуляции

РЕЗЮМЕ

Актуальность исследования микробиома спермы быков обусловлена высокой значимостью воспроизводства в животноводстве, проблемами контаминации семени патогенами и необходимостью повышения эффективности искусственного осеменения. Представлен обзор таксономических групп микроорганизмов, присутствующих в семенной жидкости быков-производителей. В обзоре освещены причины низкой исследованности микробиоты семени быков, сфокусировано внимание на преимуществах современных молекулярных технологий, таких как секвенирование 16S рПНК, позволяющих точнее определить спектр микроорганизмов и исследовать их роль в репродуктивной системе. Отмечено разнообразие микробиоты, включающей филумы *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria* и *Fusobacteria*, представители которых, по всей вероятности, способны оказывать разнообразное влияние на качество семени и фертильность. Доказано, что, несмотря на установленное влияние микробиома репродуктивной системы на фертильность и качество спермы, подтвержденное исследованиями на людях и других видах продуктивных животных, на сегодняшний день отсутствуют специальные научные публикации, детально рассматривающие роль микробиома семени именно у быков и его влияние на соответствующие репродуктивные показатели. В обзоре рассмотрены внешние факторы, влияющие на состав микробиома, такие как кормление, сезон года и условия содержания животных. Сделан вывод, что использование пробиотиков в кормлении быков-производителей является перспективным направлением и экологически безопасным способом оптимизации микробиоты и улучшения репродуктивной функции, повышающий качество семени и фертильность и снижающий потребность в антибиотиках.

Ключевые слова: семенная жидкость, микробиота, быки-производители, фертильность, пробиотики, NGS-секвенирование, 16S рПНК, высевы на питательные среды

Для цитирования: Йылдырым Е.А., Филиппова В.А., Соколова К.А., Корочкина Е.А., Финагеев Е.Ю., Шубина М.А. Микробиом семенной жидкости *Bos taurus*: таксономическое разнообразие, влияние на фертильность и потенциал пробиотической модуляции. *Аграрная наука*. 2026; 402(01): 51–61.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-402-01-51-61>

Semen liquid microbiome of *Bos taurus*: taxonomic diversity, impact on fertility, and potential for probiotic modulation

ABSTRACT

The relevance of studying the microbiome of bull semen is due to the high importance of reproduction in animal husbandry, the problems of semen contamination with pathogens, and the need to improve the efficiency of artificial insemination. This review provides an overview of the taxonomic groups of microorganisms present in the seminal fluid of bulls. The review highlights the reasons for the limited research on the microbiota of bull semen and focuses on the advantages of modern molecular technologies, such as 16S rRNA sequencing, which allow for a more accurate determination of the microbial spectrum and their role in the reproductive system. The microbiota is diverse, including the phyla *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, and *Fusobacteria*, which are likely to have a variety of effects on seed quality and fertility. It has been proven that despite the established influence of the reproductive system microbiome on fertility and sperm quality, which has been confirmed by studies on humans and other species of productive animals, there are currently no specific scientific publications that examine in detail the role of the seminal microbiome in bulls and its impact on relevant reproductive indicators. This review explores the external factors that influence the composition of the microbiome, such as feeding, season, and animal management practices. It was concluded that the use of probiotics in the feeding of bulls is a promising and environmentally friendly way to optimize the microbiota and improve reproductive function, increasing the quality of semen and fertility and reducing the need for antibiotics.

Key words: seminal fluid, microbiota, bulls, fertility, probiotics, NGS-sequencing, 16S rRNA, culture media

For citation: Yildirim E.A., Filippova V.A., Sokolova K.A., Korochkina E.A., Finageev E.Yu., Shubina M.A. Semen liquid microbiome of *Bos taurus*: taxonomic diversity, impact on fertility, and potential for probiotic modulation. *Agrarian science*. 2026; 402(01): 51–61 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-402-01-51-61>

Введение/Introduction

Высокая экономическая значимость животноводства, обусловленная необходимостью обеспечения продовольственной безопасности, требует постоянного совершенствования технологий воспроизводства. Качество семени быков, как ключевой фактор успешного искусственного осеменения, напрямую влияет на продуктивность и генетический потенциал стада [1].

Искусственное осеменение (ИО) — наиболее распространенная вспомогательная репродуктивная технология, позволяющая эффективно использовать генетический потенциал ценных самцов для селекционного улучшения стада [2]. Однако одним из критических факторов, негативно влияющих на результативность ИО, является контаминация семенной жидкости патогенными микроорганизмами, что в конечном счете приводит к снижению фертильности [3].

С целью сохранения оплодотворяющей способности спермы в течение длительного периода времени в разбавители добавляют antimicrobные препараты. Тем не менее результаты предыдущих исследований свидетельствуют, что antimicrobные компоненты, входящие в состав сред для криоконсервации, не всегда обеспечивают полную инактивацию всех микроорганизмов-контаминантов.

D. Zampieri и соавт. [4] выявили наличие микроорганизмов (*Citrobacter freundii*, *Enterobacter spp.*, (например, *kobei*, *asburiae*, *hormaechei*), *Stenotrophomonas maltophilia*, *Enterococcus faecium* и *Candida parapsilosis*) в разбавленной сперме с содержанием антибиотиков. То есть многие патогенные микроорганизмы устойчивы к антибиотикам, добавляемым в разбавители спермы для скота.

Исследование A.A. Reda и соавт. [5] показало, что гентамицин, тилозин, спектиномицин и линкомицин не подавляли рост бактерий в семенной жидкости быков. Продемонстрировано, что хранение спермы в течение пяти дней в присутствии антибиотиков может приводить к увеличению численности определенных таксонов бактерий, что коррелирует со снижением подвижности сперматозоидов [6].

С другой стороны, в контексте растущего понимания сложной роли микробиома в различных физиологических процессах, включая репродуктивную функцию [7], изучение микробного сообщества семенников у быков приобретает особую актуальность. Растущий интерес к микробиому различных экосистем — от кишечника до кожи — обусловлен его доказанным влиянием на здоровье хозяина. Репродуктивный тракт не является исключением, и его микробиом всё больше рассматривается как важный фактор, влияющий на фертильность и общее состояние организма.

В связи с этим детальное изучение микробиома семени быков является важным шагом к оптимизации репродуктивных технологий и повышению эффективности скотоводства. Систематизация

и анализ современных знаний о микробиоме семенников быков представляют собой актуальную задачу, результаты которой могут быть использованы для разработки новых стратегий улучшения качества семени, повышения эффективности искусственного осеменения и обеспечения здоровья потомства.

Данный обзор направлен на обобщение и критический анализ современных исследований в области микробиома семенников быков, что позволит выявить перспективные направления для дальнейших исследований и разработки практических приложений в животноводстве, в частности применения пробиотических кормовых добавок.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Настоящий обзор основан на анализе научной литературы, доступной в международных базах данных, таких как PubMed, Scopus, Web of Science и других. Использовали российские базы данных eLibrary и CyberLeninka. Поиск проводили по ключевым словам на английском и русском языках: «семенная жидкость», «микробиом», «бык», *Bos taurus*, «фертильность», «пробиотики», «NGS-секвенирование», 16S рПНК, «высевы на питательные среды».

Глубина поиска охватывает период последних 15 лет — начиная с 2010 года. Такой выбор временного диапазона объясняется стремительным развитием методов анализа микробиома с помощью молекулярно-генетических методов и возрастающим интересом научного сообщества к проблемам фертильности животных в условиях современного животноводства.

Рассматривали как фундаментальные теоретические работы, так и прикладные исследования, направленные на разработку практических рекомендаций для производителей. Приоритет отдавали публикациям, представляющим оригинальные эмпирические данные, аналитические обзоры и метаанализы. Предпочтение отдавали работам, использующим современные технологии молекулярно-биологического анализа, такие как секвенирование 16S рПНК, позволяющие подробно охарактеризовать микробиоту семенной жидкости. Учитывали публикации, содержащие достоверные статистические оценки и подтверждающие результаты многократными повторениями экспериментов. Включали исследования, предлагающие практические рекомендации для управления процессом воспроизводства крупного рогатого скота.

