

ERNST JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE

УСПЕХИ НАУК О ЖИВОТНЫХ

№2
2025г.



ISSN: 3034-493X

УСПЕХИ НАУК О ЖИВОТНЫХ

Сетевое научное издание

№2
2025г.

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр животноводства — ВИЖ им. Л.К. Эрнста»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Зиновьева Н.А. — доктор биологических наук, профессор, академик РАН,
директор ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Багиров В.А. — доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Департамента координации деятельности организаций в сфере сельскохозяйственных наук Министерства науки и высшего образования РФ

Донник И.М. — доктор биологических наук, профессор, академик РАН, помощник президента ФГБУ НИЦ «Курчатовский институт»

Калашников В.В. — доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик РАН, научный руководитель ФГБНУ «ВНИИ коневодства»

Кузьмина Т. И. — доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник ВНИИГРЖ — филиала ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Заместитель главного редактора

Осадчая О.Ю. — кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель директора по научно-организационной работе
и работе с филиалами ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Абдельманова А.С. — доктор биологических наук,
заведующая лабораторией ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Боголюбова Н.В. — доктор биологических наук, заведующая
отделом ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Волкова Н.А. — доктор биологических наук, профессор РАН,
заведующая лабораторией ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Гладырь Е.А. — кандидат биологических наук, заведующая
лабораторией ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Двалишвили В.Г. — доктор сельскохозяйственных наук,
главный научный сотрудник ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Денискова Т.Е. — кандидат биологических наук, ведущий
научный сотрудник ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Лебедева И.Ю. — доктор биологических наук, заведующая
лабораторией ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Некрасов Р.В. — доктор сельскохозяйственных наук,
профессор РАН, заведующий отделом ФГБНУ ФИЦ ВИЖ
им. Л.К. Эрнста

Остренко К.С. — доктор биологических наук, заведующий
лабораторией ВНИИФБиП — филиала ФГБНУ ФИЦ ВИЖ
им. Л.К. Эрнста

Пальянов А.А. — кандидат технических наук, заведующий
аспирантурой ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Сермягин А.А. — кандидат сельскохозяйственных наук,
директор ВНИИГРЖ — филиала ФГБНУ ФИЦ ВИЖ
им. Л.К. Эрнста

Сивкин Н.В. — кандидат сельскохозяйственных наук,
учёный секретарь ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Сингина Г.Н. — кандидат биологических наук, заведующая
лабораторией ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста

Выпускающий редактор

Ершова А.И. — начальник отдела информационной политики
и международного сотрудничества ФГБНУ ФИЦ ВИЖ
им. Л.К. Эрнста

ERNST JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE

№2
2025

Online scientific journal

FOUNDER

Federal State Budgetary Scientific Institution
«Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L.K. Ernst»

EDITOR-IN-CHIEF

Natalia A. Zinovieva — Doctor of Biological Sciences, Professor, Member of the RAS,
Director, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

EDITORIAL COUNCIL

Vugar A. Bagirov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Corresponding member of the RAS, Director of the Department
for Coordination of Organizations in the Field of Agricultural Sciences, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Irina M. Donnik, Doctor of Biological Sciences, Professor, Member of the RAS, Assistant to the President, the National Research Centre
Kurchatov Institute

Valery V. Kalashnikov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Member of the RAS, Scientific Director, All-Russian Research Institution
for Horse Breeding

Tatiana I. Kuzmina, Doctor of Biological Sciences, Professor, Chief Researcher, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

EDITORIAL BOARD

Deputy Editor

Olga Yu. Osadchaya, Candidate of Agricultural Sciences, deputy director, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Alexandra S. Abdelmanova, Doctor of Biological Sciences,
laboratory head, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal
Husbandry

Nadezhda V. Bogolyubova, Doctor of Biological Sciences,
department head, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal
Husbandry

Natalia A. Volkova, Doctor of Biological Sciences, RAS Professor,
department head, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal
Husbandry

Elena A. Gladyr, Candidate of Biological Sciences, laboratory
head,
L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Vladimir G. Dvalishvili, Doctor of Agricultural Sciences, chief
researcher,
L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Tatiana E. Deniskova, Candidate of Biological Sciences, leading
researcher, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal
Husbandry

Irina Yu. Lebedeva Doctor of Biological Sciences, laboratory head,
L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Roman V. Nekrasov, Doctor of Agricultural Sciences, RAS Professor,
department head, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal
Husbandry

Konstantin S. Ostrenko, Doctor of Biological Sciences, laboratory
head, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Andrey A. Palyanov, Candidate of Technical Sciences, department
head, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Alexander A. Sermyagin, Candidate of Agricultural Sciences, branch
director, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Nikolay V. Sivkin, Candidate of Agricultural Sciences, scientific
secretary, L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Galina N. Singina, Candidate of Biological Sciences, laboratory head,
L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry

Managing editor

Anastasiya I. Ershova, head of the Information Policy and
International Cooperation Department, L.K. Ernst Federal Research
Center for Animal Husbandry

Содержание

Биологические науки

Калашников В.В. Проблемы научно-технологического развития животноводства России	5—20
Абилов А.И., Устименко А.В. Факторы гуморального иммунитета (IgG) и их роль в иммунитете телят: обзор	21—33

Зоотехния и ветеринария

Харжау А., Сермягин А.А. Использование методов генетической оценки и геномной селекции в разведении крупного рогатого скота	34—50
Бабенков В.Ю. Влияние контролируемых факторов на успешную имплантацию эмбрионов после пересадки	51—68
Боголюбова Н.В., Девяткин В.А. Методы изучения газообразования в организме жвачных животных	69—80

Contents

Biological Sciences

V.V. Kalashnikov Problems of scientific and technological development of livestock breeding in Russia	5—20
A.I. Abilov, A.V. Ustimenko Humoral immunity factors (IgG) and their role in calf immunity: a review	21—33

Animal and Veterinary Science

A. Kharzhau, A.A. Sermyagin Genetic evaluation and genomic selection in cattle breeding	34—50
V.Yu. Babenkov The influence of controllable factors on successful embryo implantation after transfer	51—68
N.V. Bogolyubova, V.A. Devyatkin Methods of studying gas formation in the body of ruminants	69—80

Вступительное слово главного редактора

Уважаемые читатели!



Этот выпуск нашего журнала начинается с обзорной статьи академика Валерия Васильевича Калашникова «Проблемы научно-технологического развития животноводства России», в которой на основе анализа истории и современных трендов развития и производственного применения репродуктивных биотехнологий в животноводстве России, выявлены критические факторы в сохранении отечественного генофонда крупных видов сельскохозяйственных животных. К сожалению, 15 апреля 2025 года Валерия Васильевича не стало. Мы знали его как настоящего друга, мудрого советчика, преданного своему делу ученого и организатора зоотехнической науки. Многие годы он возглавлял отделение зоотехнии и ветеринарии Российской академии сельскохозяйственных наук, а затем – одноименную секцию в отделении сельскохозяйственных наук Российской академии наук.

Он сделал очень много в моем становлении как руководителя научного института, научив мыслить более масштабно и принимать решения, ориентируясь на достижение глобальных целей, а не на получение сиюминутных преимуществ от решения узких задач.

Много лет академик В.В. Калашников возглавлял Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства, а в последние годы был его научным руководителем. Именно благодаря его инициативе институт стал работать над усовершенствованием репродуктивных биотехнологий, в развитии которых он видел единственную возможность сохранения отечественного генофонда пород лошадей. Репродуктивные биотехнологии сегодня становятся одним из приоритетных направлений развития науки, обеспечение технологического лидерства в котором является залогом конкурентоспособности и устойчивости отечественных систем производства племенной продукции.

Развитию репродуктивных биотехнологий в животноводстве было посвящено заседание бюро отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, где мы вместе планировали обсудить достижения, проблемы и направления дальнейших исследований в этой области. Полагаю, что аналитический обзор, подготовленный академиком В.В. Калашниковым, может не только задать вектор развития этого научного направления в России, но и стать импульсом для решения масштабных задач, которые он умел ставить и достигать.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

директор ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, доктор биологических наук, академик РАН

Н.А. Зиновьева

УДК 636:001.7

Проблемы научно-технологического развития животноводства России

Калашников В.В.

ФГБНУ ВНИИ коневодства,
Рязанская обл., Россия

Аннотация. Проведен анализ динамики производства продукции животноводства в России. Отмечено снижение породного разнообразия животных, что создает риски потери устойчивости систем сельскохозяйственного производства. Выявлены критические факторы в сохранении отечественного генофонда крупных видов сельскохозяйственных животных. Дискутируется возможность сохранения генетических ресурсов вне систем сельскохозяйственного производства (*ex situ*) для сохранения отечественного генофонда видов и пород животных. Рассмотрены этапы развития вспомогательных репродуктивных технологий и биотехнологических приемов воспроизводства как основы внедрения в животноводстве инновационных производственных технологий, являющихся магистральным направлением в современной селекции для получения особей с выдающимся наследственными задатками.

Ключевые слова: генетические ресурсы, биологические коллекции, генетические технологии, вспомогательные репродуктивные технологии (ВРТ), искусственное осеменение, трансплантация эмбрионов.

Для цитирования: Калашников В.В. Проблемы научно-технологического развития животноводства России // Успехи наук о животных. 2025. № 2. С. 5—20. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.001

Problems of scientific and technological development of livestock breeding in Russia

V.V. Kalashnikov

All-Russian Research Institute of Horse Breeding
Ryazan Region, Russia

Abstract. The dynamics of livestock production in Russia was analyzed. The decrease in the breed diversity of animals was noted, which creates risks of loss of sustainability of agricultural production systems. Critical factors in the preservation of the domestic gene pool of large species of farm animals have been identified. The possibility of preservation of genetic resources outside agricultural production systems (*ex situ*) for the preservation of domestic gene pool of animal species and breeds is discussed. The stages of development of assisted reproductive technologies and biotechnological methods of reproduction as a basis for the introduction of innovative production technologies in livestock breeding, which are the main direction in modern breeding to obtain individuals with outstanding hereditary traits, are considered.

Translated with DeepL.com (free version)

Keywords: genetic resources, biological collections, genetic technologies, assisted reproductive technologies (ART), artificial insemination, embryo transfer.

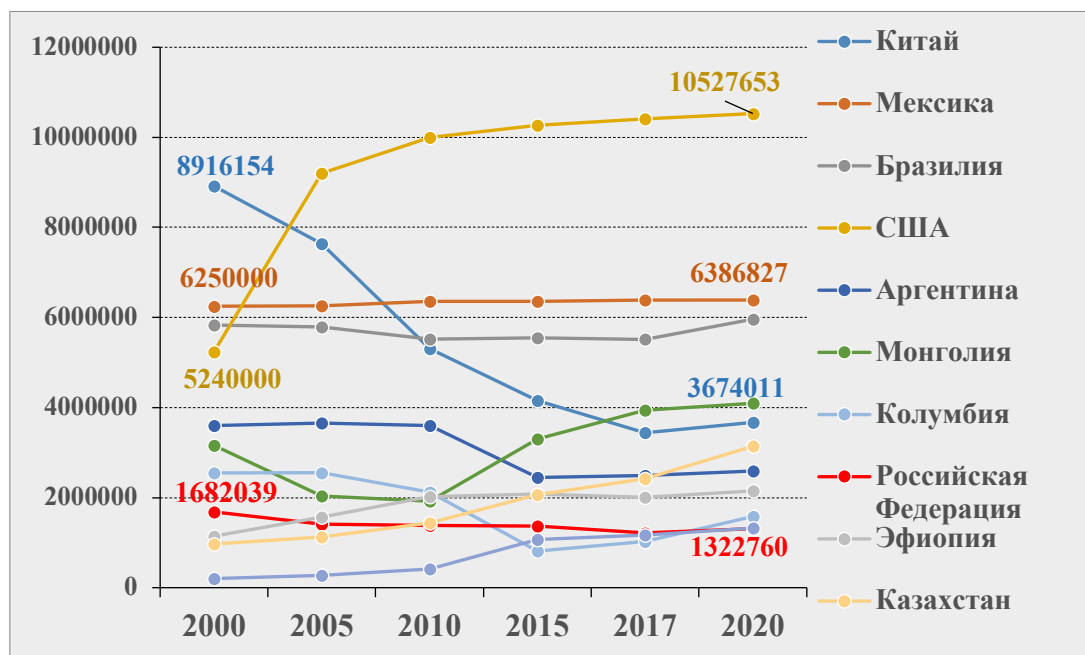
For citation: Kalashnikov V.V. Problems of scientific and technological development of livestock breeding in Russia. Ernst Journal of Animal Science. 2025. 2: 5—20. Russian. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.001

Рациональное использование генетических ресурсов сельскохозяйственных животных, которые являются наиболее ценным и стратегически важным запасом каждой страны, является залогом устойчивого развития экономики и имеет ключевое значение для обеспечения продовольственной и технологической безопасности [1]. В общем мировом потреблении человеком белка и общего количества калорий сельскохозяйственные животные обеспечивают соответственно 39 и 18 процентов. На долю продуктов питания, получаемых из животноводческого сырья, приходится около 80 процентов общего потребления продуктов животного происхождения [2]. Исходя из высокой значимости данного сегмента агропромышленного комплекса страны, рассмотрим тенденции, текущее состояние и перспективы отечественного животноводства в вопросе достижения устойчивого наращивания объемов сырья и производства пищевой продукции для целей внутреннего потребления, а также экспорта.

Производство продукции животноводства в России. По итогам 2024 года производство основных видов продукции животноводства в стране составило: молока – 33,8 млн. тонн, мяса – 11,5 млн. тонн и 46,7 млрд. шт. яиц, что отвечает параметрам Доктрины продовольственной безопасности России. Между тем, обратившись к истории российского животноводства, мы видим критическое снижение к сегодняшнему дню объемов производства молока и мяса-говядины в стране в сравнении с 1990 годом. Тогда производилось 55,7 млн. тонн молока, что больше текущего производства на 21,9 млн. тонн. В общей структуре производства молока 99,2% сегодня занимает продукция отрасли молочного скотоводства. Мясо раскладывается на несколько видов: 45,7% занимает мясо птицы, 38,51% – свинина, 14,04% – говядина, остальные образцы – менее 2-х процентов. В 1990 году говядины было произведено 4,3 млн. тонн, что в 2,6 раза превышает объемы текущего производства данного вида мяса. Настораживает то обстоятельство, что в производстве всех видов продукции животноводства доминируют представители ограниченного числа селекционных форм, при этом преимущественно иностранного происхождения. Так, 80% молока производится в нашей стране коровами транснациональной голштинской породы, 81% говядины получают при специализированном разведении скота трех пород, в числе которых две – абердин-ангусская и герефордская – зарубежной селекции и лишь ограниченно используется отечественный калмыцкий скот. Свинину на 90% и мясо бройлеров на 99% также фактически получают от представителей пород и кроссов, чья генетическая природа основана на зарубежной селекции. Сложившаяся ситуация существенно усугубляет проблему необремененного, суверенного развития пород отечественной селекции и поддержания необходимого уровня биоразнообразия в сфере сельскохозяйственного животноводства. Данное обстоятельство позволяет заключить о наличии в современном состоянии и трендах функционирования отечественного животноводства главного вызова настоящего времени – сокращение биоразнообразия в широком и детализированном виде.

Снижение биоразнообразия – угроза устойчивости систем сельскохозяйственного производства. Ускорившиеся в последние десятилетия процессы ассимиляции и замещения отечественного генофонда сельскохозяйственных животных и птицы зарубежными породами, наряду с заметным превосходством по продуктивности в моменте, влекут за собой и отложенные производственно-экономические издержки. Так, известно, что агрессивно шествующая по миру, в том числе и в наших краях, голштинская порода молочного скота, имея существенное превосходство над традиционными российскими породами по удою коров, последовательно, год от года, сокращает потенциал хозяйственного долголетия и нормативных параметров воспроизводительной функции. При сравнительной характеристике молочных пород крупного рогатого скота по уровню

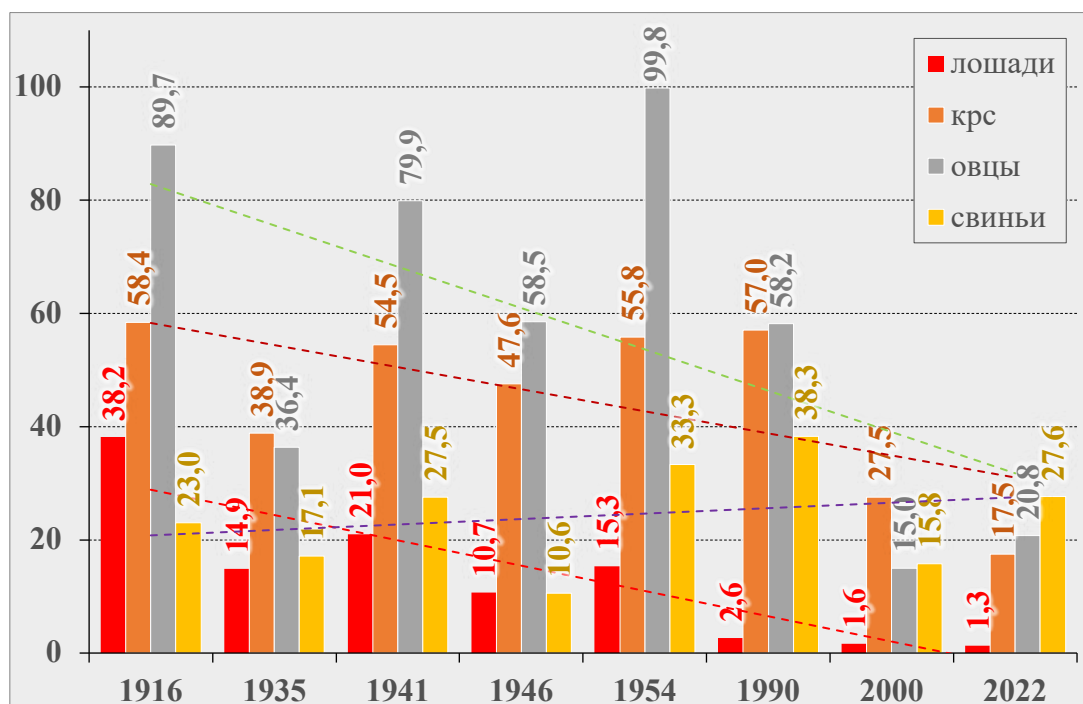
функционального статуса, определяющего всю линейку показателей воспроизводства поголовья и хозяйственного долголетия животных, представители голштинской породы замкнули общероссийский рейтинг сверстников. В сравнении с исконно российскими породами крупного рогатого скота все другие породы, в том числе подвергшиеся скрещиванию с зарубежным поголовьем, по этим показателям выраженно уступали первым [4-6]. Тем не менее, за исторически короткий срок, с 1990 по 2004 годы, численность животных голштинской породы в составе племенных хозяйств в стране возросла с нуля до 1 млн. 672,12 тыс. голов. Анализ относительной численности крупного рогатого скота в разрезе пород показал, что голштинская порода стала наиболее распространенной в Российской Федерации – её доля составляет 64,37% от общего поголовья. Этому способствовали активный ввоз нетелей и телок из-за рубежа по льготным таможенным тарифам и широкое использование семени голштинских быков-производителей в отечественных стадах. За 2021-2023 гг. на территорию Российской Федерации было ввезено 14 млн. 61 тыс. доз семени, что вдвое превышает общую численность коров во всех категориях хозяйств. В связи с этими тенденциями усугубились риски полной утраты оригинального генетического материала отечественных пород скота, обладающих многими ценными качествами, приобретенными в ходе эволюции. В последние десятилетия прослеживается устойчивая тенденция снижения абсолютной и относительной численности поголовья молочного скота отечественных пород. Так, некогда доминировавшие в регионах российские породы молочного скота к настоящему времени практически потеряли былое ключевое значение в экономике молочного производства страны. Только за последние 15 лет относительная доля коров черно-пестрой породы в стране сократилась с 57,9% до 17,6%, холмогорской с 8,7% до 2,9%, красно-пестрой с 5,5% до 2,8%, красной-степной с 4,5% до 2,2%, ярославской с 2,3% до 1,1%, костромской с 0,5% до 0,3 процента [7]. Темпы сокращения численности поголовья местных пород крупного рогатого скота в период с 1990 года превышают десятки, а в таких породах, как бестужевская, красная горбатовская, тагильская, красная тамбовская, якутская – сотни раз, приближая их к полному исчезновению.