По результатам первичного отбора был проведен дополнительный отбор публикаций, исключивших дублирование результатов и устаревшие или неполные исследования. Таким образом, сформирована выборка публикаций, отражающая современное научное представление о микробиоме семенной жидкости *Bos taurus* и перспективах его модификации с использованием пробиотиков.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Основные таксономические группы микроорганизмов, обнаруженных в семенниках быков

До недавнего времени выделение и идентификацию бактерий в семенной жидкости быков проводили только в тех случаях, когда присутствовали клинические признаки репродуктивного заболевания или когда качество семени конкретного быка снижалось в течение длительного периода времени [8]. Существуют множество причин, по которым не проводились широкие исследования семенной микробиоты здоровых быков или поиск возможных связей между микробиотой спермы и ее качеством. Прежде всего, как уже было сказано, согласно национальным и международным нормам (EUR-Lex, Директива Совета от 14 июня 1988 года № 88/407/ЕЕС¹) в разбавители спермы добавляются антибиотики. Ранее считалось, что антибиотики эффективно подавляют рост и размножение бактерий, тем не менее современные исследования показывают, что некоторые виды микроорганизмов способны проявлять устойчивость к таким препаратам [9]. Это обстоятельство вызывает необходимость переосмысления подхода к контролю бактериальной микробиоты семенной жидкости, поскольку наличие резистентных штаммов может негативно сказываться на качестве спермы и, соответственно, фертильности быков.

Другая важная причина недостаточного внимания к изучению микробиоты семенной жидкости связана с техническими трудностями традиционных методик выделения и идентификации бактерий. Культивирование микроорганизмов требует значительных временных затрат, кроме того, далеко не все представители микробиоты поддаются культивированию стандартными лабораторными методами. Это существенно ограничивает возможности исследователей, оставляя вне поля зрения значительное число потенциально значимых микроорганизмов, присутствующих в семенной жидкости быков [10].

Однако ситуация начала меняться благодаря развитию современных молекулярных технологий, среди которых особое значение приобрело секвенирование ДНК, в частности последовательностей гена 16S рРНК. Этот метод позволяет точно идентифицировать микроорганизмы даже тогда, когда традиционные методы культивации оказываются неэффективными. Традиционные методики выявления микроорганизмов указывали на присутствие в семенной жидкости таких микроорганизмов, как *Corinebacterium*, *Staphylococcus*, *Micrococcus*, *Bacillus*, *Escherichia coli*, *Proteus*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Streptococcus*, *Citrobacter*, *Enterobacter* и *Stentrophomonas* [5].

Благодаря использованию секвенирования была значительно расширена база знаний о

составе и разнообразии микробиоты семенников и зякулята быков и других сельскохозяйственных животных, включая выявление новых видов бактерий [11]. В ряде научных работ исследован состав микробиома слизистой оболочки препуция быков [12], микробиоты семени [13], а также связь микробиоты с характеристиками качества семенной жидкости [14] и успешностью процесса оплодотворения [15].

Микробиом семенной жидкости характеризуется видоспецифическим составом, отличным от микробиоты кишечника и влагалища. Метагеномный анализ спермы быков выявил преобладание следующих филумов: *Proteobacteria*, *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria* и *Fusobacteria* [16]. Каждый из этих филумов представлен гетерогенным набором родов и видов, который может потенциально оказывать дифференцированное воздействие на качество спермы, фертильность и общее репродуктивное здоровье быков-производителей. В частности, *Proteobacteria*, будучи наиболее многочисленным и таксономически разнообразным филумом, включает как комменсальные (участвующие в обеспечении организма энергией и питательными веществами) [17], так и потенциально патогенные виды (ассоциированные с воспалительными процессами в половых путях и ухудшением качества спермы) [18]. Так, установлено, что *Pseudomonas aeruginosa* обладает способностью к формированию биопленок и вызывает хронические инфекции, а его присутствие в сперме может приводить к нарушению акросомной реакции и снижению оплодотворяющей способности сперматозоидов [19]. В свою очередь, *Bacteroidetes*, филум грамотрицательных бактерий, широко представлен в различных экосистемах, включая кишечный тракт [21]. Однако *Bacteroidetes*, как и многие другие представители микробиоты спермы, требуют изучения в контексте их роли в микробиоме семенной жидкости.

Доминирующими родами в семенной жидкости быков оказались *Camilobacter*, *Cutinobacterium*, *Fusobacterium*, *Histophilus*, *Porphyromonas* и *Staphylococcus* [12]. Важно отметить, что такие бактерии, как *Porphyromonas* и *Fusobacterium*, обнаруженные в больших количествах в препуциальной среде быков породы герефорд, ассоциируются с различными заболеваниями животных, включая хромоту и эндометриты [21].

В образцах семени быков-производителей словацкой голштино-фризской породы было установлено значительное содержание бактерий, относящихся к родам *Pseudochrobactrum*, *Achromobacter*, семейству *Enterobacteriaceae* и порядку *Lactobacillales*. Поскольку детальные сведения о микробиоме бычьего семени ограничены, представляется целесообразным отметить, что согласно исследованиям на людях бактерия

¹ Council Directive 88/407/EEC of 14 June 1988 laying down the animal health requirements applicable to intra Community trade in and imports of deep-frozen semen of domestic animals of the bovine species. OJ L 194. 22.07.1988; 10–23.
Доступно по адресу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1988/407/oj/eng>

Pseudochrobactrum saccharolyticum была обнаружена в семенной жидкости пациентов с диагнозом рака простаты или доброкачественной гиперплазии предстательной железы [22].

Семейство *Enterobacteriaceae* рассматривается как один из основных контаминантов спермы, присутствие которого потенциально связано со снижением концентрации и подвижности сперматозоидов, а также увеличением доли сперматозоидов с поврежденной плазматической мембраной или акросомой [23]. Согласно данным [24], род *Achromobacter* может оказывать негативное влияние на успешность оплодотворения. В отличие от вышеупомянутых таксонов, представители порядка *Lactobacillales* рассматриваются в качестве индикаторов здорового микробиома урогенитального тракта человека и характерны для нормоспермии [25].

Факторы, влияющие на состав микробиома семенников

Изменения в окружающей среде могут приводить к изменениям в составе микробиоты семенников. Одним из ключевых детерминантов структуры микробиома семенной жидкости является генетический фактор. Различные виды сельскохозяйственных животных демонстрируют выраженные различия в составе микробиоты семени. Сходно с данными, полученными для спермы быков, доминирующими филумами у баранов, кроликов и свиней являются *Proteobacteria* и *Firmicutes*, хотя относительное содержание этих филумов варьирует (31,2–57,5%) в зависимости от вида [26, 27].

Филум *Actinobacteria* присутствует у всех исследованных видов, демонстрируя переменное относительное обилие (3,4–22%). *Bacteroidetes* является первым, третьим и четвертым по распространенности филумом у жеребцов [28], свиней [27] и кроликов [29] соответственно. Можно предположить, что наблюдаемые межвидовые различия в составе микробиоты обусловлены наследственными особенностями иммунной системы, метаболизма и физиологических характеристик. Кроме того, виды с повышенной восприимчивостью к инфекционным заболеваниям могут демонстрировать повышенное содержание патогенных микроорганизмов в микробиоме спермы, что в свою очередь может негативно влиять на качество спермы и ее фертильность. Внешние факторы окружающей среды оказывают влияние на формирование и динамику состава микробиома семенной жидкости. К числу основных внешних воздействий относятся климатические условия, сезон года, особенности рациона кормления и способы содержания животных [30, 31].

Так, было установлено, что температура окружающей среды, влажность воздуха и количество осадков существенно влияют на количественный и качественный состав микробиома семени сельскохозяйственных животных. Например, в семенной жидкости быков различных пород

наблюдаются сезонные вариации относительно численности основных бактериальных филумов [32]. Подобным образом изменяется и микробиоценоз спермы баранов [33], коз [34] и буйволов [35], что подчеркивает необходимость учитывать климатические условия при диагностике заболеваний репродуктивной системы. На примере коз продемонстрировано наличие у животных четких временных рамок воспроизводства, контролируемых фотопериодом [36].

Исследования, проведенные на свиньях, для которых нехарактерно описанное явление, показывают значительное изменение состава микробиоты спермы в зависимости от сезона: зимой наблюдается больше разнообразия бактерий, причем наличие *Lactobacillus* ассоциируется с положительными показателями качества семени, тогда как рост *Pseudomonas* снижает его качество [27]. Это подтверждает гипотезу о том, что смена сезонов оказывает непосредственное воздействие на состав микробиоты семени даже у животных с нерегулярной сезонностью размножения.