Примечание: ось X – год; ось Y – численность поголовья, голов

Рисунок 1. Динамика ресурсов коневодства в мире и в России

Следует отметить, что процессы замещения отечественных пород иностранными оказались общими не только для молочного и мясного скота, но и для других сельскохозяйственных животных: лошадей, овец, свиней, а также птицы и происходили на фоне радикального сокращения общей исходной численности каждого из видов. Так, число лошадей в стране за век сократилось в 30 раз. Если в конце XIX – начале XX веков Россия была лидером по численности поголовья лошадей (1/3 мирового состава), то в настоящее время в мире насчитывается более 58 млн. лошадей, а доля Российской Федерации составляет всего 2,2% (рис. 1). Сокращение численности крупного рогатого скота и овец за этот же период составило 3-4 раза (рис. 2).



Примечание: ось X – год; ось Y – численность поголовья, млн. голов

Рисунок 2. Темпы сокращения поголовья основных видов сельскохозяйственных животных за столетний период

Этот свернувшийся горизонт наследственной изменчивости добавил свои эффекты в современные генетические структуры всех видов сельскохозяйственных животных и птицы. Совокупность направлений трансформации генофонда вызвала острую необходимость разработки и практического применения генетических и сопутствующих им вспомогательных репродуктивных технологий в системе мер сохранения и использования генетических ресурсов отечественных видов и пород сельскохозяйственных животных и птицы.

Сохраняя биоресурсы сельскохозяйственных животных – сохраняем будущее.

В 2024 году на базе ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ им. академика Л.К. Эрнста» образован Национальный центр генетических ресурсов сельскохозяйственных животных [8]. Разработана и реализуется программа развития Центра [9]. Магистральным направлением деятельности Центра является проведение мониторинга состояния генетических ресурсов сельскохозяйственных животных в местах их обитания и разведения, осуществление поиска и отбора ценных образцов генетических ресурсов, формирование и пополнение национального каталога особо ценных образцов

генетических ресурсов сельскохозяйственных животных, а также обеспечение гарантированного долгосрочного сохранения функциональности единиц наследственности, содержащихся в образцах, внесенных в национальный каталог. Кроме того, важнейшей миссией Центра является разработка методик получения, хранения, комплексной оценки и использования образцов генетических ресурсов сельскохозяйственных животных, в том числе с применением современных методов научных исследований, передовых идей и перспективных технологий. Предметом деятельности Центра являются генетические ресурсы, сохраняемые в «живом» разведении, в криобанках с поддержанием функциональности единиц наследственности, а также в генных банках материала для геномного секвенирования, включая исторические (предковые) образцы. В этой многофункциональной системе сохранения и использования генетических ресурсов сельскохозяйственных животных *ex situ* до сих пор самое широкое практическое применение получают криобанки, в которых осуществляется долгосрочное хранение спермы производителей животных разных видов, птицы, рыб, аквакультуры и сельскохозяйственных насекомых, а также ооцитов, эмбрионов и соматических клеток. Технологии их применения для воспроизводства особей новых поколений, в том числе с использованием методик генетических трансформаций, входят в понятие «вспомогательные репродуктивные технологии» (BPT). Об их истории и современном применении расскажем ниже. Следует особо отметить безусловную необходимость развития BPT в разведении популяций крупных сельскохозяйственных животных, крупного рогатого скота и лошадей как представителей видов, имеющих наследственно малый коэффициент естественного размножения (1 единица и менее).

Вспомогательные репродуктивные технологии и биотехнологические приемы воспроизводства являются основой внедрения в животноводстве инновационных производственных технологий, магистрального направления в современной селекции для получения особей с выдающимися наследственными задатками. Сегодня совершенствование таких методов, позволяющих получать генеративный материал для геномного редактирования от животных с желаемыми генетическими характеристиками (например, обладающих высокой племенной ценностью по комплексу хозяйственно-полезных качеств в скотоводстве, выдающейся спортивной работоспособностью в коневодстве) и их тиражировать, представляет собой неотъемлемую составляющую успешного развития и внедрения данных технологий в крупном животноводстве [10]. При этом, эффективные репродуктивные технологии могут стать и уже являются особо востребованным приемом для тиражирования генотипов ценных особей в элитном коннозаводстве как самом дорогом сегменте международного рынка племенных ресурсов сельскохозяйственных животных. Обратимся к обзору развития и применения BPT в коневодстве, подготовленному по программе Российского научного фонда [11]. В настоящее время в животноводстве достигнут серьезный прогресс в разработке и внедрении большого числа биотехнологических методов воспроизводства поголовья, среди них: искусственное осеменение и трансплантация эмбрионов (в том числе, межвидовая), криоконсервация спермы, эмбрионов и ооцитов, прижизненное получение ооцитов, оплодотворение *in vitro* (IVF), инъекция сперматозоида в яйцеклетку (ICSI), перенесение яйцеклетки донора в яйцевод реципиента для оплодотворения (GIFT), клонирование, определение пола эмбрионов по взятому биоптату и выявление наследственных аномалий [12]. Становление вспомогательных репродуктивных биотехнологий в российском животноводстве берет свои истоки с начала XX века. Особенный интерес представляет история разработки и развития BPT в Советской и Российской коневодческой науке, в которой с опорой на классическое заводское искусство активно

реализовались преимущества биотехнологических методов управления наследственностью породных ресурсов вида.

Искусственное осеменение. Значительный вклад в становление и развитие искусственного осеменения сельскохозяйственных животных внесли отечественные учёные, среди которых нельзя не упомянуть В.К. Милованова, И.И. Соколовскую, А.В. Квасницкого, И.В. Смирнова. Более того, сосредоточенный в стенах Всесоюзного института животноводства (ныне ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста) и Всесоюзного научно-исследовательского института коневодства (ныне ФГБНУ ВНИИ коневодства) научный потенциал позволил осуществлять крупные исследования, в том числе по искусственному осеменению и криоконсервации спермы производителей, что оказало существенное влияние на развитие аграрной науки и совершенствование устойчивых систем сельскохозяйственного производства [13]. Благодаря получению в 1954 году первых в мире жеребят от замороженного семени стали известны имена П.Н. Скаткина и Т.П. Ильинской, В.Г. Паршутина, Е.С. Кружковой (1956 год), В.А. Румянцевой (1958 год). Е.М. Платов и С.Я. Ромбе (1967 год), А.И. Науменков и Н.К. Романькова (1969 год) посвятили свои труды разработке способов длительного сохранения оплодотворяющей способности спермы жеребцов [14-19]. В 1970-х годах во ВНИИ коневодства был создан криобанк, в котором до настоящего времени хранится и пополняется коллекция криоконсервированного семени выдающихся производителей разных пород. На протяжении истории, в разные сроки хранения спермы сотрудники института проводят успешные опыты по использованию криоконсервированного репродуктивного материала выдающихся жеребцов в селекционных целях. Так, в 2024 году получены потомки от жеребца Самоцвета терской породы после 51 года хранения его спермы в криобанке института (рис. 3). Это первый случай в мировой практике получения потомства после такого длительного периода хранения генеративного материала как для семени жеребцов, так и для самцов любого другого вида животных [13]. Примечательно, что в реальной селекционной практике отечественным коннозаводчикам удалось таким образом получить несколько выдающихся потомков от ценных предков в ахалтекинской и арабской породах лошадей.



Рисунок 3. Сохранение генетических ресурсов и их возвращение в селекционный процесс

Среди преимуществ метода искусственного осеменения по отношению к естественной случке следует отметить ускорение эффекта селекции, возможности транспортировки на большие расстояния и, тем самым, широкого распространения ценного генетического материала, возможности осеменения одним эякулятом нескольких кобыл, предотвращение распространения инфекционных заболеваний, которые передаются половым путем. Семя выдающихся особей и представителей редких и исчезающих пород животных может быть сохранено в криобанке и использовано для воспроизводства при необходимости.

Лошадь явилась первым сельскохозяйственным животным, послужившим объектом для проведения в России опытов по искусственному осеменению. Такие опыты стали возможны благодаря бывшему управляющему Дубровского конного завода Ф.Н. Измайлову, вывезшему метод из Америки, где искусственное осеменение лошадей имело наиболее обширное применение (А.П. Кувшинов, 1924) [20]. В 1893-1896 гг. опыты успешно были проведены магистром ветеринарных наук К. Лидеманом в Терской заводской конюшне, директором конных заводов и конюшен И.А. Потоцким в Антонинах, Ф. Хелковским и коннозаводчиком Харьковской губернии статским советником Н.П. Енишерловым (1896) [21]. В результате опытов, проведенных Н.П. Енишерловым, из 13 маток, оплодотворенных искусственным путем, ожеребилась шесть. Профессору И.И. Иванову первому принадлежит проведение в жизнь смелой идеи широкого применения искусственного осеменения животных с целью лучшего использования племенных производителей (Г.В. Парушутин, 1950) [22]. Свои опыты он начал в 1897 году на лошадях Дубровского конного завода, в с. Долгое Орловской губернии, в Аскании Нова. Кроме разработки техники искусственного осеменения выяснялась эффективность этого метода: процент зачатия, качество потомства, его здоровье, работоспособность, плодовитость. И.И. Ивановым было предложено использовать при получении спермы мягкую бархатную губку. Это обеспечивало получение от одной садки жеребца такого количества семени, которого хватало на осеменение 8-10 кобыл. Также были сконструированы резиновый катетер, корнцанг, разработаны методы стерилизации инструментов. И.И. Иванов испытывал простейшие разбавители спермы, изучал влияние кормления жеребца на качество его спермы, определял объем эякулята жеребца и выявил, что для зачатия кобылы достаточна доза спермы в 10 см³. С 1901 по 1909 г.г. на организованных случных пунктах в Российской империи было искусственно осеменено около 600 кобыл, более 200 кобыл ожеребилась, при этом зажеребляемость в отдельные годы превышала 70%. Уже в 1907 году И.И. Ивановым были предприняты первые попытки сохранения спермы жеребцов при минусовых температурах (-15 °C и -100 °C), к сожалению, оказавшиеся неудачными (Е.М. Платов, 1970) [20].

Искусственное осеменение в качестве основного метода организации интенсивного воспроизводства сельскохозяйственных животных в СССР начинают применять с 1923 года. Это особенно заметно на примере коневодства. Если в начале XX века (1910—1914 гг.) было осеменено около 9 тыс. кобыл, то в 1928 году показатель достигал 64,3 тыс., в 1932 году – 154 тыс., в 1940 году – 363,4 тыс., в 1952 году – 447 тыс. кобыл [12, 24]. Более того, среди зарубежных специалистов был намечен рост интереса к использованию описываемого метода. Наибольшую активность проявляли учёные из Германии, Японии и США, посещавшие лабораторию И.И. Иванова для изучения организации и техники искусственного осеменения. С 1937 года государственные заводские конюшни (ГЗК) и военно-ремонтные конные заводы становятся центрами искусственного осеменения. Перед Великой отечественной войной в зонах деятельности ГЗК было искусственно осеменено 82% общего числа кобыл. При этом специалисты на отдельных пунктах добивались уровня зажеребляемости в 85-90% [25]. Начиная с 1978 года, метод широко внедрялся в практику

отечественного призового, рысистого коннозаводства. Он позволил расширить ареал и масштабы использования высоко оцененных по фенотипу и генотипу жеребцов и радикально усилил возможности селекционеров конных заводов и племенных ферм в проведении индивидуальных подборов пар. Благодаря применению искусственного осеменения были получены рекордисты пород, победители и призеры международных, всесоюзных и всероссийских призов, высококлассные производители и матки. Начавшийся в 60-е годы импорт в Россию выдающихся жеребцов американской стандартбредной породы (Лоу ГанOVER, Эйпекс ГанOVER, Сентениал Вей, Регби Стар, позже Реприз и др.), стимулировал работу по накоплению в криобанке ВНИИ коневодства замороженного семени и массовому применению его в большинстве конных заводов страны, разводящих русского рысака. За период заводской карьеры указанных и других американских жеребцов было получено с применением метода искусственного осеменения многочисленное потомство русско-американских помесей, ставшее основой генетической трансформации современных отечественных призовых рысачей в направлении радикального увеличения их резвостных способностей.

Трансплантация эмбрионов. Следующий этап развития инновационных технологий воспроизводства крупного рогатого скота и лошадей – трансплантация эмбрионов. Данный метод сегодня является общепризнанным инструментом эффективной селекционной работы в животноводстве. Метод постоянно претерпевает совершенствование. В конце 90-х годов прошлого столетия в мире была освоена процедура производства эмбрионов крупного рогатого скота путем оплодотворения ооцитов, прижизненно извлеченных из фолликулов коров, в пробирке. Число эмбрионов крупного рогатого скота, подготовленных к трансферу таким способом, за последние 20 лет возросло более чем в 10 раз и превысило 1 млн. 500 тысяч единиц (рис. 4) [26]. При этом доля эмбрионов, зачатых *in vitro* (IVP), уже достигает 80% от общего числа годных к пересадкам эмбрионов.



Примечание: ось X – год; IVP – эмбрионы, полученные *in vitro*, с использованием OPU-ооцитов и ооцитов, полученных *post mortem*; IVD – эмбрионы, полученные *in vivo*

Рисунок 4. Динамика производства IVP-эмбрионов в мире и доля в общем производстве эмбрионов коров по результатам анализа данных IETS [26]

В России практическое применение метода эмбриотрансфера имеет весьма ограниченный характер в силу ряда объективных экономических причин. Тем не менее, в целях сохранения генофонда редких, исчезающих пород скота налажена закладка эмбрионов коров, полученных по разным методикам, в криобанк Национального центра генетических ресурсов сельскохозяйственных животных.

В коннозаводстве сущность метода также сводится к тому, чтобы с помощью биотехнологий передать от генетически ценной кобылы-донора, в том числе возможно одновременно используемой для спортивных и иных целей, суррогатной матери миссию вынашивания плода, которое длится 11 месяцев. С этой целью эмбрион, развившийся до стадий морулы или бластоцисты, извлекают из матки кобылы-донора и пересаживают его в матку кобылы-реципиента, синхронизированной по фазе полового цикла. Процедура осеменения и извлечения эмбрионов может быть повторена в следующем половом цикле кобылы-донора. Данный метод позволяет более эффективно использовать генетический потенциал особо ценных самок, ускорять генетический прогресс в селекции, благодаря более быстрой интродукции «желательных» аллелей в популяции. Среди других преимуществ метода трансплантации эмбрионов в коневодстве следует отметить возможности преодоления других преград физиологического и экономического характера. Так, например, стало возможным получение потомства от кобыл с проблемами вынашивания плода, вовлечение кобыл в воспроизводство без отрыва от спортивной карьеры, раннее использование молодых кобылок, не достигших полной физиологической зрелости для плодоношения и др. В настоящее время в животноводстве, в том числе в коневодстве развиваются все этапы технологической цепочки трансплантации эмбрионов, включая культивирование, криоконсервацию и транспортировку эмбрионов.

Полагают, что история развития метода трансплантации эмбрионов в животноводстве берет свое начало с 1890 года, когда Уолтером Хипом в 1890 году был получен первый крольчонок-трансплантат. В середине прошлого столетия с помощью данного метода было получено потомство у других видов сельскохозяйственных животных, включая крупный рогатый скот, свиней и овец. Первый успех на лошадях был достигнут в 1972 году, когда британские ученые из Кембриджской лаборатории, используя хирургическую методику трансплантации эмбрионов получили жизнеспособное потомство [27]. Практическое использование метода трансплантации эмбрионов в коневодстве с селекционными целями началось с разработки в 1974 году производственного нехирургического способа извлечения и пересадки эмбрионов лошадей, основоположниками которого считают японских ученых N. Oguri и Y. Tsutsumi [28]. Однако на первых этапах широкое распространение данного метода лимитировалось относительно низким уровнем приживляемости эмбрионов после их пересадки реципиентам. Автором отечественной нехирургической технологии пересадки эмбрионов у лошадей является доктор биологических наук С.Г. Лебедев, который в феврале 1982 года в лаборатории физиологии размножения ВНИИ коневодства получил первого в России жеребенка-трансплантата (рис. 5). Всего учёным с использованием данной технологии было получено около 40 жеребят. Примером практической значимости данной технологии является восстановление русской верховой породы под руководством профессора С.Г. Лебедева в Старожиловском конном заводе (Рязанская область).