Условия содержания животных, такие как гигиена помещения, вентиляция и частота уборки, имеют важное значение для распространения и многообразия бактерий в семенной жидкости [31]. Высокая плотность размещения животных способствует распространению инфекций и снижению реализации репродуктивного потенциала. Кроме того, рацион кормления, по всей видимости, способен оказать влияние не только на состав микробиоты пищеварительной, но и репродуктивной системы [37]. Несбалансированное кормление может усилить развитие инфекционных процессов, нарушить гормональный фон, снижая продукцию здоровых сперматозоидов [38]. Однако, несмотря на очевидную значимость микробиома семени, на сегодняшний день отсутствуют научные публикации, посвященные исследованию влияния состава рациона на структуру микробиома семени быков.

Инфекции репродуктивной системы вызывают увеличение концентрации грамотрицательных бактерий, таких как *Escherichia coli*, способствующих воспалительным процессам и уменьшению активности сперматозоидов. В семенной жидкости быков с низкой фертильностью увеличивается содержание родов *W5053* и *Lawsonella* [15]. Поэтому контроль над состоянием инфекций репродуктивной системы является необходимым условием повышения эффективности воспроизводства.

Таким образом, понимание механизмов формирования микробиома спермы открывает новые возможности для профилактики и лечения болезней репродуктивной системы животных. Инновационные подходы, сочетающие экологический мониторинг, рациональное кормление и передовые биотехнологии, позволят повысить эффективность разведения и сократить финансовые издержки отрасли.

Влияние микробиома на качество семени и фертильность

Несмотря на значительный прогресс в изучении микробиома млекопитающих, формирование единого представления о точном составе и функциональных особенностях микробиоты спермы остается актуальным вопросом для современной науки [39]. До настоящего момента ученые не пришли к единому мнению о конкретных микроорганизмах, определяющих качество семени и обеспечивающих оптимальные условия для воспроизведения потомства.

Одной из ключевых проблем, затрудняющих достижение однозначных выводов, является явление бактериоспермии — присутствия различных видов бактерий в сперме, которое отрицательно воздействует на качество гамет и может приводить к снижению фертильности [14]. Присутствие бактерий в образце спермы создает ряд неблагоприятных условий, поскольку некоторые виды могут вступать в конкуренцию со сперматозоидами за доступные ресурсы, выделяя метаболиты и токсичные соединения, способные повредить клетки и ухудшить функциональные характеристики спермы [40]. Например, доказано, что определенные типы бактерий способны производить ферменты фосфолипазы, атакующие клеточные мембраны сперматозоидов и повреждающие структурные компоненты мембран, необходимые для успешной реализации оплодотворения [41].

Другие бактерии, присутствуя в эякуляте, ухудшают качество семени посредством разрушения целостности плазматической мембраны клеток, нарушения стабильности головки сперматозоида и уменьшения общей жизнеспособности сперматозоидов [39]. Кроме того, многие исследования указывают на негативную связь между наличием определенных типов бактерий и ключевыми параметрами качества семени, такими как подвижность сперматозоидов, целостность мембран, акросомальная реакция и уровень фрагментации ДНК [42–44].

Наличие патогенных микроорганизмов в семенной жидкости служит одним из источников послеродовых заболеваний матки [45]. Развитие данного сценария имеет следующие негативные последствия: инфицирование самки при проведении осеменения, нарушение полового цикла, гибель эмбриона или плода, снижение выхода телят [46].

Хотя механизмы взаимодействия микробиоты семени с организмом хозяина остаются предметом активных дискуссий, существуют доказательства того, что бактериальное сообщество семенников может играть значительную роль в поддержании репродуктивной функции самцов. Например, изучение состава бактериального сообщества спермы человека выявило существенные различия в составе бактерий у фертильных и бесплодных мужчин, демонстрируя, что

отдельные группы бактерий могут как позитивно, так и негативно сказываться на показателях фертильности [47].

Ряд исследователей сообщают о положительном влиянии представителей рода *Lactobacillus* на морфологическую структуру сперматозоидов и защиту от негативного влияния условно-патогенных микроорганизмов [25]. Напротив, *Enterococcus faecalis* — часто встречаемый вид (11,6% образцов спермы), оказывающий отрицательное влияние на морфофункциональную структуру сперматозоидов человека [48].

Однако объем научных исследований в области ветеринарии, посвященных влиянию микробиома спермы на репродуктивные функции сельскохозяйственных животных, остается ограниченным [49]. Несмотря на накопленные знания о взаимодействии бактериального сообщества спермы с репродуктивными функциями у человека, информация об аналогичном процессе у животных требует дополнительного изучения.

Подводя итог, можно сказать, что дальнейшие научные изыскания необходимы для полного понимания роли микробиоты семенной жидкости в формировании репродуктивной функции у животных и выявления потенциальных терапевтических подходов для улучшения фертильности.

Перспективы пробиотической регуляции

В последнее время управление микробиотой кишечника и рубца продуктивных животных и птиц путем добавления пробиотиков и пребиотиков в рацион с целью снижения применения антибиотиков и химических лекарственных средств рассматривается как более «естественная» концепция, направленная на гармонизацию собственных регуляторных систем [50]. В то же время взаимосвязь в функционировании организма хозяина и его микробиома как единой системы известна давно. Действие пробиотиков не ограничивается областью пищеварительной системы. Микробиота пищеварительной системы рассматривается как обширный «эндокринный орган» хозяина [51].

Метаболиты, вырабатываемые микробиотой, такие как короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК), полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), липополисахариды (ЛПС) и витамины играют важнейшую роль в регулировании метаболизма хозяина, иммунологических, метаболических и неврологических функциях [52].

Отсутствие систематических исследований микробиома бычьего семени вынуждает обратиться к имеющимся данным о микробиоме семени других сельскохозяйственных животных, а также человека. Показано, что микробиота пищеварительной системы может улучшать сперматогенез и подвижность сперматозоидов у мужчин, а также влияет на бесплодие [53]. Таксофолин, вводимый в рацион хряков породы дюрков, улучшил качество спермы, воздействуя на микробов в кишечнике и метаболиты в крови [54]. Кишечные

лактобактерии, бифидобактерии и энтерококки могут улучшать качество спермы, уменьшая воспалительную реакцию [55].

С другой стороны, дисбактериоз кишечника может нарушать репродуктивную функцию. Микробиота кишечника и ее метаболиты могут активировать аномальные иммунные сигналы с помощью липополисахаридов, связываться с комплексами TLR-24 и увеличивать выработку провоспалительных цитокинов и активных форм кислорода (азота) [56], а также участвовать в повреждении семенников, вызванном воспалением [57].

Известно, что муколитические бактерии, такие как *Bacteroides caccae* и *Akkermansia muciniphila*, повышают активность ферментов, расщепляющих муцин, и используют гликопротеины слизи, выделяемые организмом хозяина, в качестве источника питания, что приводит к разрушению слизистого барьера толстой кишки [58]. Структурные повреждения кишечного барьера приводят к повышенной транслокации липополисахаридов [59], что приводит к воспалению, нарушению обмена веществ, эндокринным изменениям и резистентности к инсулину, которые негативно влияют на сперматогенез [60].

Кишечная бактерия *Prevotellacopri* считается возможной причиной нарушений сперматогенеза [61]. Полученные результаты свидетельствуют о потенциальной ассоциации между кишечной микробиотой и качеством спермы, что позволяет предполагать возможность дальнейшей экстраполяции на исследования, проводимые на быках. Пробиотические добавки показали эффективность на млекопитающих для восстановления нарушений сперматогенеза [55]. Большинство эффектов опосредованы метаболитами, вырабатываемыми микробиотой кишечника. Было доказано, что кишечная микробиота может повышать уровень триптофана в сыворотке крови и центральной нервной системе [62].

Существует предположение, что метаболит 5-HT, синтезируемый в результате взаимодействия эндотелиальных клеток и микробиоты кишечника, является важным фактором, который может проникать в семенники через кровотоки, оказывая влияние на подвижность сперматозоидов путем регулирования Ca^{2+} . Полиненасыщенные жирные кислоты, образуемые кишечной микробиотой, влияют на стабильность мембраны сперматозоидов, подвижность сперматозоидов, реакцию акросомы и синтез половых гормонов, а также повышают противовоспалительную и антиоксидантную способность клеток семенников.