С 1984 по 1985 год учёным удалось получить от одной ценной кобылы-донора 3 жеребенка (в том числе два трансплантата) в течение календарного года. В результате работы все потомки оказались препотентными представителями характерного типа исторических предков орлово-растопчинской породы лошадей. В последующие годы ученики С.Г. Лебедева продолжили исследования по разработке методики криоконсервации эмбрионов лошадей. В настоящее время технология пересадки эмбрионов находит лишь ограниченное применение в племенном коневодстве России [29]. Одной из причин этого являются высокие затраты на проведение процедуры, которые зависят от стоимости многих сопряженных услуг, включая получение разрешения породной ассоциации на пересадку, перевозку лошадей, как правило, авиатранспортом, аренду реципиента, постой в клинике и другие). Например, в США в специализированных центрах репродукции эта процедура в среднем стоит 3,5—4,5 тыс. долларов, но может быть и многократно выше в зависимости от конкретных обстоятельств всего процесса [30]. Не дешево обходится и эмбриотрансфер в продуктивном животноводстве, прежде всего в молочном и мясном скотоводстве. Однако с учетом значительных объемов применения данной технологии воспроизводства скота в зарубежных странах, о которых было сказано выше, эти затраты вполне окупаются. В некоторых странах распространение метода эмбриотрансфера как способа воспроизводства ценных генотипов в коневодстве также имеет вполне значимую величину и технологически обоснованные организационные формы. В нашей стране пока не наступил золотой век его применения в данной отрасли. Стоит заметить, что освоение, модернизация и успешное применение в практической сфере животноводства технологии эмбриотрансфера дало фундаментальный толчок к углублению проникновения технологий инструментальных манипуляций в первоосновы репродуктивных процессов в организме животных на стадиях оплодотворения половых клеток *ex situ*. В текущем веке был начат новый этап в развитии вспомогательных репродуктивных технологий в мировом и отечественном животноводстве.

Развитие биотехнологических методов размножения сегодня. Другие биотехнологии, которые интенсивно развиваются в настоящее время, включают прижизненное получение ооцитов (OPU) и их оплодотворение *in vitro* (ЭКО), интрацитоплазматическую инъекцию сперматозоида в яйцеклетку (ICSI), перенос яйцеклетки донора в яйцевод реципиента для оплодотворения (GIFT), предимплантационную генную диагностику (PGD), клонирование эмбрионов посредством переноса ядер соматических клеток (SCNT).

Метод ЭКО подразумевает получение половых клеток (гамет) – сперматозоидов самцов и яйцеклеток самок, проведение процесса оплодотворения в искусственно созданных условиях и выращивание полученных эмбрионов до нужной стадии развития (как правило, до стадии морулы или бластоцисты) с последующей подсадкой ранних эмбрионов самкам-реципиентам. Яйцеклетки из яичников самок получают либо *post mortem* (после



Рисунок 5 – Профессор Лебедев С.Г. с первым жеребенком-трансплантатом (1982 г.)

убоя животного), либо прижизненно после овариозэктомии или посредством аспирации фолликулов под сонографическим контролем (Ovum Pick-Up, OPU). Технология ICSI находит применение для получения потомства от генетически ценных производителей, сперма которых утратила способность к оплодотворению вследствие различных патологий, вплоть до полной иммобилизации и отсутствия хвоста у сперматозоидов. Суть технологии заключается во внедрении с помощью микроманипулятора наследственного материала самца (головки сперматозоида) в цитоплазму яйцеклетки самки и обеспечения дальнейших условий для слияния женского и мужского пронуклеусов, образования зиготы и начальных стадий дробления [31, 32]. В коневодстве, где индивидуальная ценность лошади может оказаться огромной по затратам на приобретение или из-за феноменальных спортивных успехов, но физиологические проблемы не позволяют ordinarily реализовать ее генетический потенциал в потомстве, находят применение другие манипуляции с гаметам. Например, проблемы, связанные с плодовитостью генетически ценных кобыл, в частности, с патологиями матки и яйцеводов, помогает решить метод GIFT (инъекция ооцита в яйцевод). Он заключается в прижизненном извлечении ооцита из яичника ценной кобылы и дорастивании его до стадии метафазы II, после чего ооцит пересаживают в яйцевод кобылы-реципиента, предварительно (или после этого) осемененной спермой выдающегося жеребца (OT – oocytettransfer), либо непосредственно вместе со сперматозоидами (GIFT – gamete intrafallopian transfer) [33, 34].

Теперь о клонировании в животноводстве как методе воспроизводства точных генетических копий выдающихся по генетическим или фенотипическим качествам представителей разных пород. Здесь история также не нова. В коневодстве первый клонированный жеребенок был получен в 2003 году в Италии [35]. Его выносила кобыла, от которой были взяты кожные фибробласты в качестве исходных кариобластических клеток. Таким образом, получилась уникальная беременность плодом, который имел идентичную генетическую и, следовательно, одинаковую иммунологическую основу с материнским организмом. В этом же году были получены 3 клонированных муленка [36]. Позднее успех был закреплен и в других лабораториях, упрочив позиции клонирования в качестве новой репродуктивной технологии [37-39]. Наиболее яркое применение метода клонирования лошадей было показано в Аргентине, где в значительной мере сегодня развито направление использования спортивных лошадей в состязаниях по конному поло. Этот вид конного спорта имеет ряд специфических особенностей в подходах к выбору, подготовке и использованию лошадей в данных спортивных состязаниях. Прежде всего, это связано с отбором лошадей в команды по полу (преимущественно кобылы), по выраженности спортивного азарта у животного, маневренности (совкости), выносливости, силе и другим спортивным качествам.

Следующее затруднение, с которым столкнулись специалисты при разработке технологии, заключалось в уровне приживляемости клонированных эмбрионов лошадей, который в сравнении с показателями других видов сельскохозяйственных животных, в том числе крупного рогатого скота, был значительно ниже. А уровень эмбриональной смертности на ранних сроках и в середине беременности, как следует, превосходил. Вместе с тем характерных клонированным телятам патологий в эмбриональном и постнатальном развитии, ведущих к поздним абортам и смертности, у клонированных жеребят выявлено не было. Таким образом, при преодолении половинного срока беременности у таких животных существенно возрастали шансы на нормальное рождение и последующее развитие.

Сегодня внимание исследователей сосредоточено на совершенствовании методов использования генетического потенциала сельскохозяйственных животных, в том числе в коневодстве. Одним из направлений такой работы является тиражирование генотипов

выдающихся спортивных лошадей и восстановление линий жеребцов через клонирование мерин, проявивших себя в большом спорте, а также увеличение клонов эмбрионов от одной ценной кобылы в год с использованием возможностей пересадки эмбрионов. Не менее важным считается резервирование генетического материала в криобанках для последующего клонирования ценных особей, погибших или утративших способность к размножению. В последние годы получают приоритетное направление исследования по предимплантационному генотипированию эмбрионов. Идентифицированы некоторые гены, связанные с мастью и работоспособностью лошадей, разработаны методы тестирования ранних эмбрионов лошадей по полу и некоторым генетическим заболеваниям [40, 41]. Для этого из эмбриона на стадии морулы или ранней бластоцисты перед криоконсервацией отбирают несколько клеток и проводят полную геномную амплификацию (WGA), по результатам которой принимается решение о дальнейшем использовании или выбраковке замороженного эмбриона [42]. В перспективе, когда будут идентифицированы гены, детерминирующие высокую работоспособность лошадей или другие позитивные отличительные признаки, можно будет прогнозировать на основании геномной оценки эмбриона и ценность будущей лошади. Это звучит пока фантастично, но технически возможно, что показано в наших современных исследованиях.

В продуктивном животноводстве метод клонирования животных пока не приобрел сколько-нибудь существенную величину в практической селекции стад, тем не менее, разработка доступных технологий данной процедуры уже сегодня представляется необходимой в острых случаях для решения проблем сохранения и воссоздания исчезающего генофонда оригинальных селекционных форм животных, а также для решения будущих масштабных задач по конструированию генотипов модельных особей. В целях освоения данной технологии сотрудниками ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста проведен ряд экспериментов по клонированию крупного рогатого скота и овец методом клонирования ядер соматических клеток (SCNT) [43, 44]. В ходе исследований удалось оптимизировать протоколы по всем этапам необходимых манипуляций с ооцитами и соматическими клетками животных вплоть до стадии эмбриона, способного к дальнейшему внутриутробному развитию. В результате многочисленных опытов удалось получить первые в России клоны крупного рогатого скота и овцы гибридного происхождения. Примечательно, что данный клон овцы стал первым в мире клоном животного, полученным от реципиента, являющегося продуктом межвидовой гибридизации исходных форм с разным по численности набором хромосом. Данное обстоятельство представляет фундаментальный интерес в плане изучения дополнительных возможностей генетической коррекции генома сельскохозяйственных животных с целью приобретения новых полезных продуктивных качеств. Первый в Российской Федерации жизнеспособный клон крупного рогатого скота получен в ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста в 2020 году. Клон получен в ходе эксперимента с участием 31 реципиента, от которых выращен и пересажен 81 эмбрион. После пересадки диагностировано 14 случаев стельности, 13 из которых прервались на ранних этапах, в первую половину стельности. В итоге был получен один живой клон, телочка, и это составляет 3,3 % от числа занятых в опыте реципиентов. Итоговая эффективность данного опыта по отношению к числу пересаженных эмбрионов составляет 1,2 процента (рис. 6).

Пересажено эмбрионов, п	81
Число реципиентов, п	31
<u>Стельные</u> по результатам УЗИ, п (%)	14 (43,8%)
Эмбриональная смертность: 60 – 90 дн. / 90-120 дн., п	10 / 3
<u>Отелилось</u> реципиентов, голов (%)	1 (3,3 %)



Возраст 1 день, вес – 63 кг



Возраст 1 год, вес – 410 кг



Возраст 2 года, вес – 580 кг



Получение потомства, вес – 40 кг

Рисунок 6. Первый в России клон крупного рогатого скота, полученный методом пересадки ядер соматических клеток (SCNT)

К сожалению, сегодня о реальном, производственном использовании клонирования в практическом животноводстве Российской Федерации пока можно говорить, как о возможном инструменте будущих систем селекции. Новейшие методы пока не выходят за пределы лабораторий и специализированных клиник, требуют огромных материальных затрат, времени, сил и высокой квалификации специалистов. Кроме того, их результативность невысокая, поэтому сегодня необходимы дополнительные глубокие исследования для всестороннего развития высоких биотехнологий до стадии широкого производственного внедрения. И тем не менее, уже сегодня эти биотехнологические приемы могут быть использованы при исполнении важнейшей миссии по сохранению и развитию генетических ресурсов сельскохозяйственных животных нашей страны. Биотехнология в полном формате исследованных, апробированных на практике и подтвердивших свою эффективность форм и методов воздействия на наследственные структуры и репродуктивные возможности организма животных прочно входят в стратегию сохранения генофонда отечественных пород на основе использования генетических и репродуктивных технологий, осуществляемую Национальным центром генетических ресурсов сельскохозяйственных животных.

Закключение. К настоящему времени в системе ведения отечественного животноводства сформирована парадигма представлений о приоритетных направлениях развития данного сегмента экономики, основанных на возможностях максимально широкого применения в производстве самых высокопродуктивных селекционных форм различных видов животных. Реализация этой парадигмы сопряжена с необходимостью неотложного достижения бездефицитного уровня производства всех видов отечественной животноводческой продукции на фоне объективно длинных циклов воспроизводства и выращивания поголовья в отрасли. Иными словами, традиционная селекция может радикально обновить генетику животных с опозданием, которое объективно нетерпимо. В то же время, в стремлении достичь быстрого улучшения продуктивности пород путем острых скрещиваний и тотальной метизации можно потерять ценные качества отечественных животных, выработанные многовековой эволюцией. Этот отечественный

оригинальный генофонд не должен быть размыт скрещиваниями до конца, по крайней мере, нужно иметь эффективные инструменты его сохранения и восстановления в условиях неизбежной конкуренции с мировыми лидерами продуктивности. Эта миссия – сохранить исторические преимущества нашего скота и оперативно создать конкурентоспособные промышленные образцы селекционных форм животных – выпала на современные генетические методы и биотехнологии. Сегодня арсенал разработанных отечественными и зарубежными исследователями методов управления репродуктивными функциями животных и использования генетических технологий в селекции позволяет с успехом решать стратегические задачи в сфере племенного и промышленного животноводства в полном объеме.

Литература

1. Багиров В.А., Зиновьева Н.А. Современное состояние и мировой опыт сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных // Успехи наук о животных. 2024. № 1. С. 5—24.
2. Rexroad C., Vallet J., Matukumalli L.K., Reecy J., Bickhart D., Blackburn H., Boggess M., Cheng H., Clutter A., Cockett N. Ernst C., Fulton J.E., Liu J., Lunney J., Neibergs H., Purcell C., Smith T.P.L., Sonstegard T., Taylor J., Telugu B., Eenennaam A.V., Tassell C.P.V., Wells K. Genome to Phenome: Improving Animal Health, Production, and Well-Being – A New USDA Blueprint for Animal Genome Research 2018-2027 // Front Genet., 2019,10:327. doi: 10.3389/fgene.2019.00327.
3. Указ Президента Российской Федерации от 21.01.2020 г №20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации». URL: <https://base.garant.ru/73438425/> (Дата обращения: 13.03.2025).
4. Стрекозов Н.И., Чинаров В.И. Проблемы импортозамещения в молочном скотоводстве // Вестник ОрелГАУ. 2014. № 5(50). С.150—155.
5. Паронян И.А. Современное состояние генофонда молочных и молочно-мясных пород крупного рогатого скота в Российской Федерации // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 6. С. 79—83.
6. Чинаров В.И. Породные ресурсы скотоводства России // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 7. С. 80—85.
7. Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах Российской Федерации (2023 год). М.: ФГБНУ ВНИИплем. 2024. 242 с.
8. Указ Президента Российской Федерации от 19 03 2024 г. №195 «О Национальном центре генетических ресурсов сельскохозяйственных животных». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202403190018> (Дата обращения: 10.03.2025).
9. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 10 2024 г. «В соответствии с подпунктом "б" пункта 6 Указа Президента Российской Федерации от 19 марта 2024 г. N 195 "О Национальном центре генетических ресурсов сельскохозяйственных животных" утвердить прилагаемую Программу развития Национального центра генетических ресурсов сельскохозяйственных животных на 2024 – 2030 годы. URL: <https://base.garant.ru/410613246/> (Дата обращения: 10.03.2025).
10. Зиновьева Н.А., Позябин С.В., Чинаров Р.Ю. Вспомогательные репродуктивные технологии: история становления и роль в развитии генетических технологий в скотоводстве (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55. № 2. С. 225—242.
11. Лебедева Л.Ф., Калашников В.В., Баковецкая О.В., Терехина А.А., Солодова Е.В., Абаленихина Ю.В., Щулькин А.В. Разработка и использование вспомогательных репродуктивных технологий в коневодстве (обзор) // Коневодство и конный спорт. 2025. № 1. С. 4—8.
12. Калашников В.В., Лебедева Л.Ф., Зайцев А.М., Блохина Н.В., Калинкина Г.В., Стародумов М.И., Сулейманов О.И., Дацышин А.А., Шемарыкин А.Е., Рыгина Е.С., Баковецкая О.В., Терехина А.А., Булатова А.А. Современные вызовы в коневодстве России и биотехнологические методы в селекции лошадей // Коневодство и конный спорт. 2023. № 6. С. 4—9.
13. Лебедева Л.Ф., Атрощенко М.М., Бурмистрова С.А. Основные факторы, влияющие на результативность осеменения кобыл спермой, криоконсервированной по российским и зарубежным технологиям // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. С. 476—485. doi: 10.15389/agrobiology.2015.4.476rus
14. НИР / ВНИИ коневодства; Руководитель Г.В. Паршутин. Инв.№ 80. М., 1956. С. 18-27. – Отв. исполн. А.Н.Буйко, Е.С.Кружкова.