Метаболиты кишечной микробиоты способствуют снабжению сперматозоидов энергией. Ткань семенников — это гипоксический орган, который в качестве энергетического субстрата в первую очередь использует лактат, вырабатываемый в результате гликолиза в клетках Сертоли [63]. Микробиота кишечника и ее метаболиты могут способствовать гликолизу для поддержания

энергоснабжения сперматозоидов и повышения их подвижности. Например, добавление лейцина в корм улучшало среднюю скорость изгиба сперматозоидов у хряков [64]. Кроме того, показано, что *Bacteroides*, *Streptococcaceae*, *Akkermansia* улучшают энергоснабжение сперматидных клеток за счет улучшения гликолиза [65].

Используя трансплантацию фекальной микробиоты от мышей, исследователи наблюдали, что у мышей-реципиентов наблюдались значительное увеличение провоспалительных цитокинов в придатке семенников, снижение сперматогенеза и подвижности сперматозоидов. Исследователи обнаружили, что кишечные бактерии тесно связаны с половыми гормонами, особенно тестостероном [66].

Полученные данные демонстрируют тесную связь между дисбиозом микробиоты и снижением фертильности. Использование пробиотиков на основе *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Enterococcus*, *Collinsella* и *Blautia* улучшало качество спермы, смягчая воспалительную реакцию и окислительный стресс [67]. Это может быть связано с тем, что пробиотики способны регулировать сигнальный путь Nrf2-Kear1-ARE, связанный с повышением антиоксидантной активности и усилением нейтрализации активных форм кислорода, что в конечном итоге приводит к улучшению концентрации и подвижности сперматозоидов [67]. Штаммы *L. rhamnosus* NCDC 610 и *L. fermentum* NCDC 400 были предложены в качестве альтернатив фармацевтическим препаратам из-за их положительного влияния на способность повышать уровень эндогенного тестостерона [68].

Наблюдаемое [69] улучшение концентрации сперматозоидов у самцов бройлеров, получавших *Bacillus amyloliquefaciens* TOA5001, могло быть связано с более эффективным усвоением питательных веществ желудочно-кишечным трактом. Кроме того, на фоне пробиотика был обнаружен высокий уровень глутатионпероксидазы GSH-Px в семенниках. Известно, что данный белок действует как мощный антиоксидант при развитии сперматид и сперматозоидов.

Исследования продемонстрировали эффективность пробиотиков в решении проблем бесплодия у мужчин, фертильности у хряков и бройлеров, поэтому их значительный терапевтический потенциал для разработки средств профилактики проблем с фертильностью быков не следует упускать из виду. Методы управления поголовьем быков, например кормление, использование кормовых добавок, включая пробиотики, может способствовать повышению качества семени и репродуктивного потенциала быков. Специфические дозы определенных штаммов пробиотиков могут модулировать микробиоту семенников в направлении более здорового состояния, то есть восстанавливать состояние эубиоза, а также улучшать фертильность.

Выводы/Conclusions

Таким образом, микробиота семенников быков представляет собой слабоизученную и сложную экосистему, состоящую из множества бактериальных таксонов, каждый из которых, вероятно, способен оказывать влияние на качество и фертильность семени производителей. Состав микробиоты варьируется в зависимости от индивидуальных особенностей быков, таких как возраст, порода, состояние здоровья и окружающая среда. Дальнейшее углубленное изучение данной темы позволит выявить основные механизмы взаимодействия микроорганизмов и сперматозоидов, разработать эффективные стратегии профилактики инфекций и повышения качества семенной жидкости.

Очевидно, что нарушения микробиома семенников могут представлять угрозу здоровью как самих быков, так и коров-реципиентов,

потенциально препятствуя процессу имплантации эмбриона и наступлению стельности. Здоровая микробиота семенников, напротив, способна улучшать репродуктивные показатели, повышать шансы успешного наступления стельности и минимизировать риски инфекционных осложнений.

Для достижения значимых результатов необходимы комплексные исследования, направленные на точное определение нормальных и патогенных компонентов микробиома семенной жидкости быков. Выявление бактерий, негативно влияющих на качество семени, откроет перспективы для исключения из селекционного отбора быков с латентными формами бактериальных инфекций. Такие шаги станут важным вкладом в повышение экономической эффективности животноводческих хозяйств, улучшение репродуктивных показателей и снижение финансовых потерь, вызванных заболеваниями репродуктивной системы.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования поддержаны грантом РНФ № 25-76-10066 «Поиск микробиологических маркеров фертильности быков-производителей с целью разработки биологического способа эффективной реализации их генетического потенциала».

FUNDING

The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-76-10066 "Search for microbiological markers of fertility in bulls in order to develop a biological method for effectively realizing their genetic potential."

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Абилов А.И., Козменков П.Л., Иолчиев Б.С., Устименко А.В. Качественные характеристики замороженно-оттаянного семени (обычное и разделенное по полу) у быков-производителей голштинской черно-пестрой породы и возраст полового созревания полученных от них телочек. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2023; (4): 95–109. <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-4-95-109>
- Vishwanath R. Artificial insemination: the state of the art. *Theriogenology*. 2003; 59(2): 571–584. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(02\)01241-4](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(02)01241-4)
- Thibier M., Guerin B. Hygienic aspects of storage and use of semen for artificial insemination. *Animal Reproduction Science*. 2000; 62(1–3): 233–251. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(00\)00161-5](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(00)00161-5)
- Zampieri D. et al. Microorganisms in cryopreserved semen and culture media used in the *in vitro* production (IVP) of bovine embryos identified by matrix-assisted laser desorption ionization mass spectrometry (MALDI-MS). *Theriogenology*. 2013; 80(4): 337–345. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.04.020>
- Reda A.A., Almaw G., Abreha S., Tadeg W., Tadesse B. Bacteriospermia and Sperm Quality of Cryopreserved Bull Semen Used in Artificial Insemination of Cows in South Wollo Zone, Ethiopia. *Veterinary Medicine International*. 2020; 2020: 2098315. <https://doi.org/10.1155/2020/2098315>
- Gączarzewicz D., Udała J., Piasecka M., Błaszczuk B., Stankiewicz T. Bacterial contamination of boar semen and its relationship to sperm quality preserved in commercial extender containing gentamicin sulfate. *Polish Journal of Veterinary Sciences*. 2016; 19(3): 451–459. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0057>
- O'Mahony S.M., Comizzoli P. Special series on the role of the microbiome in reproduction and fertility. *Reproduction and Fertility*. 2023; 4(4): e230080. <https://doi.org/10.1530/RAF-23-0080>
- Prince P.W., Almquist J.O., Reid J.J. Bacteriological studies of bovine semen. II. The incidence of specific types of bacteria and the relation to fertility. *Journal of Dairy Science*. 1949; 32(10): 849–855.
- Goularte K.L. et al. Antibiotic resistance in microorganisms isolated in a bull semen stud. *Reproduction in Domestic Animals*. 2020; 55(3): 318–324. <https://doi.org/10.1111/rda.13621>

REFERENCES

- Abilov A.I., Kozmenkov P.L., Iolchiev B.S., Ustimenko A.V. Qualitative characteristics of frozen-thawed semen (normal and sexed) from sires of the Holstein black-and-white breed and the age of puberty of the heifers born from them. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2023; (4): 95–109 (in Russian). <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-4-95-109>
- Vishwanath R. Artificial insemination: the state of the art. *Theriogenology*. 2003; 59(2): 571–584. [https://doi.org/10.1016/s0093-691x\(02\)01241-4](https://doi.org/10.1016/s0093-691x(02)01241-4)
- Thibier M., Guerin B. Hygienic aspects of storage and use of semen for artificial insemination. *Animal Reproduction Science*. 2000; 62(1–3): 233–251. [https://doi.org/10.1016/s0378-4320\(00\)00161-5](https://doi.org/10.1016/s0378-4320(00)00161-5)
- Zampieri D. et al. Microorganisms in cryopreserved semen and culture media used in the *in vitro* production (IVP) of bovine embryos identified by matrix-assisted laser desorption ionization mass spectrometry (MALDI-MS). *Theriogenology*. 2013; 80(4): 337–345. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.04.020>
- Reda A.A., Almaw G., Abreha S., Tadeg W., Tadesse B. Bacteriospermia and Sperm Quality of Cryopreserved Bull Semen Used in Artificial Insemination of Cows in South Wollo Zone, Ethiopia. *Veterinary Medicine International*. 2020; 2020: 2098315. <https://doi.org/10.1155/2020/2098315>
- Gączarzewicz D., Udała J., Piasecka M., Błaszczuk B., Stankiewicz T. Bacterial contamination of boar semen and its relationship to sperm quality preserved in commercial extender containing gentamicin sulfate. *Polish Journal of Veterinary Sciences*. 2016; 19(3): 451–459. <https://doi.org/10.1515/pjvs-2016-0057>
- O'Mahony S.M., Comizzoli P. Special series on the role of the microbiome in reproduction and fertility. *Reproduction and Fertility*. 2023; 4(4): e230080. <https://doi.org/10.1530/RAF-23-0080>
- Prince P.W., Almquist J.O., Reid J.J. Bacteriological studies of bovine semen. II. The incidence of specific types of bacteria and the relation to fertility. *Journal of Dairy Science*. 1949; 32(10): 849–855.
- Goularte K.L. et al. Antibiotic resistance in microorganisms isolated in a bull semen stud. *Reproduction in Domestic Animals*. 2020; 55(3): 318–324. <https://doi.org/10.1111/rda.13621>