15. Румянцева В.А. Разработка метода замораживания спермы жеребца при температуре -79 °С с малым количеством глицерина // Бюллетень научно-технической информации. 1959. №4-5. С.39—42.
16. Платов Е.М. Замораживание семени быка в глицериновой компенсированной среде // Животноводство. 1963. № 8. С. 92—94.
17. Платов Е.М. Теоретические и практические основы замораживания семени производителей сельскохозяйственных животных: автореф. дис. д-ра биол. наук. Дубровицы, 1973. 42 с.
18. Ромбе С.М. Длительное хранение спермы жеребца при глубоком замораживании // Коневодство в опытах: сб. науч. тр. М.: ВНИИ коневодства. 1967. Т. 24, Ч.1. С.215—238.
19. Науменков А.И., Романькова Н.К. Разбавитель семени // Коневодство и конный спорт. 1970. №5. С. 33.
20. Кувшинов А.П. Искусственное оплодотворение крестьянских кобыл. М.: Новая деревня, 1924. 16 с. (Библиотека крестьянина).
21. Енишерлов Н.П. Результаты опытов искусственного осеменения кобыл и влияние первого оплодотворителя на последующие приплоды // Коннозаводства. 1898. №1. С.147.
22. Паршутин, Г.В. 50 лет искусственного осеменения лошадей // Коневодство. 1950. № 1. С. 27—31.
23. Платов Е.М., Е.С. Пустовая, В.А. Котягина, Н.К. Романькова. Длительное хранение спермы жеребца // Ветеринария. 1970. №10. С. 103—111.
24. Ожин Ф.В., Скаткин П.Н. Значение искусственного осеменения и краткие сведения о его развитии // Ф.В. Ожин, И.И. Родин, Н.В. Румянцев, П.Н. Скаткин, Н. П. Шергин. Искусственное осеменение сельскохозяйственных животных. Изд. 3. М., 1961. С.5—24.
25. Лебедева Л.Ф. Методы оптимизации технологии воспроизводства в племенном коневодстве: диссертация доктора сельскохозяйственных наук: 06.02.10. ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства, 2017. 303 с.
26. Чинаров Р.Ю., Луканина В.А. Производство эмбрионов крупного рогатого скота с использованием прижизненно получаемых ооцитов: мировые тренды и перспективы (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2023. №37 (9). С. 31—38.
27. Allen WR. Transfer of ova between horses and donkeys / W.R. Allen, I. E. A. Rowson // Proc. of the 7th International Congress on Animal Reproduction and Artificial Insemination. Munich, 1972. P. 484—487.
28. Oguri N. Non-surgical egg transfer in mares / N. Oguri, Y. Tsutsumi // J. Reprod. Fert. 1974. Vol.41. P.313-320.
29. Лебедева Л.Ф. Эмбриотехнологии в современной системе воспроизводства лошадей // Коневодство и конный спорт. 2020. №6. С. 19—22.
30. Strickland C. Embryo Transfer for Horses [Электронный ресурс] / C. Strickland. 2001. Режим доступа: <http://www.thehorse.com/articles/10245/embryo-transfer-for-horses>.
31. Carnevale E.M. Clinical use of intracytoplasmic sperm injection in horses / E. M. Carnevale J. Stokes, E. L. Squires, L. F. Campos-Chillon, J. T. Altermatt // Proc. 53th Annual Meeting of American Association of Equine Practitioners (AAEP). Orlando, 2007. P. 22—24.
32. Choi Y.H. Equine blastocyst development after intracytoplasmic injection of sperm subjected to two freeze-thaw cycles / Y. H. Choi, C. C. Love, L. B. Love, D. D. Varner, K. Hinrichs // Theriogenology. 2006. Vol. 65. P. 808—819.
33. Carnevale E.M. Comparison of culture and insemination techniques for equine oocyte transfer / E. M. Carnevale, L. J. Maclellan, S. Coutinho, T. J. Scott, E. L. Squires // Theriogenology. 2000. Vol. 54. P.981—987.
34. Carnevale E.M. Oocyte transfer and gamete intrafallopian transfer in the mare / E. M. Carnevale // J. Anim. Reprod. Sci. 2004. Vol. 82—83. P. 617—624.
35. Galli C. Pregnancy: a cloned horse born to its dam twin / C. Galli, I. Lagutina, G. Crotti, S. Colleoni [et al.] // Nature. 2003. Vol. 424. P.635—636.
36. Gastal E.L. Role of diameter differences among follicles in selection of a future dominant follicle in mares / E. L. Gastal, M. O. Gastal, D. R. Bergfelt, O. J. Ginther // Biol. Reprod. 1997. Vol. 57. P.1320—1327.
37. Woods G.L. A mule cloned from fetal cells by nuclear transfer / G. L. Woods, K. L. White, D. K. Vanderwall, G. P. Li [et al.] // Science. 2003. Vol.301. P.1063.
38. Gambini A. Equine cloning: in vitro and in vivo development of aggregated embryos / A. Gambini, J. Jarazo, R. Olivera, D. F. Salamone // Biol. Reprod. -2012.- Vol.87, №15. — P. 1-9.

39. Hinrichs, K. Production of cloned foals using roscovitine-treated donor cells and activation with sperm extract and/or ionomycin /K. Hinrichs, Y. Choi, D. D. Varner, D. L. Hartman //Reproduction.– 2007. – Vol.134.-P. 319-325.
40. Guignot, F. Genotyping and cryopreservation of equine embryos: New developments / F. Guignot // Book of Abstracts of the 64th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science (26—30 august 2013). Nantes (Fr.). 2013. P.125.
41. Hinrichs K. Equine embryo biopsy, genetic testing, and cryopreservation / K. Hinrichs, Y. Choi // J. Equine Vet. Sci. 2012. Vol. 32. P.390—396.
42. Galli C. Equine assisted reproduction and embryo technologies / C. Galli ,S. Colleoni, R. Duchi, I. Lagutina, G. Lazzari // J. Anim. Reprod. 2013. Vol.10. №3. P.334—343.
43. Сингина Г.Н., Сергиев П..В., Лопухов А.В., Рубцова М.П., Тарадайник Н.П., Равин Н.В., Шедова Е.Н., Тарадайник ТО ЕСТЬ, Полежаева И.А, Доцев А.В., Брем Г., Донцова О.А., Зиновьева Н.А. Получение клонированного потомства и редактирование генома эмбриональных фибробластов с использованием системы CRISPR/CAS9 у крупного рогатого скота. // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни. 2021. Т. 496. №1. С.99—103.
44. Сингина Г.Н., Лопухов А.В., Шедова Е.Н., Жукова А.С. Влияние условий подготовки ооцитов и донорских клеток на эффективность соматического клонирования у домашней овцы ((Ovis aries) // Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59, №4. С. 692—703.

УДК 636.087.8:615.355+612:636

Факторы гуморального иммунитета (IgG) и их роль в иммунитете телят: обзор

Абилов А.И., Устименко А.В.

ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста,
Московская обл., Россия

Аннотация. Пассивный иммунитет, получаемый с молозивом, имеет решающее значение для здоровья и благополучия новорожденных телят. Существует огромное количество факторов, которые могут влиять на усвоение иммуноглобулинов (IgG) телятами, которые важно учитывать начиная с подготовки стельных животных к отелу и заканчивая технологией подготовки, сбора и выпойки непосредственно молозива. Прямые и непрямые методы позволяют оценивать качество и количество IgG, а также качество проведения процедуры передачи пассивного иммунитета теленку. Таким образом, технология работы с молозивом является ключевой частью профилактики заболеваний и смертности у молодых молочных телят.

Ключевые слова: телята, пассивный перенос иммунитета, иммуноглобулины, методы мониторинга.

Для цитирования: Абилов А.И., Устименко А.В. Факторы гуморального иммунитета (IgG) и их роль в иммунитете телят: обзор // Успехи наук о животных. 2025. № 2. С. 21—33. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.002

Humoral immunity factors (IgG) and their role in calf immunity: a review

A.I. Abilov, A.V. Ustimenko

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry
Moscow Region, Russia

Abstract. Passive immunity obtained with colostrum is of critical importance for the health and well-being of newborn calves. There are a large number of factors that can influence the absorption of immunoglobulins (IgG) by calves, which are important to consider from the preparation of pregnant animals for calving to the technology of preparation, collection and feeding of colostrum itself. Direct and indirect methods allow us to evaluate the quality and quantity of IgG, as well as the quality of the procedure for transferring passive immunity to the calf. Thus, the technology of working with colostrum is a key part of the prevention of diseases and mortality in young dairy calves.

Keywords: calves, passive transfer of immunity, immunoglobulins, monitoring methods.

For citation: Abilov AI, Ustimenko AV. Humoral immunity factors (IgG) and their role in calf immunity: a review. Ernst Journal of Animal Science. 2025. 2: 21—33. Russian. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.002

Введение. Для эффективной работы и стабильного развития молочного скотоводства необходимо получать достаточное количество ремонтного молодняка, а именно тёлочек. Благодаря этому в последнее время получило широкое распространение использование разделенной по полу спермы [1]. Помимо получения достаточного количества телят определенного пола важно снизить их потери в критический молозивный период. Здоровье новорожденного молодняка является актуальной задачей, стоящей перед специалистами хозяйств и наукой [2].

Телята при рождении не имеют специфической резистентности к патогенам, поэтому пассивный иммунитет, который обеспечивается при передаче материнских антител, играет важнейшую роль в защите новорожденных от инфекционных агентов [3, 4]. Самой уязвимой к различным заболеваниям группой являются телята до отъема (примерно до 2-2,5 месяцев после рождения), у них также регистрируется наивысший процент смертности по сравнению с другими периодами выращивания [5].

Плацента у крупного рогатого скота создана таким образом, что кровообращение матери и плода полностью разделены, что исключает внутриутробную передачу иммуноглобулинов от матери к теленку [6], поэтому пассивный иммунитет обеспечивается только выпойкой молозива.

Роль молозива и иммуноглобулинов в активации иммунитета у телят.

Молозиво – секрет молочной железы млекопитающих, который образуется перед отелом и в первые несколько суток после него [7, 8]. Состав и физические свойства молозива коров сильно варьируются из-за ряда факторов, включая индивидуальность, породу, количество отелов, рацион до отела, продолжительность сухостойного периода и время после него [9]. Оно представляет собой многокомпонентную жидкость, богатую питательными веществами, а также характеризуется высоким уровнем биоактивных составляющих, таких как иммуноглобулины (Ig), факторы роста, особенно инсулиноподобный фактор роста-1 (IGF-1), который увеличивает размер ворсинок энтеральных клеток, что позволяет повысить всасывание питательных веществ в кишечнике телят [10]; трансформирующий фактор роста бета-2 (TGF- β 2) и гормон роста (GH), а также лактоферрин, лизоцим и лактопероксидаза [11, 12]. Кроме того, в молозиве присутствуют важные для новорожденных животных минералы: кальций, магний, железо, марганец, цинк, селен и различные водо- и жирорастворимые витамины [13, 14]. Иммуноглобулины являются ценнейшими компонентами молозива для новорожденных и представляют собой антитела, которые обладают способностью связываться с антигенами [6, 15]. Они делятся на классы, различающиеся по физико-химическим, биологическим и иммунологическим свойствам [16], и у крупного рогатого скота представлены несколькими фракциями: IgG, IgA и IgM. Существует два типа IgG: IgG1 и IgG2, которые обнаружены в кровообращении и внеклеточной жидкости [8], их соотношение друг к другу составляет 35:1, также они участвуют в обеспечении пассивного иммунитета у телят до тех пор, пока полностью не активизируется их собственная иммунная система [17]. В то же время оба типа IgG являются основными иммуноглобулинами в молозиве, и известно, что они составляют до 90% от общего количества всех Ig [18]. В то время как IgG транспортируется через альвеолярный эпителий с помощью рецепторно-опосредованного механизма, IgM и IgA локально вырабатываются в молочной железе плазмócитами [19]. IgA и IgM в молозиве составляют 5 и 7% соответственно [20]. Антитела IgG могут активировать комплемент и sensibilizировать кожу крупного рогатого скота. IgM важен для нейтрализации вирусов и активации комплемента [16]. IgA обнаруживается в большинстве слизистых секретов и предотвращает инфекцию путем агглютинации инфекционных агентов. Кроме того, IgA способствует колонизации комменсальных бактерий в кишечнике и дыхательных путях [21].

Помимо иммуноглобулинов Zhang L. с соавторами [22] в своих исследованиях пришли к выводу, что наиболее распространенные белки в молозиве имеют биологические функции в иммунной системе. Функции различаются в зависимости от белка, но они участвуют в каскаде коагуляции и системе комплемента. Таким образом, молозиво передает не только адаптивный иммунитет, но и врожденный иммунитет. Конкретные биологические роли каждого белка, присутствующего в молозиве телят, еще не полностью изучены, однако есть веские доказательства того, что они помогают иммунной системе телят [23].

Факторы, влияющие на пассивный перенос иммунитета. Потребление молозива и перенос иммуноглобулинов в кровь теленка получило название «пассивный перенос иммунитета» [24]. От качества проведения процедуры передачи молозива от матери теленку зависит его дальнейшая судьба. Для успешного пассивного переноса необходимо учитывать следующие факторы, связанные с молозивом: качество, количество, которое выпоили теленку, и время первого кормления [6]. Не менее важен уровень бактериальной обсемененности [25]. Теленок должен потребить достаточное количество иммуноглобулинов с молозивом, а также быть в состоянии усвоить их [5, 6, 26].

Наиболее важным показателем для оценки пассивного переноса у телят является концентрация сывороточного иммуноглобулина G [27]. Уровень IgG ниже 10 мг/мл или 5,2 г/дл сывороточного протеина через 24–48 ч. после рождения указывает на нарушение пассивного переноса и является стандартом для оценки [26]. Стандарт для достижения уровня адекватного пассивного переноса на ферме важен для помощи в установлении целей выращивания [28]. Профилактика заболеваемости и смертности телят до отъема многогранна и включает в себя не только высокую концентрацию сывороточного IgG, но и адекватное кормление, содержание, отсутствие стресса, ограниченное воздействие потенциальных патогенов [29]. В недавних исследованиях [24] было предложено изменение стандарта и разделение оценки передачи пассивного иммунитета на 4 категории: отличная, хорошая, удовлетворительная и плохая с уровнями сывороточного IgG $\geq 25,0$, 18,0–24,9, 10,0–17,9 и <10 г/л соответственно. Внедрение предлагаемого стандарта должно дополнительно снизить риск как смертности, так и заболеваемости новорожденных телят.

Неспособность обеспечить адекватный пассивный перенос увеличивает риск заболеваний желудочно-кишечного тракта [30], смертность до и после отъема, а также приводит к снижению среднесуточного привеса, фертильности и производства молока в первую и вторую лактацию [31, 32].

Сроки сбора молозива и выпойки телят. У телят после рождения есть возможность транспортировать иммуноглобулины через стенку кишечника путем пиноцитоза [33], которая снижается с возрастающей скоростью и прекращается полностью примерно через 24 часа [13, 34], по истечении которых абсорбция Ig станет невозможной [35]. Этот механизм называют «закрытие» [36] и связывают с созреванием клеток кишечника, которые спустя время после рождения теленка, начинают заменяться на зрелые эпителиальные клетки [13]. Более ранние исследования также предполагали, что на закрытие тонкого кишечника могут оказывать влияние гормоны. В исследованиях рассматривался «шок кортизола», который возникал при задержке времени первой выпойки молозивом, которая, в свою очередь, может влиять на способность кишечника абсорбировать иммуноглобулины [37, 38]. Помимо механизма «закрытия кишечника» новорожденных телят, у самок после отела прекращается транспорт иммуноглобулинов из крови в вымя. Вместо этого начинается пассивная резорбция – движение иммуноглобулинов из вымени в кровь. Кроме этого, происходит разбавление иммуноглобулинов в вымени [39]. В одном из исследований показано, что с каждым часом после отела наблюдалось снижение уровня IgG в молозиве на 3,7% [40]. Все это свидетельствует о том, что молозиво необходимо и собирать, и выпаивать им телят в течение первых часов после отела [6, 34].

Качество и количество молозива. Качество молозива является наиболее важным фактором в процессе выпойки молозивом. Оно характеризуется концентрацией IgG, присутствующей в нем. Рекомендуемый уровень составляет 50 г/л и более [41]. Качество молозива варьирует, и эта изменчивость определяется как индивидуальными особенностями, так и другими факторами, такими как лактация [42] сухостойный рацион, сезон [43], порода [44], продолжительность сухостойного периода, вакцинация коровы и задержка сбора молозива.

В исследованиях Бакаевой Л.Н. [44] изучалось содержание иммуноглобулинов в молозиве у коров разных пород. Самый высокий уровень авторы отмечали у коров бестужевской породы (106,78 г/л), у коров голштинской породы в этом исследовании молозиво признали неполноценным. Однако, в другом исследовании Morrill K.M. с соавторами [45], проведенном в разных штатах США, было показано, что молозиво коров голштинской породы имеет высокие показатели по содержанию иммуноглобулинов даже выше, чем у джерсейской породы (74,2 мг/мл против 65,8 мг/мл).

Молозиво от коров третьей лактации имело самые высокие концентрации IgG по сравнению с молозивом от коров первой и второй [42]. В более поздних исследованиях [46] также подтверждается, что концентрация и общая масса Ig у первотелок ниже, чем у коров старших возрастных групп. Это может быть результатом того, что такие коровы подвергались большему воздействию антигенов в течение жизни по сравнению с молодыми коровами, что привело к более высокому содержанию IgG в их молозиве. Утилизация молозива от первотелок когда-то была обычной практикой [47]. Однако результаты недавних исследований [48] не показали существенной разницы в качестве молозива между самками первой и второй лактации.

Влияние сезона отела на качество молозива и на количество иммуноглобулинов, содержащихся в нем, на данный момент спорно. Исследователи получают разные результаты при оценке этого фактора. Zarei S. с соавторами [43] отмечали, что сезон отела оказывает значительное влияние на концентрацию IgG и IgM в молозиве. Значимо более высокие концентрации IgG и IgM были зарегистрированы зимой, а самые низкие для IgG – весной и осенью. Тем не менее, в некоторых ранних исследованиях авторы не обнаружили никакого влияния сезона отела на концентрацию IgG [49, 50].

Период сухостоя может оказывать значительное влияние как на количество, так и на качество вырабатываемого молозива. Особенно это касается доения коров до отела. Период сухостоя должен длиться 21-28 дней, в течение которых секретирующие клетки вымени регенерируют и происходит процесс лактогенеза. Доение коров перед отелом влияет на снижение уровня иммуноглобулинов в молозиве, что приводит к снижению способности передавать пассивный иммунитет новорожденным. Самые высокие уровни жира и белка в молозиве были определены у коров, у которых период сухостоя длился 4 недели, в то время как наибольший уровень лактозы был определен у коров, у которых период сухостоя перед отелом составлял 2 недели [8].

При отсутствии молозива или его наличии с недостаточным количеством иммуноглобулинов специалисты хозяйств прибегают к использованию заменителей или обогатителей молозива. Заменители разрабатывались как замена материнскому молозиву, в основном их получают из молозива или плазмы [51], и они обязательно содержат витамины, минералы, жир и белок, которые критически важны для жизни новорожденного теленка. Этот продукт получают путем обработки молозива на производственном предприятии, где оно проходит термическую обработку, распылительную сушку, тестирование на IgG и стандартизацию [52]. Заменители молозива сильно различаются по концентрации IgG, но должны обеспечивать минимум 100 г IgG на дозу. Хотя заменители молозива можно использовать, когда высококачественное материнское молозиво

недоступно или при попытке минимизировать передачу заболеваний теленку от матери, натуральное молозиво чаще имеет более высокую концентрацию IgG и защищает от патогенов, специфичных для конкретной фермы [53]. Обогазаторы молозива, как правило, имеют более низкие, по сравнению с заменителями, концентрации IgG с плохой абсорбцией, так как предназначены для добавления IgG к материнскому молозиву низкого качества [54]. Они содержат от 25 до 60 г IgG на упаковку [52]. Обогазаторы и заменители молозива никогда не должны использоваться взаимозаменяемо между друг другом, поскольку не предназначены для разных целей. Удобство при использовании и низкая бактериальная нагрузка могут сделать эти продукты привлекательными для производителей и ветеринаров [55]. При проведении исследований с использованием коммерческих заменителей молозива было выявлено, что абсорбция иммуноглобулинов в сыворотке крови у телят была ниже по сравнению с применением натурального молозива [51]. В другом исследовании [41] кормление с использованием пищеводного зонда одной дозой (100 г IgG) заменителя, полученного из молозива, привело к более низким уровням IgG в сыворотке крови и неприемлемо высоким показателям нарушений пассивного переноса по сравнению с кормлением 3,8 л натурального молозива. При этом кормление 2 дозами (200 г IgG) того же заменителя показало очень высокий уровень IgG в сыворотке крови и отсутствие случаев нарушения пассивного переноса, что эквивалентно кормлению 3,8 л высококачественного натурального молозива.