10. Woo P.C.Y., Lau S.K.P., Teng J.L.L., Tse H., Yuen K.-Y. Then and now: use of 16S rDNA gene sequencing for bacterial identification and discovery of novel bacteria in clinical microbiology laboratories. *Clinical Microbiology and Infection*. 2008; 14(10): 908–934. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2008.02070.x>
11. Haapala V. *et al.* Semen as a source of *Mycoplasma bovis* mastitis in dairy herds. *Veterinary Microbiology*. 2018; 216: 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2018.02.005>
12. Wickware C.L., Johnson T.A., Koziol J.H. Composition and diversity of the preputial microbiota in healthy bulls. *Theriogenology*. 2020; 145: 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.11.002>
13. Medo J. *et al.* Core Microbiome of Slovak Holstein Friesian Breeding Bulls' Semen. *Animals*. 2021; 11(11): 3331. <https://doi.org/10.3390/ani11113331>
14. Koziol J.H., Sheets T., Wickware C.L., Johnson T.A. Composition and diversity of the seminal microbiota in bulls and its association with semen parameters. *Theriogenology*. 2022; 182: 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2022.01.029>
15. Cojkcic A., Niazi Y., Guo Y., Hallap T., Padrik P., Morrell J.M. Identification of Bull Semen Microbiome by 16S Sequencing and Possible Relationships with Fertility. *Microorganisms*. 2021; 9(12): 2431. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122431>
16. Cojkcic A., Niazi A., Morrell J.M. Metagenomic identification of bull semen microbiota in different seasons. *Animal Reproduction Science*. 2024; 268: 107569. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2024.107569>
17. Moon C.D., Young W., Maclean P.H., Cookson A.L., Bermingham E.N. Metagenomic insights into the roles of *Proteobacteria* in the gastrointestinal microbiomes of healthy dogs and cats. *MicrobiologyOpen*. 2018; 7(5): e00677. <https://doi.org/10.1002/mbo3.677>
18. Moretti E. *et al.* The presence of bacteria species in semen and sperm quality. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*. 2009; 26(1): 47–56. <https://doi.org/10.1007/s10815-008-9283-5>
19. Thi M.T.T., Wibowo D., Rehm B.H.A. *Pseudomonas aeruginosa* Biofilms. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21(22): 8671. <https://doi.org/10.3390/ijms21228671>
20. Stojanov S., Berlec A., Štrukelj B. The Influence of Probiotics on the Firmicutes/Bacteroidetes Ratio in the Treatment of Obesity and Inflammatory Bowel disease. *Microorganisms*. 2020; 8(11): 1715. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111715>
21. Bay V. *et al.* 16S rRNA amplicon sequencing reveals a polymicrobial nature of complicated claw horn disruption lesions and interdigital phlegmon in dairy cattle. *Scientific Reports*. 2018; 8: 15529. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33993-9>
22. Yu H., Meng H., Zhou F., Ni X., Shen S., Das U.N. Urinary microbiota in patients with prostate cancer and benign prostatic hyperplasia. *Archives of Medical Science*. 2015; 11(2): 385–394. <https://doi.org/10.5114/aoms.2015.50970>
23. Úbeda J.L. *et al.* Adverse effects of members of the *Enterobacteriaceae* family on boar sperm quality. *Theriogenology*. 2013; 80(6): 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.05.022>
24. Payne B.J., Clark S., Maddox C., Ness A. *Achromobacter xylosoxidans* in extended semen causes reproductive failure in artificially inseminated sows and gilts. *Journal of Swine Health and Production*. 2008; 16(6): 316–322.
25. Baud D., Pattaroni C., Vulliemoz N., Castella V., Marsland B.J., Stojanov M. Sperm Microbiota and Its Impact on Semen Parameters. *Frontiers in Microbiology*. 2019; 10: 234. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00234>
26. Serrano M. *et al.* Influence of the Ovine Genital Tract Microbiota on the Species Artificial Insemination Outcome. A Pilot Study in Commercial Sheep Farms. *High-Throughput*. 2020; 9(3): 16. <https://doi.org/10.3390/ht9030016>
27. Zhang J. *et al.* Genomic Sequencing Reveals the Diversity of Seminal Bacteria and Relationships to Reproductive Potential in Boar Sperm. *Frontiers in Microbiology*. 2020; 11: 1873. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01873>
28. Quiñones-Pérez C., Hidalgo M., Ortiz I., Crespo F., Vega-Pla J.L. Characterization of the seminal bacterial microbiome of healthy, fertile stallions using next-generation sequencing. *Animal Reproduction*. 2021; 18(2): e20200052. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-ar2020-0052>
29. Marco-Jiménez F., Borrás S., García-Domínguez X., D'Auria G., Vicente J.S., Marin C. Roles of host genetics and sperm microbiota in reproductive success in healthy rabbit. *Theriogenology*. 2020; 158: 416–423. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.09.028>
10. Woo P.C.Y., Lau S.K.P., Teng J.L.L., Tse H., Yuen K.-Y. Then and now: use of 16S rDNA gene sequencing for bacterial identification and discovery of novel bacteria in clinical microbiology laboratories. *Clinical Microbiology and Infection*. 2008; 14(10): 908–934. <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2008.02070.x>
11. Haapala V. *et al.* Semen as a source of *Mycoplasma bovis* mastitis in dairy herds. *Veterinary Microbiology*. 2018; 216: 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2018.02.005>
12. Wickware C.L., Johnson T.A., Koziol J.H. Composition and diversity of the preputial microbiota in healthy bulls. *Theriogenology*. 2020; 145: 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.11.002>
13. Medo J. *et al.* Core Microbiome of Slovak Holstein Friesian Breeding Bulls' Semen. *Animals*. 2021; 11(11): 3331. <https://doi.org/10.3390/ani11113331>
14. Koziol J.H., Sheets T., Wickware C.L., Johnson T.A. Composition and diversity of the seminal microbiota in bulls and its association with semen parameters. *Theriogenology*. 2022; 182: 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2022.01.029>
15. Cojkcic A., Niazi Y., Guo Y., Hallap T., Padrik P., Morrell J.M. Identification of Bull Semen Microbiome by 16S Sequencing and Possible Relationships with Fertility. *Microorganisms*. 2021; 9(12): 2431. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9122431>
16. Cojkcic A., Niazi A., Morrell J.M. Metagenomic identification of bull semen microbiota in different seasons. *Animal Reproduction Science*. 2024; 268: 107569. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2024.107569>
17. Moon C.D., Young W., Maclean P.H., Cookson A.L., Bermingham E.N. Metagenomic insights into the roles of *Proteobacteria* in the gastrointestinal microbiomes of healthy dogs and cats. *MicrobiologyOpen*. 2018; 7(5): e00677. <https://doi.org/10.1002/mbo3.677>
18. Moretti E. *et al.* The presence of bacteria species in semen and sperm quality. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics*. 2009; 26(1): 47–56. <https://doi.org/10.1007/s10815-008-9283-5>
19. Thi M.T.T., Wibowo D., Rehm B.H.A. *Pseudomonas aeruginosa* Biofilms. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020; 21(22): 8671. <https://doi.org/10.3390/ijms21228671>
20. Stojanov S., Berlec A., Štrukelj B. The Influence of Probiotics on the Firmicutes/Bacteroidetes Ratio in the Treatment of Obesity and Inflammatory Bowel disease. *Microorganisms*. 2020; 8(11): 1715. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111715>
21. Bay V. *et al.* 16S rRNA amplicon sequencing reveals a polymicrobial nature of complicated claw horn disruption lesions and interdigital phlegmon in dairy cattle. *Scientific Reports*. 2018; 8: 15529. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33993-9>
22. Yu H., Meng H., Zhou F., Ni X., Shen S., Das U.N. Urinary microbiota in patients with prostate cancer and benign prostatic hyperplasia. *Archives of Medical Science*. 2015; 11(2): 385–394. <https://doi.org/10.5114/aoms.2015.50970>
23. Úbeda J.L. *et al.* Adverse effects of members of the *Enterobacteriaceae* family on boar sperm quality. *Theriogenology*. 2013; 80(6): 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2013.05.022>
24. Payne B.J., Clark S., Maddox C., Ness A. *Achromobacter xylosoxidans* in extended semen causes reproductive failure in artificially inseminated sows and gilts. *Journal of Swine Health and Production*. 2008; 16(6): 316–322.
25. Baud D., Pattaroni C., Vulliemoz N., Castella V., Marsland B.J., Stojanov M. Sperm Microbiota and Its Impact on Semen Parameters. *Frontiers in Microbiology*. 2019; 10: 234. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00234>
26. Serrano M. *et al.* Influence of the Ovine Genital Tract Microbiota on the Species Artificial Insemination Outcome. A Pilot Study in Commercial Sheep Farms. *High-Throughput*. 2020; 9(3): 16. <https://doi.org/10.3390/ht9030016>
27. Zhang J. *et al.* Genomic Sequencing Reveals the Diversity of Seminal Bacteria and Relationships to Reproductive Potential in Boar Sperm. *Frontiers in Microbiology*. 2020; 11: 1873. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01873>
28. Quiñones-Pérez C., Hidalgo M., Ortiz I., Crespo F., Vega-Pla J.L. Characterization of the seminal bacterial microbiome of healthy, fertile stallions using next-generation sequencing. *Animal Reproduction*. 2021; 18(2): e20200052. <https://doi.org/10.1590/1984-3143-ar2020-0052>
29. Marco-Jiménez F., Borrás S., García-Domínguez X., D'Auria G., Vicente J.S., Marin C. Roles of host genetics and sperm microbiota in reproductive success in healthy rabbit. *Theriogenology*. 2020; 158: 416–423. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.09.028>

30. Neto F.T.L., Viana M.C., Cariati F., Conforti A., Alviggi C., Esteves S.C. Effect of environmental factors on seminal microbiome and impact on sperm quality. *Frontiers in Endocrinology*. 2024; 15: 1348186. <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1348186>
31. Cojkcic A., Morrell J.M. Animal Welfare Assessment Protocols for Bulls in Artificial Insemination Centers: Requirements, Principles, and Criteria. *Animals*. 2023; 13(5): 942. <https://doi.org/10.3390/ani13050942>
32. Sannat C., Nair A., Sahu S.B., Sahasrabudhe S.A., Rawat N., Shende R.K. Effect of Season on Bacterial Load in Semen of Different Breeds of Cattle. *Journal of Animal Research*. 2016; 6(4): 651–656. <https://doi.org/10.5958/2277-940X.2016.00077.2>
33. Azawi O.I., Ismaeel M.A. Effects of Seasons on Some Semen Parameters and Bacterial Contamination of Awassi ram Semen. *Reproduction in Domestic Animals*. 2012; 47(3): 403–406. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2011.01888.x>
34. Gangwar C. *et al.* Semen quality and total microbial load: An association study in important Indian Goat breeds during different seasons. *Andrologia*. 2021; 53(4): e13995. <https://doi.org/10.1111/and.13995>
35. Sannat C., Nair A., Sahu S.B., Sahasrabudhe S.A. Effect of Season and Age on Bacterial Load in Fresh Semen Ejaculates of Buffalo Bulls. *Journal of Animal Research*. 2015; 5(1): 99–104. <https://doi.org/10.5958/2277-940X.2015.00016.9>
36. Chemineau P., Guillaume D., Migaud M., Thiéry J.C., Pellicer-Rubio M.T., Malpoux B. Seasonality of Reproduction in Mammals: Intimate Regulatory Mechanisms and Practical Implications. *Reproduction in Domestic Animals*. 2008; 43(s2): 40–47. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01141.x>
37. Akgün N., Cimsit Kemahlı M.N., Pradas J.B. The effect of dietary habits on oocyte/sperm quality. *Journal of the Turkish-German Gynecological Association*. 2023; 24(2): 125–137. <https://doi.org/10.4274/jtgga.galenos.2023.2022-7-15>
38. Ferramosca A., Zara V. Diet and Male Fertility: The Impact of Nutrients and Antioxidants on Sperm Energetic Metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(5): 2542. <https://doi.org/10.3390/ijms23052542>
39. Farahani L., Tharakan T., Yap T., Ramsay J.W., Jayasena C.N., Minhas S. The semen microbiome and its impact on sperm function and male fertility: A systematic review and meta-analysis. *Andrology*. 2021; 9(1): 115–144. <https://doi.org/10.1111/andr.12886>
40. Morrell J.M., Wallgren M. Alternatives to Antibiotics in Semen Extenders: A Review. *Pathogens*. 2014; 3(4): 934–946. <https://doi.org/10.3390/pathogens3040934>
41. Miao X. *et al.* The Equilibrium of Bacterial Microecosystem: Probiotics, Pathogenic Bacteria, and Natural Antimicrobial Substances in Semen. *Microorganisms*. 2024; 12(11): 2253. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112253>
42. Cagnoli C.I., Chiapparrone M.L., Cacciato C.S., Rodríguez M.G., Aller J.F., Catena M.d.C. Effects of *Campylobacter fetus* on bull sperm quality. *Microbial Pathogenesis*. 2020; 149: 104486. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104486>
43. Marchiani S. *et al.* Effects of common Gram-negative pathogens causing male genitourinary-tract infections on human sperm functions. *Scientific Reports*. 2021; 11: 19177. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98710-5>
44. Eini F., Kutenaeei M.A., Zareei F., Dastjerdi Z.S., Shirzeyli M.H., Salehi E. Effect of bacterial infection on sperm quality and DNA fragmentation in subfertile men with Leukocytospermia. *BMC Molecular and Cell Biology*. 2021; 22: 42. <https://doi.org/10.1186/s12860-021-00380-8>
45. Appiah M.O., Wang J., Lu W. Microflora in the Reproductive Tract of Cattle: A Review. *Agriculture*. 2020; 10(6): 232. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060232>
46. Maroto Martín L.O. *et al.* Bacterial contamination of boar semen affects the litter size. *Animal Reproduction Science*. 2010; 120(1–4): 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.03.008>
47. Sheldon I.M., Owens S.E. Postpartum uterine infection and endometritis in dairy cattle. *Animal Reproduction*. 2017; 14(3): 622–629. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR1006>
48. Tvrdá E. *et al.* Possible Implications of Bacteriospermia on the Sperm Quality, Oxidative Characteristics, and Seminal Cytokine Network in Normozoospermic Men. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(15): 8678. <https://doi.org/10.3390/ijms23158678>
49. Varela E. *et al.* How does the microbial load affect the quality of equine cool-stored semen?. *Theriogenology*. 2018; 114: 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.03.028>
30. Neto F.T.L., Viana M.C., Cariati F., Conforti A., Alviggi C., Esteves S.C. Effect of environmental factors on seminal microbiome and impact on sperm quality. *Frontiers in Endocrinology*. 2024; 15: 1348186. <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1348186>
31. Cojkcic A., Morrell J.M. Animal Welfare Assessment Protocols for Bulls in Artificial Insemination Centers: Requirements, Principles, and Criteria. *Animals*. 2023; 13(5): 942. <https://doi.org/10.3390/ani13050942>
32. Sannat C., Nair A., Sahu S.B., Sahasrabudhe S.A., Rawat N., Shende R.K. Effect of Season on Bacterial Load in Semen of Different Breeds of Cattle. *Journal of Animal Research*. 2016; 6(4): 651–656. <https://doi.org/10.5958/2277-940X.2016.00077.2>
33. Azawi O.I., Ismaeel M.A. Effects of Seasons on Some Semen Parameters and Bacterial Contamination of Awassi ram Semen. *Reproduction in Domestic Animals*. 2012; 47(3): 403–406. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2011.01888.x>
34. Gangwar C. *et al.* Semen quality and total microbial load: An association study in important Indian Goat breeds during different seasons. *Andrologia*. 2021; 53(4): e13995. <https://doi.org/10.1111/and.13995>
35. Sannat C., Nair A., Sahu S.B., Sahasrabudhe S.A. Effect of Season and Age on Bacterial Load in Fresh Semen Ejaculates of Buffalo Bulls. *Journal of Animal Research*. 2015; 5(1): 99–104. <https://doi.org/10.5958/2277-940X.2015.00016.9>
36. Chemineau P., Guillaume D., Migaud M., Thiéry J.C., Pellicer-Rubio M.T., Malpoux B. Seasonality of Reproduction in Mammals: Intimate Regulatory Mechanisms and Practical Implications. *Reproduction in Domestic Animals*. 2008; 43(s2): 40–47. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01141.x>
37. Akgün N., Cimsit Kemahlı M.N., Pradas J.B. The effect of dietary habits on oocyte/sperm quality. *Journal of the Turkish-German Gynecological Association*. 2023; 24(2): 125–137. <https://doi.org/10.4274/jtgga.galenos.2023.2022-7-15>
38. Ferramosca A., Zara V. Diet and Male Fertility: The Impact of Nutrients and Antioxidants on Sperm Energetic Metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(5): 2542. <https://doi.org/10.3390/ijms23052542>
39. Farahani L., Tharakan T., Yap T., Ramsay J.W., Jayasena C.N., Minhas S. The semen microbiome and its impact on sperm function and male fertility: A systematic review and meta-analysis. *Andrology*. 2021; 9(1): 115–144. <https://doi.org/10.1111/andr.12886>
40. Morrell J.M., Wallgren M. Alternatives to Antibiotics in Semen Extenders: A Review. *Pathogens*. 2014; 3(4): 934–946. <https://doi.org/10.3390/pathogens3040934>
41. Miao X. *et al.* The Equilibrium of Bacterial Microecosystem: Probiotics, Pathogenic Bacteria, and Natural Antimicrobial Substances in Semen. *Microorganisms*. 2024; 12(11): 2253. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112253>
42. Cagnoli C.I., Chiapparrone M.L., Cacciato C.S., Rodríguez M.G., Aller J.F., Catena M.d.C. Effects of *Campylobacter fetus* on bull sperm quality. *Microbial Pathogenesis*. 2020; 149: 104486. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104486>
43. Marchiani S. *et al.* Effects of common Gram-negative pathogens causing male genitourinary-tract infections on human sperm functions. *Scientific Reports*. 2021; 11: 19177. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98710-5>
44. Eini F., Kutenaeei M.A., Zareei F., Dastjerdi Z.S., Shirzeyli M.H., Salehi E. Effect of bacterial infection on sperm quality and DNA fragmentation in subfertile men with Leukocytospermia. *BMC Molecular and Cell Biology*. 2021; 22: 42. <https://doi.org/10.1186/s12860-021-00380-8>
45. Appiah M.O., Wang J., Lu W. Microflora in the Reproductive Tract of Cattle: A Review. *Agriculture*. 2020; 10(6): 232. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060232>
46. Maroto Martín L.O. *et al.* Bacterial contamination of boar semen affects the litter size. *Animal Reproduction Science*. 2010; 120(1–4): 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.03.008>
47. Sheldon I.M., Owens S.E. Postpartum uterine infection and endometritis in dairy cattle. *Animal Reproduction*. 2017; 14(3): 622–629. <https://doi.org/10.21451/1984-3143-AR1006>
48. Tvrdá E. *et al.* Possible Implications of Bacteriospermia on the Sperm Quality, Oxidative Characteristics, and Seminal Cytokine Network in Normozoospermic Men. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022; 23(15): 8678. <https://doi.org/10.3390/ijms23158678>
49. Varela E. *et al.* How does the microbial load affect the quality of equine cool-stored semen?. *Theriogenology*. 2018; 114: 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.03.028>