Качество молозива можно проверить, измерив концентрацию IgG с помощью радиальной иммунодиффузии (РИД), иммуноферментных анализов (ИФА), колострометра или рефрактометра Брикса [56]. Прямые методы измерения (лабораторные анализы) хоть и являются наиболее точными, но их невозможно использовать в условиях хозяйства [42].

При сравнении результатов исследований иммуноглобулинов в молозиве авторы [57] отметили, что между методами разница значительна, и на основании этого, не рекомендуют прямое сравнение результатов ИФА и РИД с концентрацией IgG в молозиве.

Определение качества молозива с помощью колострометра и рефрактометра Брикса является более доступным и распространенным способом в условиях промышленных ферм. Рефрактометрия с использованием рефрактометра Брикс была предложена в качестве средства оценки концентрации IgG в молозиве коров. Рефрактометр имеет следующие преимущества перед другими методами оценки концентрации IgG: невысокая стоимость и доступность, он также менее хрупкий и не чувствителен к изменению температуры молозива, смене времени года и другим факторам [58]. При использовании рефрактометрии по Бриксу авторы [59] рекомендуют показатель 21% Брикс в качестве порогового значения высококачественного молозива (то есть в молозиве содержится более 50 г IgG/л) для первотелок, для коров, старше 2-й лактации – 22% Брикс. Аналогичные данные у Quigley J. D [58], определившие порог в 21% Брикс.

Что касается необходимого количества молозива для выпаиваемого, то в ранних исследованиях предполагали, что новорожденные телята должны получать приблизительно 2 л в первые несколько часов после рождения [36]. Позже для максимизации концентрации сывороточного иммуноглобулина были предложены новые нормы, предписывающие необходимость использования 4 л молозива, разделенного на 2 кормления в течение 12 часов после рождения [60]. В 1997 году Morin D. E. с соавторами [50] в своих исследованиях доказали, что выпаивание 4 л молозива при рождении показало лучшую концентрацию сывороточного IgG, чем в исследованиях Roy J. H. B. [60].

На протяжении нескольких десятилетий практические рекомендации по количеству используемого молозива были 10% от живой массы или 3-4 литра с концентрацией более 50 мг/мл [6, 61]. Osaka I. с соавторами [62] пришли к выводу, что для успешного пассивного переноса телятам необходимо выпить более 3-х литров молозива с концентрацией Ig не

менее 40 мг/мл в течение 6 ч после рождения. Помимо этого, современные крупные предприятия переходят на выпойку телят через пищеводную трубку (зонд) для ускоренной передачи необходимого количества молозива непосредственно в сычуг [63]. Однако существуют риски, связанные с использованием пищевого кормления с неправильным размещением зонда у теленка и повреждением пищевода или, что еще важнее, аспирацией жидкости в легкие.

Гигиена молозива. Так как всасывание через стенку кишечника у новорожденных является неселективным, то помимо полезных иммуноглобулинов в системный кровоток могут попадать и патогенные микроорганизмы, такие как *Escherichia coli*. Колонизация кишечника и абсорбция кишечной палочки может привести к неонатальной инфекции, включая кишечные заболевания и септицемию [21, 64]. Поэтому следует уделить особое внимание поддержанию надлежащей гигиены вымени непосредственно перед сбором молозива и санитарную обработку оборудования, используемого во время сбора, хранения и кормления телят [65].

Gelsinger S. L. с соавторами [25] провели исследование бактериальной обсемененности молозива и пришли к выводу, что высокое содержание бактерий отрицательно влияет на концентрацию IgG в плазме. Существует предположение о том, что микроорганизмы могут связывать иммуноглобулины, не позволяя им усвоиться.

Для снижения бактериальной нагрузки некоторые исследователи рекомендуют использовать пастеризацию молозива [21]. Meylan M. с соавторами [66] описал потерю около 12% IgG после пастеризации образцов молозива при 63°C в течение 30 минут. Godden S. с соавторами [67] в аналогичных исследованиях получили более высокие потери концентраций IgG на 58,5 и 23,6% для партий объемом 95 и 57 л соответственно при таком же режиме пастеризации. Однако, Johnson J. L. с соавторами [68], используя пастеризацию при температуре 60 °C в течение 60 минут во время одного из своих экспериментов, не наблюдали никаких различий в концентрации IgG в молозиве по сравнению с контрольными образцами при нагревании восьмилитровых партий. Результаты вышеизложенных исследований показывают, что термическая обработка молозива коров при 60°C в течение 30–60 минут может считаться оптимальной при температуре и времени, когда снижение концентрации IgG будет незначительным, а элиминация числа бактерий существенной, но при этом не произойдет денатурация [68, 69]. Телята, получавшие термически обработанное молозиво, имели более высокие концентрации сывороточного IgG [6]. Одна из теорий, подтверждающих этот факт, заключается в том, что обработанное молозиво в просвете кишечника имеет меньше бактерий для связывания IgG, что приводит к его лучшему усвоению. Другая теория заключается в том, что снижается конкуренция между IgG молозива и микроорганизмами во время пиноцитоза, что приводит к повышению абсорбции [6, 68].

Таким образом, кормление телят термически обработанным молозивом может улучшить абсорбцию иммуноглобулинов в кишечнике и привести к сокращению количества дней диареи в первую неделю жизни [68].

Другие факторы. Важно упомянуть фактор дистокции. Телята, которые рождаются в процессе тяжелых родов и имеют различные степени гипоксии и метаболического ацидоза, показывают сниженные уровни IgG в сыворотке в течение 24 часов и повышенный риск нарушения пассивного переноса иммунитета по сравнению со здоровыми телятами, рожденными при нормальных родах [70, 71]. Кроме того, такие аспекты как гипотермия, слабый сосательный рефлекс и неспособность стоять в течение первого часа жизни, были связаны с нарушением переноса у молочных и мясных телят [72, 73].

Методы измерения концентрации иммуноглобулинов в сыворотке крови. Выживаемость и общее состояние здоровья новорожденных телят в течение первых

месяцев жизни в значительной степени определяются адекватным пассивным переносом. По этой причине мониторинг уровня сывороточного IgG как индикатора будущего здоровья телят является важной стратегией профилактики заболеваемости и смертности, связанных с нарушением пассивного переноса. Оценка сывороточного IgG у телят является стратегическим инструментом управления стадом, который позволяет производителям оценивать работу с молозивом и первой выпойкой в хозяйстве [74].

В настоящее время существуют прямые и непрямые методы для оценки иммунного статуса у телят [75], среди которых: радиальная иммунодиффузия, иммуноферментный анализ, турбидиметрический иммуноферментный анализ, STIGA (split trehalase IgG quantification assay), электрофорез [23, 76, 77]

«Золотым стандартом» определения иммунного статуса уже много лет является радиальная иммунодиффузия (РИД) поскольку является прямым полуколичественным тестом на бычий IgG, то есть эталонным тестом, который служит для сравнения с другими тестами для подтверждения нарушения пассивного переноса [77, 78].

РИД выявляет концентрацию определенного антигена или антитела в неизвестном образце. Однако, использование РИД является дорогостоящим, трудоёмким, требует длительного времени обработки, так как для получения результатов необходимо не менее 18–24 часов [58, 77, 79], а также подвержено ошибкам [80]. В одном из исследований [80] при сравнении двух тестов РИД и одного эталонного образца были выявлены значительные расхождения в результатах и показано плохое соответствие. В других научных работах было установлено, что РИД давал более высокие значения IgG, чем полученные при использовании других прямых методов, таких как ИФА [81]. Несмотря на это, радиальная иммунодиффузия остается стандартным методом для оценки нарушения пассивного переноса у телят.

Турбидиметрический иммуноферментный анализ для определения концентрации IgG в сыворотке или плазме телят был описан Etzel L. R. с соавторами [82]. Это достаточно точный и аккуратный аналитический метод при проведении в условиях лаборатории. Другие авторы [83] протестировали быстрый иммуноферментный анализ, предназначенный для проведения с помощью небольшого портативного лабораторного прибора, который обеспечивал измерение точной концентрации IgG в течение 10–15 минут. Авторы отметили, что коэффициент вариации турбидиметрического иммуноферментного метода анализа был аналогичен коэффициенту РИД (47,2 и 47,1% соответственно) и данные были очень схожи, что указывает на возможность его использования на фермах.

Иммуноферментный анализ (ИФА) — это полуколичественный тест определения концентрации иммуноглобулина, который является лабораторным тестом и имеет те же практические ограничения, хотя он дешевле РИД из-за большей доступности [57]. Gelsinger S.L. с соавторами [57] оценили образцы крови телят и обнаружили, что ИФА показал более низкие значения, чем РИД. Они предположили, что это отклонение специфично для ИФА из-за большого количества разбавлений в процессе проведения, тогда как у РИД они минимальны. Однако, Dunn A. с соавторами [81] проанализировали образцы сыворотки крови телят и обнаружили высокую корреляцию между двумя методами, но показатели по РИД также были выше, чем по ИФА.

Группа исследователей разработала анализ количественной оценки IgG с помощью расщепленной трегалазы (STIGA) [75], который совместим с применением на ферме. STIGA основан на гликолитическом ферменте трегалазе, преобразующей трегалозу в глюкозу, количество которой, в свою очередь, считывается или глюкометром или колориметрическим анализом. Производительность этого метода была проверена в формате, который можно было бы оптимизировать для полевых испытаний. Поскольку результаты хорошо коррелируют с данными РИД и для их получения необходим доступный

портативный глюкометр, STIGA устраняет необходимость в лабораторном оборудовании, привлечении квалифицированного персонала и подходит для использования в условиях фермы.

Электрофорез может быть интересным методом для лабораторного анализа нарушения пассивного переноса, поскольку он быстрый и более доступен в лабораториях, чем РИД. Однако для этого метода необходимо сгенерировать конкретные точки отсечения, чтобы можно было получить точные результаты для оценки нарушения переноса у новорожденных телят [84].

Для быстрого и упрощенного мониторинга передачи пассивного иммунитета у телят в хозяйствах широко используют рефрактометрию. Этот метод не требует использования дорогостоящего оборудования и привлечения отдельного обученного специалиста, но при этом дает представление, хоть и приблизительное, о концентрации иммуноглобулинов, так как они составляют большую часть протеинов сыворотки крови [23].

Иммуноглобулины составляют большую часть циркулирующих белков, обнаруженных в сыворотке новорожденных телят, а остальные белки относительно постоянны между телятами, поэтому тесты, основанные на оценке концентрации общего белка в сыворотке или плазме, обычно использовались для диагностики [6].

Использование рефрактометров, где показатель преломления сыворотки или плазмы измеряется, а затем преобразуется в концентрацию общего белка с использованием коэффициента преобразования, дает разумную оценку концентрации IgG в сыворотке, что имеет большую пользу для исследования нарушений пассивного переноса у телят в стаде, если проводить измерение в первые 24-48 часов после выпойки молозивом [86].

В разных исследованиях значением успешного пассивного переноса является Ig выше 10 г/л, эквивалентное значение по рефрактометру равно 5,5 г/дл и выше по шкале общего протеина сыворотки крови [58, 77]. Buczinski S. с соавторами [86] пришли к аналогичным выводам. Недавно группа экспертов по телятам из США и Канады пересмотрела пороговые значения [24]. Таким образом, пороговые значения, которые в настоящее время рассматриваются для обозначения уровня передачи пассивного переноса классифицируются как «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» и «плохо» эквивалентны 6,2 г/дл; от 5,8 до 6,1 г/дл, от 5,1 до 5,7 г/дл и менее 5,1 г/дл, соответственно.

Подобно рефрактометрам общего белка, цифровые и оптические рефрактометры Брикс определяют этот показатель в сыворотки крови, пропуская световой луч через образец к призме, измеряя показатель преломления и считывая его по шкале % BRIX. Они измеряют концентрацию сахарозы в жидкостях, а при использовании в жидкостях без сахарозы – процент Брикс приближается к общему проценту сухого вещества [21].

Пороговые значения, характеризующие адекватный пассивный перенос, на рефрактометрах Брикс варьировались у разных исследователей. Morrill K. M. с соавторами [45], к примеру, рекомендовали пороговое значение в 8,2% Брикс. В других исследованиях были предложены пороговые значения в 8,4% [87], 8,5% [88] и 8,8% [89]. У Thornhill J. B. с соавторами [90] практические рекомендации, описывающие успешный пассивный перенос, начинались от 10% Брикс и выше. Разные результаты могли быть связаны с использованием приборов разных производителей.

Благодаря такому экспресс мониторингу можно определить иммунный статус телят и выявить животных с нарушением пассивного переноса, за которыми необходимо будет наблюдать.

Также некоторые ученые [91] исследовали жизненные показатели телят, рожденных от спермы, разделенной по полу, и выявили, что такие телята были более слабые и имели низкую оценку жизненной силы, при этом об оценке переноса пассивного иммунитета в исследовании не говорилось. В других исследованиях телят, рожденных от семени,

разделенного по полу, проводили оценку также жизненной силы, живой массы в разные периоды, смертности до отела, но без оценки иммунного статуса [92]. Именно поэтому одной из важных целей в выращивании здорового молодняка является изучение уровня пассивного иммунитета у телят, полученных от семени, заготовленного разными способами замораживания.

Выводы. Изучение иммунитета телят является ключевым аспектом науки, так как здоровье молодняка напрямую влияет на эффективность животноводства и экономическую устойчивость сельскохозяйственных предприятий. При рождении новорожденные телята сразу подвергаются воздействию большого количества потенциальных патогенов, и только корректно проведенная первая выпойка высококачественным молозивом может обеспечить их адекватным уровнем пассивного иммунитета. Исследования в этой области способствуют разработке эффективных стратегий профилактики и лечения заболеваний у молодняка. Вклад исследований в данной области важен не только для практического животноводства, но и для фундаментальной науки, так как изучение иммунитета новорожденных животных помогает лучше понять иммунные процессы в целом.

Литература

1. Олексиевич Е.А. Использование сексированной спермы в молочном животноводстве // в сбор. Научное обеспечение развития АПК в условиях импортозамещения. – 2020. – с. 284–285
2. Соколовская Н. И., Абилов А. И., Бронская А. В., Субботин Д. Д. Сохранность телят-важный резерв улучшения воспроизводства //Животноводство. – 1987. – №. 8. – С. 45-47
3. Kampen A. H., Olsen I., Tollersrud T., Storset A. K., Lund A. Lymphocyte subpopulations and neutrophil function in calves during the first 6 months of life //Veterinary immunology and immunopathology. – 2006. – Т. 113, №. 1-2. – С. 53-63. DOI: 10.1016/j.vetimm.2006.04.001
4. Лоретц О. Г. Повышение естественной резистентности и сохранности телят в молочный период: научно-практические рекомендации. Екатеринбург: Издательство Уральского ГАУ, 2018. – 52 с
5. Barry J., Bokkers E. A., Berry D. P., de Boer I. J., McClure J., Kennedy E. Associations between colostrum management, passive immunity, calf-related hygiene practices, and rates of mortality in preweaning dairy calves //Journal of dairy science. – 2019. – Т. 102, №. 11. – С. 10266-10276. DOI: 10.3168/jds.2019-16815
6. Godden S. M., Lombard J. E., Woolums A. R. Colostrum management for dairy calves //Veterinary Clinics: Food Animal Practice. – 2019. – Т. 35, №. 3. – С. 535-556. DOI: 10.1016/j.cvfa.2019.07.005
7. McGrath B. A. et al. Composition and properties of bovine colostrum: a review//Dairy Science & Technology. – 2016. – Т. 96. – С. 133-158. DOI: 10.1007/s13594-015-0258-x
8. Puppel K., Gołębiewski M., Grodkowski G., Słószarz J., Kunowska-Słószarz M., Solarczyk P., Łukasiewicz M., Balcerak M., Przysucha T. Composition and factors affecting quality of bovine colostrum: A review //Animals. – 2019. – Т. 9, №. 12. – С. 1070. DOI: 10.3390/ani9121070
9. Бакаева Л. Н., Карамаева А. С., Карамаев С. В., Киргизова И. А. Динамика качества молозива первого удоя у коров молочных пород в зависимости от сезона отела // Молочное и мясное скотоводство. – 2018. – № 7. – С. 41-44
10. Georgiev I. P. Differences in chemical composition between cow colostrum and milk //Bulgarian Journal of Veterinary Medicine. – 2008. – Т. 11, №. 1. – С. 3-12.
11. Elfstrand L., Lindmark-Månsson H., Paulsson M., Nyberg L., Åkesson B. Immunoglobulins, growth factors and growth hormone in bovine colostrum and the effects of processing //International Dairy Journal. – 2002. – Т. 12, №. 11. – С. 879-887. DOI: 10.1016/S0958-6946(02)00089-4
12. Корякина Л. П., Степанов К. М., Павлова А. И. Клеточный и ферментный состав молозива // Молочная промышленность. – 2019. – № 3. – С. 59-61
13. Lopez A. J., Heinrichs A. J. Invited review: The importance of colostrum in the newborn dairy calf //Journal of dairy science. – 2022. – Т. 105, №. 4. – С. 2733-2749. DOI: 10.3168/jds.2020-20114
14. Донник И. М., Неверова О. П., Горелик О. В. Качество молозива и сохранность телят в условиях использования природных энтеросорбентов //Аграрный вестник Урала. – 2016. – №. 7 (149). – С. 4-8

15. Barrington G. M., Parish S. M. Bovine neonatal immunology //Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice. – 2001. – Т. 17, №. 3. – С. 463-476. DOI: 10.1016/S0749-0720(15)30001-3
16. Farrell Jr H. M., Jimenez-Flores R., Bleck G. T., Brown E. M., Butler J. E., Creamer L. K., Hicks C.L., Hollar C.M., Ng-Kwai-Hang K.F., Swaisgood, H. E. Nomenclature of the proteins of cows' milk—Sixth revision //Journal of dairy science. – 2004. – Т. 87, №. 6. – С. 1641-1674. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(04)73319-6
17. Jaster E. H. Evaluation of quality, quantity, and timing of colostrum feeding on immunoglobulin G1 absorption in Jersey calves //Journal of dairy science. – 2005. – Т. 88, №. 1. – С. 296-302. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(05)72687-4
18. Robbers L., Jorritsma R., Nielen M., Koets A. A scoping review of on-farm colostrum management practices for optimal transfer of immunity in dairy calves //Frontiers in Veterinary Science. – 2021. – Т. 8. – С. 668639. DOI:10.3389/fvets.2021.668639
19. Larson B. L., Heary Jr H. L., Devery J. E. Immunoglobulin production and transport by the mammary gland //Journal of Dairy Science. – 1980. – Т. 63, №. 4. – С. 665-671.. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(80)82988-2
20. Kaskous S., Fadlelmoula A. Immunoglobulin in colostrum and health of newborn calves //Scientific Journal of Review. – 2015. – Т. 4, №. 12. – С. 242-249. DOI: 10.14196/sjr.v4i12.2075
21. Stockler J., Chamorro M. F. Colostrum: A Review //Bovine Reproduction. – 2021. – С. 924-944. DOI: 10.1002/9781119602484.ch75
22. Zhang L., Boeren S., Hageman J. A., van Hooijdonk T., Vervoort J., Hettinga K. Bovine milk proteome in the first 9 days: protein interactions in maturation of the immune and digestive system of the newborn //PloS one. – 2015. – Т. 10, №. 2. – С. e0116710. DOI:10.1371/journal.pone.0116710
23. de Souza R. S., Dos Santos L. B. C., Melo I. O., Cerqueira D. M., Dumas J. V., Leme F. D. O. P., Moreira T.F., Meneses R.M., de Carvalho A.U., Facury-Filho E. J. Current diagnostic methods for assessing transfer of passive immunity in calves and possible improvements: A literature review //Animals. – 2021. – Т. 11, №. 10. – С. 2963. DOI:10.3390/ani11102963
24. Lombard J. et al. Consensus recommendations on calf-and herd-level passive immunity in dairy calves in the United States //Journal of dairy science. – 2020. – Т. 103, №. 8. – С. 7611-7624. DOI:10.3168/jds.2019-17955
25. Gelsinger S. L., Jones C. M., Heinrichs A. J. Effect of colostrum heat treatment and bacterial population on immunoglobulin G absorption and health of neonatal calves //Journal of Dairy Science. – 2015. – Т. 98, №. 7. – С. 4640-4645. DOI:10.3168/jds.2014-8790
26. Yang M., Zou Y., Wu Z. H., Li S. L., Cao Z. J. Colostrum quality affects immune system establishment and intestinal development of neonatal calves //Journal of dairy science. – 2015. – Т. 98, №. 10. – С. 7153-7163. DOI:10.3168/jds.2014-9238
27. Федоров Ю.Н., Клюкина В.И., Богомолова О.А., Романенко М.Н. Молозиво и пассивный иммунитет у новорожденных телят: обзор// Российский ветеринарный журнал. – 2018. – № 6. – С. 20–24. DOI:10.32416/article_5c050abdc381a5.42529397
28. Williams D. R., Pithua P., Garcia A., Champagne J., Haines D. M., Aly S. S. Effect of three colostrum diets on passive transfer of immunity and preweaning health in calves on a California dairy following colostrum management training //Veterinary medicine international. – 2014. – Т. 2014, №. 1. – С. 698741. DOI:10.1155/2014/698741
29. Heinrichs A. J., Heinrichs B. S. A prospective study of calf factors affecting first-lactation and lifetime milk production and age of cows when removed from the herd //Journal of dairy science. – 2011. – Т. 94, №. 1. – С. 336-341. DOI:10.3168/jds.2010-3170
30. Ganchev G., Yavuz E., Todorov N. Effect of feeding program for first two months after birth of female calves on growth, development and first lactation performance//Agricultural Science and Technology – 2015. – Т. 7, №. 4. – С. 389 – 401
31. Robison J. D., Stott G. H., DeNise S. K. Effects of passive immunity on growth and survival in the dairy heifer //Journal of dairy science. – 1988. – Т. 71, №. 5. – С. 1283-1287. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(88)79684-8
32. Stilwell G., Carvalho R. C. Clinical outcome of calves with failure of passive transfer as diagnosed by a commercially available IgG quick test kit //The Canadian Veterinary Journal. – 2011. – Т. 52, №. 5. – С. 524.
33. Шульга Н. Н., Шульга И.С., Плавшак Л. П., Дикунина С. С. Законы формирования иммуноглобулиновой составляющей молозива// Национальная Ассоциация Ученых. – 2016. – № 3-2. – С. 59-62
34. McGee M., Earley B. passive immunity in beef-suckler calves //Animal. – 2019. – Т. 13, №. 4. – С. 810-825. DOI:10.1017/S1751731118003026

35. Conneely M., Berry D. P., Murphy J. P., Lorenz I., Doherty M. L., Kennedy E. Effect of feeding colostrum at different volumes and subsequent number of transition milk feeds on the serum immunoglobulin G concentration and health status of dairy calves // *Journal of dairy science*. – 2014. – Т. 97, №. 11. – С. 6991-7000. DOI:10.3168/jds.2013-7494
36. Stott G. H. et al. Colostral immunoglobulin transfer in calves I. Period of absorption // *Journal of dairy science*. – 1979. – Т. 62, №. 10. – С. 1632-1638. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(79)83472-4
37. Kruse V., Buus O. Corticosteroids in cow and calf at parturition // *Acta Veterinaria Scandinavica*. – 1972. – Т. 13, №. 4. – С. 585-587. DOI:10.1186/BF03547163
38. Fischer A. J., Marx D. B., Menefee B. E., Nightengale G. T. Effect of delaying colostrum feeding on passive transfer and intestinal bacterial colonization in neonatal male Holstein calves // *Journal of dairy science*. – 2018. – Т. 101, №. 4. – С. 3099-3109. DOI:10.3168/jds.2017-13397
39. Lindley G. Bovine Colostrum and Its Management in UK Dairy Herds // *Animal Science Cases*. – 2024. DOI:10.1079/animalsciencecases.2024.0001
40. Morin D. E., Nelson S. V., Reid E. D., Nagy D. W., Dahl G. E., Constable P. D. Effect of colostrum volume, interval between calving and first milking, and photoperiod on colostrum IgG concentrations in dairy cows // *Journal of the American Veterinary Medical Association*. – 2010. – Т. 237, №. 4. – С. 420-428. DOI:10.2460/javma.237.4.420
41. Godden S. M., Haines D. M., Hagman D. Improving passive transfer of immunoglobulins in calves. I: Dose effect of feeding a commercial colostrum replacer // *Journal of dairy science*. – 2009. – Т. 92, №. 4. – С. 1750-1757. DOI:10.3168/jds.2008-1846
42. Bartier A. L., Windeyer M. C., Doepel L. Evaluation of on-farm tools for colostrum quality measurement // *Journal of dairy science*. – 2015. – Т. 98, №. 3. – С. 1878-1884. DOI:10.3168/jds.2014-8415
43. Zarei S., Ghorbani G. R., Khorvash M., Martin O. B., Mahdavi A. H., Riasi A. The impact of season, parity, and volume of colostrum on Holstein dairy cows colostrum composition// *Agricultural Sciences* – 2017–. Т. 8, №. 7 – С. 572-581 DOI:10.4236/as.2017.87043
44. Бакаева Л. Н., Карамаева А.С., Карамаев С.В. Формирование иммунного статуса у новорожденных телят молочных и комбинированных пород // *Молочное и мясное скотоводство*. – 2019. – № 1. – С. 32-36.
45. Morrill K. M., E. Conrad A. Lago J. Campbell J. Quigley, H. Tyler. Nationwide evaluation of quality and composition of colostrum on dairy farms in the United States // *Journal of dairy science*. – 2012. – Т. 95, №. 7. – С. 3997-4005. DOI:10.3168/jds.2011-5174
46. Gross J. J., Kessler E. C., Bruckmaier R. M. Quarter vs. composite colostrum composition assessed by Brix refractometry, specific gravity and visual color appearance in primiparous and multiparous dairy cows // *Translational animal science*. – 2017. – Т. 1, №. 1. – С. 26-35. DOI:10.2527/tas2016.0001
47. Tyler J. W., Steevens B. J., Hostetler D. E., Holle J. M., Denbigh J. L. Colostral immunoglobulin concentrations in Holstein and Guernsey cows// *American Journal of Veterinary Research*. – 1999. – Т. 60, №. 9. – С. 1136-1139 DOI:10.2460/ajvr.1999.60.09.1136
48. Shivley C. B., Lombard J., Urie N. J., Haines D. M., Sargent R., Kopral C. A., Earleywine T.J., Olson J.D., Garry, F. B. Preweaned heifer management on US dairy operations: Part II. Factors associated with colostrum quality and passive transfer status of dairy heifer calves // *Journal of dairy science*. – 2018. – Т. 101, №. 10. – С. 9185-9198. DOI:10.3168/jds.2017-14008
49. Pritchett L.C., Gay C.C., Besser T.E. Hancock D. Management and production factors influencing immunoglobulin G1 concentration in colostrum from Holstein cows // *Journal of dairy science*. – 1991. – Т. 74, №. 7. – С. 2336-2341. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(91)78406-3
50. Morin D. E., McCoy G. C., Hurley W. L. Effects of quality, quantity, and timing of colostrum feeding and addition of a dried colostrum supplement on immunoglobulin G1 absorption in Holstein bull calves // *Journal of dairy science*. – 1997. – Т. 80, №. 4. – С. 747-753. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(97)75994-0
51. Swan H., Godden S., Bey R., Wells S., Fetrow J., Chester-Jones H. Passive transfer of immunoglobulin G and preweaning health in Holstein calves fed a commercial colostrum replacer // *Journal of Dairy Science*. – 2007. – Т. 90, №. 8. – С. 3857-3866. DOI:10.3168/jds.2007-0152
52. Godden S., James R. E. Colostrum and milk replacers // *Large Animal Internal Medicine*. – 2020. – С. 382-393. DOI:10.1016/B978-0-323-55445-9.00021-5
53. Pithua P., Aly S. S., Champagne J., Hendrick S., Middleton J. R., Poock S. E. Passive transfer of immunity, preweaning health, and growth in Holstein calves fed a bovine lacteal-derived colostrum replacer or raw pooled colostrum // *American Association of Bovine Practitioners Conference Proceedings*. – 2011. – С. 173-173.
54. Windeyer M. C., Leslie K. E., Godden S. M., Hodgins D. C., Lissemore K. D., LeBlanc S. J. Factors associated with morbidity, mortality, and growth of dairy heifer calves up to 3 months of age // *Preventive veterinary medicine*. – 2014. – Т. 113, №. 2. – С. 231-240. DOI:10.1016/j.prevetmed.2013.10.019

55. Cabral R. G., Chapman C. E., Erickson P. S. Colostrum supplements and replacers for dairy calves //The Professional Animal Scientist. – 2013. – Т. 29, №. 5. – С. 449-456. DOI:10.15232/S1080-7446(15)30265-5
56. Vandeputte S., Detilleux J., Rollin F. Investigation of colostrum quality in beef cattle by radial immunodiffusion and brix refractometry //The Veterinary Record. – 2014. – Т. 175, №. 14. – С. 353. DOI:10.1136/vr.101590
57. Gelsinger S. L., Smith A. M., Jones C. M., Heinrichs A. J. Comparison of radial immunodiffusion and ELISA for quantification of bovine immunoglobulin G in colostrum and plasma //Journal of dairy science. – 2015. – Т. 98, №. 6. – С. 4084-4089. DOI:10.3168/jds.2014-8491
58. Quigley J. D., Lago A., Chapman C., Erickson P., Polo J. Evaluation of the Brix refractometer to estimate immunoglobulin G concentration in bovine colostrum //Journal of dairy science. – 2013. – Т. 96, №. 2. – С. 1148-1155. DOI:10.3168/jds.2012-5823
59. Biemann V., Gillan J., Perkins N. R., Skidmore A. L., Godden S., Leslie K. E. An evaluation of Brix refractometry instruments for measurement of colostrum quality in dairy cattle //Journal of dairy science. – 2010. – Т. 93, №. 8. – С. 3713-3721 DOI:10.3168/jds.2009-2943
60. Roy J. H. B. Factors affecting susceptibility of calves to disease //Journal of dairy science. – 1980. – Т. 63, №. 4. – С. 650-664. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(80)82987-0
61. McGuirk S. M., Collins M. Managing the production, storage, and delivery of colostrum //Veterinary Clinics: Food Animal Practice. – 2004. – Т. 20, №. 3. – С. 593-603. DOI: 10.1016/j.cvfa.2004.06.005.
62. Osaka I., Matsui Y., Terada F. Effect of the mass of immunoglobulin (Ig) G intake and age at first colostrum feeding on serum IgG concentration in Holstein calves //Journal of dairy science. – 2014. – Т. 97, №. 10. – С. 6608-6612. DOI:10.3168/jds.2013-7571
63. Desjardins-Morrisette M., Van Niekerk J. K., Haines D., Sugino T., Oba M., Steele, M. A. The effect of tube versus bottle feeding colostrum on immunoglobulin G absorption, abomasal emptying, and plasma hormone concentrations in newborn calves //Journal of dairy science. – 2018. – Т. 101, №. 5. – С. 4168-4179. DOI:10.3168/jds.2017-13904
64. Corley L., Staley T., Bush L., Jones E. Influence of colostrum on transepithelial movement of Escherichia coli 055// Journal of dairy science – 1977. – Т. 60, № 9. – С. 1416–1421. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(77)84046-0
65. Mohanta K. P., Swain S. K., Das P., Lalmuansangi R. B., Rai S. Quality and composition of bovine colostrum //Agri-IndiaTODAY. – 2021. – №7. – С. 6-21
66. Meylan M., Rings D. M., Shulaw W. P., Kowalski J. J., Bech-Nielsen S., Hoffsis G. F. Survival of Mycobacterium paratuberculosis and preservation of immunoglobulin G in bovine colostrum under experimental conditions simulating pasteurization //American journal of veterinary research. – 1996. – Т. 57, №. 11. – С. 1580-1585. DOI:10.2460/ajvr.1996.57.11.1580
67. Godden S. M., Smith S., Feirtag J. M., Green L. R., Wells S. J., Fetrow J. P. Effect of on-farm commercial batch pasteurization of colostrum on colostrum and serum immunoglobulin concentrations in dairy calves //Journal of dairy science. – 2003. – Т. 86, №. 4. – С. 1503-1512. DOI:10.3168/jds.S0022-0302(03)73736-9
68. Johnson J. L., Godden S. M., Molitor T., Ames T., Hagman D. Effects of feeding heat-treated colostrum on passive transfer of immune and nutritional parameters in neonatal dairy calves //Journal of dairy science. – 2007. – Т. 90, №. 11. – С. 5189-5198. DOI:10.3168/jds.2007-0219
69. Armengol R., Fraile L. Colostrum and milk pasteurization improve health status and decrease mortality in neonatal calves receiving appropriate colostrum ingestion //Journal of dairy science. – 2016. – Т. 99, №. 6. – С. 4718-4725. DOI:10.3168/jds.2015-10728
70. Waldner C. L., Rosengren L. B. Factors associated with serum immunoglobulin levels in beef calves from Alberta and Saskatchewan and association between passive transfer and health outcomes // The Canadian veterinary journal. – 2009. – Т. 50, №. 3. – С. 275.
71. Murray C., Veira D., Nadalin A. et al. The effect of dystocia on physiological and behavioral characteristics related to vitality and passive transfer of immunoglobulins in newborn Holstein calves // The Canadian veterinary journal – 2015. – Т. 79, № 2. – С. 109–119
72. Barrier A., Ruelle E., Haskell M., Dwyer C. Effect of a difficult calving on the vigour of the calf, the onset of maternal behaviour, and some behavioural indicators of pain in the dam//Preventive Veterinary Medicine. – 2012. – Т. 103, №. 4. – С. 248-256. DOI:10.1016/j.prevetmed.2011.09.001
73. Staněk S., Nejedlá E., Fleischer P., Pechová A., Šlosárková S. Prevalence of failure of passive transfer of immunity in dairy calves in the Czech Republic// Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis. – 2019. – Т. 67, № 1. – С. 163–172/ DOI:10.11118/actaun201967010163