50. Konstantinidis T., Tsigalou C., Karvelas A., Stavropoulou E., Voidarou C., Bezirtzoglou E. Effects of Antibiotics upon the Gut Microbiome: A Review of the Literature. *Biomedicines*. 2020; 8(11): 502. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8110502>
51. Lv S. *et al.* Gut microbiota is involved in male reproductive function: a review. *Frontiers in Microbiology*. 2024; 15: 1371667. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1371667>
52. Adak A., Khan M.R. An insight into gut microbiota and its functionalities. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2019; 76(3): 473–493. <https://doi.org/10.1007/s00018-018-2943-4>
53. Hao Y. *et al.* Gut Microbiota-Testis Axis: FMT Mitigates High-Fat Diet-Diminished Male Fertility via Improving Systemic and Testicular Metabolome. *Microbiology Spectrum*. 2022; 10(3): e00028-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00028-22>
54. Zhou Y. *et al.* Taxifolin increased semen quality of Duroc boars by improving gut microbes and blood metabolites. *Frontiers in Microbiology*. 2022; 13: 1020628. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1020628>
55. Zhang Y., Hou B., Liu T., Wu Y., Wang Z. Probiotics improve polystyrene microplastics-induced male reproductive toxicity in mice by alleviating inflammatory response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023; 263: 115248. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115248>
56. Wiest R., Garcia-Tsao G. Bacterial translocation (BT) in cirrhosis. *Hepatology*. 2005; 41(3): 422–433. <https://doi.org/10.1002/hep.20632>
57. Tremellen K., McPhee N., Pearce K., Benson S., Schedlowski M., Engler H. Endotoxin-initiated inflammation reduces testosterone production in men of reproductive age. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*. 2018; 314(3): E206–E213. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00279.2017>
58. Desai M.S. *et al.* A Dietary Fiber-Deprived Gut Microbiota Degrades the Colonic Mucus Barrier and Enhances Pathogen Susceptibility. *Cell*. 2016; 167(5): 1339–1353.e1321. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.10.043>
59. Li P., Hu J., Zhao H., Feng J., Chai B. Multi-Omics Reveals Inhibitory Effect of Baicalein on Non-Alcoholic Fatty Liver Disease in Mice. *Frontiers in Pharmacology*. 2022; 13: 925349. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.925349>
60. Wang Y., Xie Z. Exploring the role of gut microbiome in male reproduction. *Andrology*. 2022; 10(3): 441–450. <https://doi.org/10.1111/andr.13143>
61. Ding N. *et al.* Impairment of spermatogenesis and sperm motility by the high-fat diet-induced dysbiosis of gut microbes. *Gut*. 2020; 69(9): 1608–1619. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2019-319127>
62. Clarke G. *et al.* The microbiome-gut-brain axis during early life regulates the hippocampal serotonergic system in a sex-dependent manner. *Molecular Psychiatry*. 2013; 18(6): 666–673. <https://doi.org/10.1038/mp.2012.77>
63. Ye L. *et al.* Impacts of Immunometabolism on Male Reproduction. *Frontiers in Immunology*. 2021; 12: 658432. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.658432>
64. Lin Y. *et al.* Effects of dietary L-leucine supplementation on testicular development and semen quality in boars. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 904653. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.904653>
65. Zhu Y. *et al.* Catalpol ameliorates diabetes-induced testicular injury and modulates gut microbiota. *Life Sciences*. 2021; 267: 118881. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.118881>
66. Yuan X., Chen R., Zhang Y., Lin X., Yang X. Gut microbiota: effect of pubertal status. *BMC Microbiology*. 2020; 20: 334. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-02021-0>
67. Helli B., Kavianpour M., Ghaedi E., Dadfar M., Haghghian H.K. Probiotic effects on sperm parameters, oxidative stress index, inflammatory factors and sex hormones in infertile men. *Human Fertility*. 2022; 25(3): 499–507. <https://doi.org/10.1080/14647273.2020.1824080>
68. Akram M., Ali S.A., Behare P., Kaul G. Dietary intake of probiotic fermented milk benefits the gut and reproductive health in mice fed with an obesogenic diet. *Food & Function*. 2022; 13(2): 737–752. <https://doi.org/10.1039/d1fo02501e>
69. Inatomi T., Otomaru K. Effect of dietary probiotics on the semen traits and antioxidative activity of male broiler breeders. *Scientific Reports*. 2018; 8: 5874. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24345-8>
50. Konstantinidis T., Tsigalou C., Karvelas A., Stavropoulou E., Voidarou C., Bezirtzoglou E. Effects of Antibiotics upon the Gut Microbiome: A Review of the Literature. *Biomedicines*. 2020; 8(11): 502. <https://doi.org/10.3390/biomedicines8110502>
51. Lv S. *et al.* Gut microbiota is involved in male reproductive function: a review. *Frontiers in Microbiology*. 2024; 15: 1371667. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1371667>
52. Adak A., Khan M.R. An insight into gut microbiota and its functionalities. *Cellular and Molecular Life Sciences*. 2019; 76(3): 473–493. <https://doi.org/10.1007/s00018-018-2943-4>
53. Hao Y. *et al.* Gut Microbiota-Testis Axis: FMT Mitigates High-Fat Diet-Diminished Male Fertility via Improving Systemic and Testicular Metabolome. *Microbiology Spectrum*. 2022; 10(3): e00028-22. <https://doi.org/10.1128/spectrum.00028-22>
54. Zhou Y. *et al.* Taxifolin increased semen quality of Duroc boars by improving gut microbes and blood metabolites. *Frontiers in Microbiology*. 2022; 13: 1020628. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1020628>
55. Zhang Y., Hou B., Liu T., Wu Y., Wang Z. Probiotics improve polystyrene microplastics-induced male reproductive toxicity in mice by alleviating inflammatory response. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2023; 263: 115248. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115248>
56. Wiest R., Garcia-Tsao G. Bacterial translocation (BT) in cirrhosis. *Hepatology*. 2005; 41(3): 422–433. <https://doi.org/10.1002/hep.20632>
57. Tremellen K., McPhee N., Pearce K., Benson S., Schedlowski M., Engler H. Endotoxin-initiated inflammation reduces testosterone production in men of reproductive age. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*. 2018; 314(3): E206–E213. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00279.2017>
58. Desai M.S. *et al.* A Dietary Fiber-Deprived Gut Microbiota Degrades the Colonic Mucus Barrier and Enhances Pathogen Susceptibility. *Cell*. 2016; 167(5): 1339–1353.e1321. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2016.10.043>
59. Li P., Hu J., Zhao H., Feng J., Chai B. Multi-Omics Reveals Inhibitory Effect of Baicalein on Non-Alcoholic Fatty Liver Disease in Mice. *Frontiers in Pharmacology*. 2022; 13: 925349. <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.925349>
60. Wang Y., Xie Z. Exploring the role of gut microbiome in male reproduction. *Andrology*. 2022; 10(3): 441–450. <https://doi.org/10.1111/andr.13143>
61. Ding N. *et al.* Impairment of spermatogenesis and sperm motility by the high-fat diet-induced dysbiosis of gut microbes. *Gut*. 2020; 69(9): 1608–1619. <https://doi.org/10.1136/gutjnl-2019-319127>
62. Clarke G. *et al.* The microbiome-gut-brain axis during early life regulates the hippocampal serotonergic system in a sex-dependent manner. *Molecular Psychiatry*. 2013; 18(6): 666–673. <https://doi.org/10.1038/mp.2012.77>
63. Ye L. *et al.* Impacts of Immunometabolism on Male Reproduction. *Frontiers in Immunology*. 2021; 12: 658432. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2021.658432>
64. Lin Y. *et al.* Effects of dietary L-leucine supplementation on testicular development and semen quality in boars. *Frontiers in Veterinary Science*. 2022; 9: 904653. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.904653>
65. Zhu Y. *et al.* Catalpol ameliorates diabetes-induced testicular injury and modulates gut microbiota. *Life Sciences*. 2021; 267: 118881. <https://doi.org/10.1016/j.lfs.2020.118881>
66. Yuan X., Chen R., Zhang Y., Lin X., Yang X. Gut microbiota: effect of pubertal status. *BMC Microbiology*. 2020; 20: 334. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-02021-0>
67. Helli B., Kavianpour M., Ghaedi E., Dadfar M., Haghghian H.K. Probiotic effects on sperm parameters, oxidative stress index, inflammatory factors and sex hormones in infertile men. *Human Fertility*. 2022; 25(3): 499–507. <https://doi.org/10.1080/14647273.2020.1824080>
68. Akram M., Ali S.A., Behare P., Kaul G. Dietary intake of probiotic fermented milk benefits the gut and reproductive health in mice fed with an obesogenic diet. *Food & Function*. 2022; 13(2): 737–752. <https://doi.org/10.1039/d1fo02501e>
69. Inatomi T., Otomaru K. Effect of dietary probiotics on the semen traits and antioxidative activity of male broiler breeders. *Scientific Reports*. 2018; 8: 5874. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24345-8>