74. Homerosky E. R., Timsit E., Pajor E. A., Kastelic J. P., Windeyer M. C. Predictors and impacts of colostrum consumption by 4 h after birth in newborn beef calves // *The Veterinary Journal*. – 2017. – Т. 228. – С. 1-6. DOI:10.1016/j.tvjl.2017.09.003
75. Drić M., Windeyer C., Olsen S., Fu Y., Doepel L., De Buck J. Determining the IgG concentrations in bovine colostrum and calf sera with a novel enzymatic assay // *Journal of animal science and biotechnology*. – 2018. – Т. 9. – С. 1-9. DOI:10.1186/s40104-018-0287-4
76. Федоров Ю. Н. и др. Диагностические методы оценки передачи пассивного иммунитета у новорожденных телят // *Ветеринарный врач*. – 2022. – №. 5. – С. 60-65. DOI:10.33632/1998-698X.2021_7_15
77. Weaver D.M., Tyler J.W., VanMetre D.C., Hostetler D.E. Barrington G.M. Passive Transfer of Colostral Immunoglobulins in Calves // *Journal of veterinary internal medicine*. – 2000. – Т. 14, №. 6. – С. 569-577. DOI: 10.1892/0891-6640(2000)014<0569:ptocii>2.3.co;2
78. Chelack B. J., Morley P. S., Haines D. M. Evaluation of methods for dehydration of bovine colostrum for total replacement of normal colostrum in calves // *The Canadian Veterinary Journal*. – 1993. – Т. 34, № 7. – С. 407.
79. Wild D. *The Immunoassay Handbook: Theory and Applications of Ligand Binding, ELISA and Related Techniques*. – 4th ed. – Oxford: Elsevier, 2013. – 1036 p.
80. Ameri M., Wilkerson M. J. Comparison of two commercial radial immunodiffusion assays for detection of bovine immunoglobulin G in newborn calves // *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*. – 2008. – Т. 20, № 3. – С. 333–336. DOI:10.1177/10406387080200031
81. Dunn A. et al. Comparison of single radial immunodiffusion and ELISA for the quantification of immunoglobulin G in bovine colostrum, milk and calf sera // *Journal of Applied Animal Research*. – 2018. – Т. 46, №. 1. – С. 758-765. DOI:10.1080/09712119.2017.1394860
82. Etzel L. R., Strohbehn R. E., McVicker J. K. Development of an automated turbidimetric immunoassay for quantification of bovine serum immunoglobulin G // *American journal of veterinary research*. – 1997. – Т. 58, №. 11. – С. 1201-1205 DOI:10.2460/ajvr.1997.58.11.1201
83. Alley M. L., Haines D. M., Smith G. W. Evaluation of serum immunoglobulin G concentrations using an automated turbidimetric immunoassay in dairy calves // *Journal of dairy science*. – 2012. – Т. 95, №. 8. – С. 4596-4599. DOI:10.3168/jds.2012-5420
84. Sutter F., Rauch E., Erhard M., Sargent R., Weber C., Heuwieser W., Borchardt S. Evaluation of different analytical methods to assess failure of passive transfer in neonatal calves // *Journal of dairy science*. – 2020. – Т. 103, №. 6. – С. 5387-5397 DOI:10.3168/jds.2019-17928
85. Cuttance E. L., Regnerus C., Laven R. A. A review of diagnostic tests for diagnosing failure of transfer of passive immunity in dairy calves in New Zealand // *New Zealand veterinary journal*. – 2019. – Т. 67, №. 6. – С. 277-286. DOI:10.1080/00480169.2019.1654945
86. Buczinski S., Gicquel E., Fecteau G., Takwoingi Y., Chigerwe M., Vandeweerd J. M. Systematic review and meta-analysis of diagnostic accuracy of serum refractometry and brix refractometry for the diagnosis of inadequate transfer of passive immunity in calves // *Journal of veterinary internal medicine*. – 2018. – Т. 32, №. 1. – С. 474-483. DOI:10.1111/jvim.14893
87. Deelen S. M., Ollivett T. L., Haines D. M., Leslie K. E. Evaluation of a Brix refractometer to estimate serum immunoglobulin G concentration in neonatal dairy calves // *Journal of dairy science*. – 2014. – Т. 97, №. 6. – С. 3838-3844. DOI:10.3168/jds.2014-7939
88. Hernandez D., Nydam D. V., Godden S. M., Bristol L. S., Kryzer A., Ranum J., Schaefer D. Brix refractometry in serum as a measure of failure of passive transfer compared to measured immunoglobulin G and total protein by refractometry in serum from dairy calves // *The Veterinary Journal*. – 2016. – Т. 211. – С. 82-87. DOI:10.1016/j.tvjl.2015.11.004
89. Cuttance E. L., Mason W. A., Denholm K. S., Laven R. A. Comparison of diagnostic tests for determining the prevalence of failure of passive transfer in New Zealand dairy calves // *New Zealand veterinary journal*. – 2017. – Т. 65, №. 1. – С. 6-13. DOI: 10.1080/00480169.2016.1230525
90. Thornhill J. B., Krebs G. L., Petzel C. E. Evaluation of the Brix refractometer as an on-farm tool for the detection of passive transfer of immunity in dairy calves // *Australian veterinary journal*. – 2015. – Т. 93, №. 1-2. – С. 26-30. DOI: 10.1111/avj.12287
91. Djedović R., Bogdanović V., Stanojević D., Nemes Z., Gaspard A., Cseh S. Involuntary reduction in vigour of calves born from sexed semen // *Acta Veterinaria Hungarica*. – 2016. – Т. 64, №. 2. – С. 229-238. DOI:10.1556/004.2016.023
92. Tubman L. M., Brink Z., Suh T. K., Seidel Jr G. E. Characteristics of calves produced with sperm sexed by flow cytometry/cell sorting // *Journal of animal science*. – 2004. – Т. 82., №. 4. – С. 1029-1036. DOI:10.2527/2004.8241029x

УДК 636.082.575

Использование методов генетической оценки и геномной селекции в разведении крупного рогатого скота

Харжау А.¹, Сермягин А.А.²¹ НАО «ЗКАТУ имени Жангир хана»,
Уральск, Казахстан² ВНИИГРЖ — филиал ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Изучение и сохранение биоразнообразия сельскохозяйственных генетических ресурсов является актуальной задачей современной биологической науки. Сельскохозяйственные генетические ресурсы представляют собой национальный и мировой биологический капитал, крайне необходимый для развития систем производства в будущем. В этой связи на сегодняшний день геномный анализ и молекулярно-генетические методы стали неотъемлемой частью современной селекции животных. Они позволяют более точно оценивать генетический потенциал животных и выбирать наиболее перспективных особей для разведения. Этот подход значительно ускоряет процесс селекции и повышает эффективность племенной работы. В России и Казахстане, как и во многих других странах, постепенно начинают активно внедрять геномный анализ в практику животноводства. Данный метод позволяет выявлять генетические особенности животных, которые не всегда можно учесть при традиционной оценке по дочерям, также помогает предотвращать наследственные заболевания и улучшать племенные качества. В России и Казахстане также важно развивать и применять геномную селекцию в животноводстве. Поскольку данная процедура поможет улучшить генетический потенциал поголовья, повысить продуктивность, адаптировать животных к местным условиям, улучшить здоровье и долголетие животных, а также повысить эффективность сельскохозяйственного производства в целом. Таким образом, исследования и разработки в области геномной селекции в России и Казахстане имеют огромное значение для улучшения сельскохозяйственной продукции, повышения конкурентоспособности отрасли и обеспечения продовольственной безопасности.

Ключевые слова: генетическая оценка, геномная селекция, крупный рогатый скот, Россия, Казахстан.

Для цитирования: Харжау А., Сермягин А.А. Использование методов генетической оценки и геномной селекции в разведении крупного рогатого скота // Успехи наук о животных. 2025. № 2. С. 34—50. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.003

Genetic evaluation and genomic selection in cattle breeding

A. Kharzhau¹, A.A. Sermyagin²¹ NJSC WKATU named after Zhangir Khan
Uralsk, Republic of Kazakhstan² All-Russian Research Institute of Genetics and Farm Animal Breeding,
Branch of L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry
Saint Petersburg, Russia

Abstract. The study and conservation of agricultural genetic biodiversity represent a pressing challenge in modern biological science. Agricultural genetic resources constitute both a national and global biological asset, essential for the future development of production systems. In this regard, genomic analysis and molecular genetic methods have become integral to contemporary animal breeding. These techniques enable more precise evaluation of animals' genetic potential and the selection of the most promising individuals for reproduction. This approach significantly accelerates the breeding process and enhances the efficiency of selective breeding programs.

In Russia and Kazakhstan, as in many other countries, genomic analysis is being progressively implemented in livestock farming practices. This method allows for the identification of genetic traits in animals that may not be adequately assessed through traditional progeny testing. Additionally, it helps prevent hereditary diseases and improve breeding quality.

The development and application of genomic selection in livestock breeding are of particular importance for Russia and Kazakhstan. This technology can enhance the genetic potential of herds, increase productivity, improve animal adaptation to local conditions, promote health and longevity, and ultimately boost the overall efficiency of agricultural production.

Thus, research and advancements in genomic selection in Russia and Kazakhstan hold significant promise for improving agricultural output, enhancing industry competitiveness, and ensuring food security.

Keywords: genetic assessment, genomic breeding, cattle, Russia, Kazakhstan.

For citation: Kharzhau A, Sermyagin AA. Genetic evaluation and genomic selection in cattle breeding. Ernst Journal of Animal Science. 2025. 2: 34—50. Russian. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.003

Интенсификация в молочном скотоводстве – это важная задача как с научной, так и практической точек зрения. В основе этого процесса лежит стремление к повышению производительности и качества молока путем улучшения генетического потенциала животных. Для достижения этой цели используются различные методы и технологии, включая селекцию, генетическую отбор, использование новых кормов и технологий содержания.

Мониторинг существующих систем управления селекционными процессами на производстве играет ключевую роль в определении эффективности и результативности внедренных методов. Это позволяет оценить, насколько успешно используются современные подходы к улучшению генетического потенциала животных, а также выявить возможные улучшения и корректировки в работе селекционеров и специалистов по разведению скота.

Интенсификация молочного скотоводства не только способствует повышению продуктивности животных, но и содействует экономической эффективности предприятий, улучшению качества продукции и снижению негативного воздействия на окружающую среду. Однако важно помнить, что этот процесс должен осуществляться с учетом благополучия животных и принципов устойчивого развития сельскохозяйственных систем.

Повышение экономической эффективности животноводства – это одна из главных задач современной сельскохозяйственной науки и практики. Интенсивное использование животных с выдающимися показателями, которые повторяются в последующих поколениях, требует селекционного процесса и генетического совершенствования пород.

Селекционная работа направлена на ускорение генетического прогресса в популяциях животных. Основная идея заключается в том, чтобы выделить животных с наилучшими селекционными признаками (примером может служить высокая продуктивность, адаптация к условиям содержания, устойчивость к болезням и т.д.) и использовать их в разведении следующего поколения. Это позволяет постепенно улучшать желаемые характеристики в популяции [1].

В этой связи изучение и сохранение биоразнообразия сельскохозяйственных генетических ресурсов становится все более актуальной задачей современной биологической науки. Сельскохозяйственные генетические ресурсы представляют собой национальный и мировой биологический капитал, крайне необходимый для развития систем производства в будущем [2]. Для достижения этой цели важно создать комплексную систему, которая охватывает несколько аспектов.

Оптимизация методов селекции включает в себя разработку эффективных методов отбора и оценки селекционных признаков, куда входят методы генетического анализа, молекулярной генетики, статистики и других наук, позволяющих точно оценивать генетические характеристики животных.

Создание паратипических условий, в том числе создание условий содержания животных, максимально способствует раскрытию их генетического потенциала. Например, это может быть правильное кормление, оптимальные условия для развития (температура, влажность и т.д.), соблюдение правил гигиены и профилактики болезней;

Многофункциональный подход подразумевает учёт комплекса селекционных признаков, что помогает создавать животных, не только выдающихся по одному признаку, но и обладающих устойчивостью к стрессу, долговечностью, хорошей конституцией и другими полезными характеристиками.

Селекционная работа требует системного подхода, сотрудничества между специалистами различных областей (биология, генетика, зоотехния и т.д.) и постоянного

контроля за результатами для достижения максимально эффективного ускорения генетического прогресса в популяциях животных.

На сегодняшний день много достижений и открытий в области биологии и генетики, что сыграло значительную роль в совершенствовании методов, применяемых в селекции сельскохозяйственных животных.

Современные селекционные программы в молочном скотоводстве включают в себя комплексные системы, охватывающие различные аспекты оценки и улучшения генетического потенциала животных: оценка по качеству потомства – помогает определить генетические характеристики животных по их потомству, что важно для оценки производственных и здоровьесберегающих характеристик, таких как удои, жирность молока, выносливость и т.д.; оценка по родословной помогает определить генетический потенциал животного на основе данных о его предках, что важно для предсказания наследуемых характеристик и выявления потенциальных генетических заболеваний; оценка по собственной продуктивности включает в себя измерение удоя молока, жирности, белковости, доли жирных кислот и других важных показателей продуктивности; маркерные методы селекции позволяют селекционерам более точно отбирать особей с желаемыми генетическими характеристиками; BLUP (Best Linear Unbiased Prediction) оценка – позволяет более точно определить генетический вклад каждого животного в популяцию статистическим методом оценки генетической силы животных на основе их родословных и продуктивных данных.

Внедрение информационно-вычислительных систем в практику племенной работы становится необходимым условием для увеличения темпов генетического улучшения молочного скота. Эти системы помогают автоматизировать сбор, хранение и анализ данных о животных, что снижает трудозатраты на обработку информации, увеличивает оперативность принятия решений и повышает эффективность селекционно-племенной работы.

Эффективное использование информационно-вычислительных систем позволяет селекционерам и племенным специалистам лучше понимать генетические особенности стада, прогнозировать результаты скрещиваний, оптимизировать процессы отбора и разведения, а также улучшать производственные показатели стада в целом.

История развития методов селекции скота прошла долгий путь от классических подходов к современной геномной селекции. Изначально исследования в селекции молочного скота велись на основе фенотипических данных, что позволяло определить наследуемость и изменчивость характеристик [3,4]. Затем ученые начали использовать более подробный анализ, включающий генетические корреляции, взаимосвязи между генотипом и окружающей средой, а также различные виды наследуемости (аддитивная, неаддитивная и прочие) [5]. В последующем была внедрена маркерная селекция, которая позволяет использовать различные генетические маркеры для оценки генетического потенциала животных. Это включает анализ отдельных генов, цитогенетику и другие методы [6,7]. Для более точной оценки и прогнозирования генетических характеристик животных начали использовать методы многофакторного анализа, которые включают в себя использование специальных компьютерных программ [8]. В ходе исследований были выявлены гены, которые связаны с конкретными продуктивными признаками животных, что позволило улучшить селекцию на основе более точного знания генетической основы этих характеристик [9–11]. В настоящее время внедрены современные методы геномной селекции, которые основаны на анализе всего генома животных. Это позволяет более точно выбирать наиболее перспективных особей для разведения, учитывая все генетические особенности [12–15]. Это разнообразие методов позволяет селекционерам более

эффективно работать с генетическим потенциалом животных, улучшая их продуктивные характеристики и адаптированность к окружающей среде.

В этой связи изучение генетического полиморфизма стало одним из наиболее важных и плодотворных направлений как фундаментальной генетики, так и прикладных исследований в сельском хозяйстве. Методы ДНК-тестирования играют значительную роль в выявлении молекулярных маркеров, которые занимают важное положение в различных областях генетических исследований. Генетическое маркирование позволяет оценить генофонд конкретных стад животных. Это помогает исключить принятие ошибочных решений при выборе животных для разведения, так как можно более точно определить их генетический потенциал. Маркеры могут помочь быстрее и эффективнее накапливать аллели, несущие комплекс желательных признаков. Это особенно важно для признаков, которые фенотипически проявляются позднее или связаны с полом животного, например, молочная продуктивность [16,17,18]. Маркер-зависимая селекция позволяет селекционерам выбирать животных на основе их генетических маркеров, связанных с желаемыми признаками. Это особенно важно для признаков, на которые могут влиять внешние факторы, такие как условия содержания или кормления [19,20,21].

Таким образом, использование генетических маркеров и методов маркер-зависимой селекции помогает улучшить эффективность животноводства, позволяя быстрее и точнее селекционировать животных с желаемыми генетическими характеристиками. Это современные технологии, которые помогают оптимизировать процессы разведения и повышать продуктивность стада.

Известно, что маркерная селекция является начальным этапом геномной селекции. Поскольку большая часть хозяйственно-ценных селекционных признаков имеет полигенный характер, то есть контролируется множеством генов, изменчивость этих признаков под воздействием факторов внешней среды может достигать 50%. Однако, есть гены или аллели этих генов, которые играют более важную роль в проявлении признаков продуктивности при различных условиях среды, которые являются основными генами количественных признаков (Quantitative Trait Loci, QTL) [22].

Молекулярно-генетические методы позволяют определить различия между животными по аллельным вариантам в локусах ДНК, которые либо непосредственно влияют на проявление признака, либо связаны с QTL. Это делает возможным картирование этих локусов и проведение отбора животных непосредственно по генотипам, то есть по генетическим маркерам, что подразумевает маркерную селекцию (Marker-Assisted Selection, MAS) [23].

Использование молекулярных маркеров, связанных с целевыми признаками, для маркерно-вспомогательного отбора (MAS) стало важным инструментом в селекции скота. Этот метод позволяет отбирать животных с высоким генетическим потенциалом для желаемых характеристик. Однако, когда речь идет о сложных признаках, таких как продуктивность, которые контролируются множеством генов или локусов количественных признаков (QTL), каждый из которых вносит небольшой вклад, MAS может оказаться неэффективным [24,25].

В этой связи геномная селекция (GS) была предложена как альтернативный подход к обработке сложных признаков и учету незначительных генетических эффектов. Идея GS заключается в использовании высокой плотности маркеров по всему геному для оценки генетической ценности особей. Это позволяет оценить не только основные, но и второстепенные эффекты генов, которые могут быть связаны с целевыми признаками. GS представляет собой эволюцию традиционной передовой генетики, так как объединяет стратегию целостного генома с картированием и функциональной валидацией генов-кандидатов [26,27,28].

В геномной селекции (GS) используются общегеномные маркеры для оценки их воздействия с помощью оптимальных статистических моделей. Затем рассчитываются оценочные значения селекции, или GEBV (Genomic Estimated Breeding Values), для каждой особи, чтобы отобрать потенциальных элитных производителей. В GS необходимы две основные популяции:

1. Обучающая популяция, также называемая эталонной популяцией, которая состоит из когорты особей с генотипическими и фенотипическими данными. Данные из этой популяции используются для обучения статистической модели для оценки влияния каждого анализируемого маркера.

2. Селекционная (или тестовая) популяция, которая состоит из селекционных кандидатов только с генотипными данными. Эти особи не имеют фенотипических данных, но используются для оценки GEBV на основе модели, разработанной на основе обучающей популяции.

Таким образом после того, как модель апробирована на обучающей популяции, она используется для расчета оценочных значений селекции для каждой генотипированной особи в тестовой популяции. Это позволяет ранжировать животных без необходимости фенотипирования каждой особи в тестовой популяции. Эти особи могут быть потенциальными кандидатами для дальнейшего разведения или выбора.

Зарезервированные особи из эталонной популяции также могут быть использованы в качестве родительских пар для скрещивания. Это помогает создать пирамиду благоприятных аллелей для следующего цикла селекции. Использование GEBV позволяет селекционерам принимать более информированные решения о том, какие особи использовать в качестве родителей для следующего поколения, чтобы улучшить желаемые характеристики. Хотя отбор в селекции может быть направлен на основе GEBV, селекционеры все равно могут продавать животных, опираясь на их коммерческую ценность. Это означает, что факторы, включающие качество продукции, устойчивость к болезням, легкость выращивания и другие, могут также влиять на решение о том, каких животных представлять на рынке, несмотря на их GEBV [29,30].