ОБ АВТОРАХ

Елена Александровна Йылдырым^{1,2}

• доктор биологических наук, профессор кафедры крупного животноводства¹;
• главный биотехнолог молекулярно-генетической лаборатории²
deniz@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5846-5105>

Валентина Анатольевна Филиппова^{1,2}

• старший преподаватель кафедры крупного животноводства¹;
• биотехнолог²
filippova@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8789-9837>

Ксения Андреевна Соколова^{1,2}

• ассистент кафедры крупного животноводства¹;
• биотехнолог²
ksenya.k.a@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9541-6839>

Елена Александровна Корочкина³

доктор ветеринарных наук, профессор кафедры генетических и репродуктивных биотехнологий
<https://orcid.org/0000-0002-7011-4594>

Евгений Юрьевич Финагеев³

кандидат ветеринарных наук, ассистент кафедры генетических и репродуктивных биотехнологий
<https://orcid.org/0009-0004-1526-3273>

Мария Александровна Шубина³

студент
Maris.shubi@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0000-3623-0156>

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Петербургское шоссе, 2, Пушкин, Санкт-Петербург, 196601, Россия

²ООО «БИОТРОФ+», бульвар Загребский, 19, корп. 1, Санкт-Петербург, 192284, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины, ул. Черниговская, 5, Санкт-Петербург, 196084, Россия

ABOUT THE AUTHORS

Elena Alexandrovna Yildirim^{1,2}

• Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Large-scale Animal Husbandry¹;
• Chief Biotechnologist of the Molecular Genetics Laboratory²
deniz@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5846-5105>

Valentina Anatolyevna Filippova^{1,2}

• Senior Lecturer of the Department of Large-scale Animal Husbandry¹;
• Biotechnologist²
filippova@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8789-9837>

Ksenia Andreevna Sokolova^{1,2}

• Assistant of the Department of Large Animal Husbandry¹;
• Biotechnologist²
ksenya.k.a@biotrof.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9541-6839>

Elena Aleksandrovna Korochkina³

Doctor of Veterinary Sciences, Professor of the Department of Genetic and Reproductive Biotechnology
<https://orcid.org/0000-0002-7011-4594>

Evgeny Yurievich Finageev³

Candidate of Veterinary Sciences, Assistant of the Department of Genetic and Reproductive Biotechnology
<https://orcid.org/0009-0004-1526-3273>

Maria Aleksandrovna Shubina³

Student
Maris.shubi@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0000-3623-0156>

¹St. Petersburg State Agrarian University,

2 Peterburgskoye shosse, Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russia

²“BIOTROF+” Ltd, 19 Zagrebky Boulevard, building 1, Saint Petersburg, 192284, Russia

³Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine,

5 Chernigovskaya Str., St. Petersburg, 196084, Russia

Подпишитесь на печатные выпуски «АГРАРНОЙ НАУКИ» с любого месяца и на любой срок

» В РЕДАКЦИИ по тел. +7 (495) 777-67-67, доб. 1453, по agrovetpress@inbox.ru

» В АГЕНТСТВЕ ПОДПИСКИ ООО «Урал-Пресс Округ» <https://www.ural-press.ru/catalog/>

» БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА НА ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ на отраслевом портале <https://agrarnayanauka.ru/rassylka-zhurnala/>

» ПОДПИСКА НА АРХИВНЫЕ НОМЕРА И ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ на сайте Научной электронной библиотеки www.elibrary.ru