Размер референтной популяции является важным аспектом использования генетической информации в селекции скота. Он влияет на точность оценки геномной племенной ценности (GEBV) и на способность выявлять ассоциации между молекулярными маркерами и желаемыми фенотипическими характеристиками. Для изучения полногеномных ассоциаций (GWAS) в поиске функциональных генов необходим определенный размер референтной популяции. Этот размер зависит от уровня влияния каждого молекулярного маркера на изменчивость показателя, который измеряется в доле изменчивости, раскрываемой SNP. При оценке влияния каждого SNP в уравнении прогноза GEBV, все мутации рассматриваются одновременно. Эффекты каждого SNP суммируются, и важно, чтобы сумма всех эффектов была невелика, если множество SNP оказывает влияние.

Таким образом, размер выборки является лимитирующим фактором. Необходимая численность референтной популяции обратно пропорциональна наследуемости признака и прямо пропорциональна эффективной численности популяции. Большой размер референтной популяции обычно увеличивает точность прогноза геномной племенной ценности, что является ключевым фактором в селекции молочного скота.

Основное преимущество геномной селекции заключается в том, что она позволяет установить наследование в генах определенных ценных аллелей практически сразу после рождения. Это значительно повышает эффективность селекционного отбора, так как прогнозировать племенную ценность животного можно уже в самом раннем возрасте. Таким образом, селекционное значение животного оценивается не фенотипически, а

генотипически, что позволяет значительно повысить эффективность селекционного процесса. Это особенно важно для улучшения продуктивности, здоровья и других желательных признаков у стада молочного скота.

На сегодняшний день геномный анализ и молекулярно-генетические методы стали неотъемлемой частью современной селекции животных. Они позволяют более точно оценивать генетический потенциал животных и выбирать наиболее перспективных особей для разведения. Этот подход значительно ускоряет процесс селекции и повышает эффективность племенной работы.

Геномный анализ становится важным инструментом в современном животноводстве, в том числе в России и Казахстане. Этот метод позволяет выявлять генетические особенности животных, которые не всегда можно учесть при традиционной оценке по дочерям. Он также помогает предотвращать наследственные заболевания и улучшать племенные качества.

Достижения в области биологии и генетики, такие как секвенирование генома, выявление маркеров, анализ генетических данных, играют ключевую роль в эволюции селекции животных. Они позволяют не только более точно определять генетическую основу различных признаков, но и создавать более устойчивые и продуктивные поголовья животных.

На сегодняшний день процесс селекции достиг нового уровня благодаря возможности получения объективной информации о генотипе и геноме животных. В настоящее время геномный анализ проводится не только в США, но и в других странах мира, таких как Ирландия [31], Южная Африка [32], Германия [33], Новая Зеландия [34] и некоторых других. С применением геномной селекции решаются важные вопросы скрещивания, генетической структуры смешанных популяций, а также оцениваются перспективы использования геномной оценки при выборе племенных быков в сравнении с традиционными методами оценки их ценности и другими аспектами.

Геномная селекция действительно привела к принципиально новому уровню в селекции животных. Этот подход позволяет получить более объективную информацию о генотипе и геноме животных, что в свою очередь помогает улучшить эффективность племенной работы и повысить продуктивность стада.

Геномная селекция позволяет учитывать генетическое разнообразие и предотвращать инбридинг, что помогает сократить риск наследственных заболеваний и улучшить общее здоровье стада. Для многих стран, где применяются различные линии и породы скота, геномная селекция помогает оптимизировать скрещивание для достижения желаемых характеристик. С использованием геномной селекции можно более точно определить потенциал производителей и выбирать наиболее перспективных особей для разведения, учитывая не только их фенотипические характеристики, но и генетическую основу этих признаков. Многие исследования показывают преимущества геномной селекции перед классическими методами, такими как оценка по дочерям, в том числе более высокую точность прогнозирования генетического потенциала животных. Геномный отбор в селекции молочного скота имеет потенциал повышения генетического прогресса за счет более высокой точности и раннего выявления желаемых генетических характеристик у животных. Это может привести к сокращению интервала между поколениями и, как следствие, увеличению генетического прироста. В целом, геномная селекция стала мощным инструментом для улучшения продуктивности и здоровья стада молочного скота в различных странах мира [35—38].

Исследования ряда ученых показывают, что геномный отбор может значительно уменьшить интервал между поколениями у молочного скота. Это, в свою очередь, способствует увеличению генетического прогресса и снижению затрат на селекционные

программы. Основным фактором, способствующим увеличению генетического прогресса в этом случае, является именно укороченный интервал между поколениями. Благодаря более раннему и точному отбору животных с желаемыми генетическими характеристиками, разведение линий с улучшенными показателями производительности и здоровья может происходить быстрее и эффективнее [39,40].

Биологические факторы играют ключевую роль в селекции сельскохозяйственных животных. Они основаны на параметрах изменчивости, наследственности и взаимосвязи признаков, которые являются основой для генетической оценки и отбора животных, а также повышения качества генотипов и определения племенной ценности.

Важным элементом селекции является генетическая оценка и отбор животных, особенно быков-производителей, поскольку они оказывают значительное влияние на продуктивность и качество потомства. Использование различных параметров и информации о хозяйственно полезных признаках животных и их предков позволяет сделать более точные прогнозы в оценке генотипа [41].

В современной практике оценки быков-производителей в отечественной системе выявлено несколько проблем, включая неоднозначность получаемых результатов тестирования в разных стадах. Это может быть вызвано различиями в условиях содержания и кормления животных, а также другими факторами. Низкая повторяемость результатов оценки требует фактически переоценки всех быков в конкретных условиях хозяйства, что создает определенные сложности и затраты.

Для решения этих проблем важно улучшить методы оценки, учитывая различия в условиях содержания животных. Кроме того, разработка более точных и надежных методов оценки с использованием современных геномных технологий, может помочь улучшить качество селекционной работы и повысить продуктивность стада молочного скота. Внедрение новых стратегий и методов может помочь более точно определять генетическую ценность быков и эффективнее использовать их в разведении.

Многие первоначальные исследования по геномному отбору были сосредоточены на методах геномного прогнозирования [42], оценивающие влияние параметров популяции на надежность геномных прогнозов [43,44], либо сравнивали традиционные и геномные методы отбора [45]. Позже, когда стали доступны геномные данные, геномные прогнозы были подтверждены путем сравнения геномных прогнозов с EBV, основанными на показателях потомства [46,47]. С учетом результатов данных валидационных исследований преимущества геномного отбора стали очевидными, что привело к быстрому внедрению геномного отбора в схемы молочного скотоводства в последние годы.

Новые методы анализа ДНК и геномные технологии действительно представляют собой новую эру для геномики скота. Ученые смогли создать генетические карты, используя полиморфные маркеры, такие как микросателлиты, которые помогли расшифровать области генома, включающие гены, влияющие на экономически важные характеристики животных [48].

Геномные технологии также позволяют улучшать экономически важные характеристики скота быстрее и эффективнее. Это может быть увеличение молочной продуктивности, улучшение качества мяса, устойчивость к болезням и другие параметры;

В странах, где животноводство играет важную роль в экономике и обеспечении продовольственной безопасности, геномика имеет особое значение. улучшение генетических характеристик скота может привести к повышению производительности и доходности для местных фермеров.

С появлением современных методов секвенирования ДНК ученым стало доступно более глубокое изучение генома скота, что позволяет идентифицировать и анализировать гены, ответственные за желаемые признаки.

Таким образом, геномика скота представляет собой мощный инструмент для современного животноводства, особенно в развивающихся странах, где улучшение генетических характеристик стада может иметь высокое социально-экономическое значение.

Существуют различные подходы к генетическому анализу сложных и количественных признаков у животных, включая молочного скота. Два основных подхода – это полногеномное сканирование и поиск генов-кандидатов, связанных с локусами количественных признаков (QTL). У каждого из них есть свои преимущества и недостатки. Преимущества полногеномного секвенирования заключаются в сканировании всего геномного пространства животного для поиска ассоциаций с количественными признаками. При этом нет предварительных предпосылок относительно важности конкретных функциональных особенностей исследуемых признаков. Главным недостатком полногеномного сканирования является его дороговизна и высокая ресурсоемкость. Также может потребоваться большая выборка для достижения статистической значимости. Этот метод может быть ограниченным для некоторых лабораторий или проектов из-за высоких затрат [49].

Преимущества поиска генов-кандидатов, связанных с QTL, заключается в экономичности и эффективности, поскольку он основан на предположениях о связи конкретных генов с количественными признаками. Ограничение этого подхода заключается в том, что он требует предварительных знаний о биологии исследуемого фенотипа. Также может быть сложно оценить влияние множества генов на сложные признаки [50].

Выбор между этими методами зависит от конкретных целей и возможностей исследования. Если есть доступные средства и ресурсы, полногеномное сканирование может быть предпочтительным методом для обширного и всеобъемлющего анализа генома. Однако для проектов с ограниченными бюджетными возможностями или когда есть предварительные знания о генах, связанных с признаками, поиск генов-кандидатов может быть более эффективным и экономичным вариантом.

В целом, каждый из этих методов имеет свои преимущества и ограничения, и выбор между ними зависит от конкретной задачи и доступных ресурсов и средств исследования.

Достижения в области технологии ДНК-чипов и открытие множества однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в проектах секвенирования генома действительно открыли новые возможности для селекции животных. Однонуклеотидные полиморфизмы (SNP) – это точечные изменения в геноме, которые могут быть использованы в качестве маркеров для ассоциации с интересующими нас признаками (к примеру, QTL). Использование технологии ДНК-чипов и SNP позволяет более точно и эффективно проводить генетический анализ, идентифицировать маркеры в LD с QTL и использовать их для отбора животных с желаемыми генетическими характеристиками. Это современный и мощный инструмент для улучшения генетического потенциала стада молочного скота [51].

Результаты полногеномных исследований ассоциаций у крупного рогатого скота привели к выводу, что влияние отдельных локусов количественных признаков (QTL) на сложные признаки, такие как продуктивность, вероятно, будет небольшим; поэтому для объяснения генетической изменчивости этих признаков необходимо большое количество QTL. Учитывая эту генетическую архитектуру, выгоды от программ отбора с помощью маркеров (MAS), использующих только небольшое количество ДНК-маркеров для отслеживания ограниченного числа QTL, вероятно, будут небольшими. Это привело к разработке альтернативной технологии использования доступной информации о плотном однонуклеотидном полиморфизме (SNP), называемой геномным отбором. Геномный отбор использует полногеномную панель плотных маркеров, так что все QTL находятся в

неравновесном сцеплении по крайней мере с одним SNP. Прогнозируется, что значения геномной селекции будут суммой влияния этих SNP на весь геном [52,53].

Выполнение полногеномного секвенирования (WGS) крупного рогатого скота является оптимальным способом использования современной технологии геномного анализа для оценки генетической изменчивости породы крупного рогатого скота. Однако этот вариант по-прежнему недоступен с финансовой точки зрения для большинства селекционеров и исследователей. В результате рутинное генотипирование крупного рогатого скота выполняется с использованием менее дорогостоящего метода идентификации однонуклеотидных полиморфизмов (SNP). Идентификация SNP предназначена для обнаружения вариантов генов, связанных с хозяйственно-полезными признаками, обнаружением наследственных заболеваний и другими отрицательными характеристиками, а также для поиска породоспецифичных участков в геноме.

В 2012 году Ben Hayes основал проект «1000 Bull Genomes» [54], чтобы помочь в глобальном понимании генетики крупного рогатого скота и способствовать международному сотрудничеству в данной сфере [55]. В ходе первоначального запуска проекта были получены данные секвенирования 238 быков-производителей австралийской линии со средним охватом генома 10,5х с использованием системы HiSeq 3000. В настоящее время проект включает 40 международных партнеров и 2700 голов животных. Проект позволил выявить около 90 миллионов генетических полиморфизмов в геноме крупного рогатого скота. Исследователи и селекционеры по всему миру извлекают выгоду из открытий, сделанных с использованием этих данных, включая идентификацию летальных мутаций [56] и крупнейшее масштабное исследование геномных ассоциаций на уровне последовательностей (GWAS) [57].

В рамках разработки методов геномного прогнозирования для решения статистических и вычислительных проблем GS, было предложено несколько подходов:

- RRBLUP (Ridge Regression Best Linear Unbiased Prediction), данный метод использует оценку эффекта каждого маркера (SNP) на желаемый признак. RRBLUP помогает учитывать корреляции между маркерами и учитывать структуру популяции;
- GBLUP (Genomic Best Linear Unbiased Prediction) основан на линейной регрессии и оценивает генетическую значимость маркеров для прогнозирования племенной ценности.
- Байесовские методы: Bayes A – один из методов, где для каждого маркера имеется априорное предположение о его влиянии на признак, и затем апостериорное распределение маркеров обновляется на основе данных; Bayes B аналогичен методу Bayes A, но с предположением, что большинство маркеров не имеют влияния на признак; Bayes C оценивает модель с различным количеством включенных маркеров и выбирает наилучшую модель на основе критерия Cp (метод минимальных квадратов с использованием критерия Смолла); Bayes LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) использует штраф для небольших коэффициентов модели, что помогает выбрать наиболее важные маркеры, и т.д.

Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор конкретного метода зависит от характеристик данных, целей селекции и требований к точности прогнозирования. Однако все они направлены на то, чтобы помочь в прогнозировании геномной племенной ценности животных на основе их генетической информации, что, в свою очередь, позволяет более эффективно и точно проводить селекцию в молочном скотоводстве [58,59].

Селекционеры всегда стараются точно оценить племенную ценность. Новые методы селекционного отбора, в том числе селекционный индекс, лучший линейный несмещенный прогноз (BLUP) [60], маркерная селекция (MAS), обширное исследование геномных

ассоциаций (GWAS) и геномная селекция (GS) [61] широко используются как в животноводстве, так и в растениеводстве.

Большинство селекционных признаков, влияние которых оценивается в скотоводстве, обусловлены множеством генов (полигены), каждый из которых оказывает небольшое воздействие на признак. Это означает, что при традиционных методах селекции, таких как массовая селекция (MAS), малозначимые гены с небольшими эффектами могут остаться незамеченными. GS был предложен для решения этой проблемы, основанный на использовании молекулярных маркеров высокой плотности, распределенных по всему геному. Маркеры используются для оценки их эффектов на селекционные признаки и последующего прогнозирования геномной племенной ценности животных [62—64].

В процессе GS генерируется прямая геномная ценность (DGV), которая включает генотипирование большого числа животных с фенотипической информацией. Это помогает оценить эффекты маркеров и использовать их для прогнозирования DGV у генотипированных животных без фенотипов.

Современные тенденции в GS включают использование полногеномного секвенирования для оценки влияния всех локусов в геноме вместо оценки только отдельных маркеров. Это позволяет более полно использовать генетическую информацию для предсказания геномной племенной ценности. Сущность GS заключается в том, что она учитывает сумму эффектов всех необходимых признаков, что позволяет более полно и точно предсказывать генетическую ценность животных [65,66].

Таким образом, GS позволяет учесть все молекулярные маркеры по всему геному, вычисляя их совокупное влияние на селекционные признаки. Это делает GS мощным инструментом для селекции в скотоводстве, увеличивая эффективность и точность предсказаний генетической ценности у животных.

Продуктивность скота в значительной степени зависит от генетического потенциала животных. Важно отметить, что хотя факторы окружающей среды могут оказывать влияние на продуктивность до 75% [67], генетический потенциал также играет ключевую роль. Генетический потенциал животного определяется его генотипом, который включает в себя набор генов, ответственных за желаемые селекционные признаки, такие как продуктивность, качество молока, выносливость к болезням и т.д. Этот генетический потенциал определяет возможности животного в проявлении желаемых характеристик, и его реализация зависит от условий содержания, кормления и ухода.

Неполная реализация генотипа означает, что животные с высоким наследственным потенциалом могут не полностью проявить свои генетические возможности из-за воздействия факторов окружающей среды. Это может быть связано с недостаточным кормлением, стрессовыми условиями, недостаточным уходом и другими внешними факторами, которые могут ограничивать экспрессию генов. Фенотипическая изменчивость признаков определяется как разброс проявления этих признаков среди популяции животных. Когда животные имеют высокий генетический потенциал, но они не могут его полностью реализовать из-за факторов окружающей среды, фенотипическая изменчивость снижается. Это означает, что различия между животными в их продуктивности и других характеристиках могут быть менее выраженными, поскольку их генетические возможности ограничены воздействием среды [68].

Таким образом, в совокупности сказывается взаимодействие генетического потенциала и факторов среды на продуктивность скота. Полная реализация генетического потенциала может быть достигнута при оптимальных условиях содержания, кормления и управления здоровьем животных, что в конечном итоге приводит к максимальной продуктивности стада.

Исследования моделирования показывают, что программы геномной селекции (GS) имеют большой потенциал для улучшения точности отбора и, как следствие, генетического прироста в скотоводстве. В сравнении с традиционными методами отбора, внедрение GS также может снизить скорость инбридинга и уменьшить необходимость в структурированной оценке потомства. GS позволяет более точно оценивать геномную племенную ценность животных на основе их генетической информации, что даст возможность выбирать лучших производителей для разведения с учетом не только фенотипических, но и генетических данных.

Благодаря более точному отбору GS способствует увеличению генетического прироста в популяции скота. Выбор более продуктивных и здоровых животных на основе их генетической информации приводит к повышению производительности стада в целом. GS позволяет более эффективно учитывать генетическое разнообразие в популяции. Это помогает предотвратить слишком сильное скрещивание близкородственных особей, что может привести к инбридингу и ухудшению генетического здоровья стада.

Внедрение GS также может устранить или уменьшить необходимость в структурированной оценке потомства для быков. Это значит, что средства, которые ранее были затрачены на дорогостоящие тестирования и оценку потомства, могут быть использованы более эффективно, например, на улучшение условий содержания, кормления или другие направления развития стада. Так, внедрение программы геномной селекции может принести значительные выгоды для промышленного скотоводства. Оно не только повышает эффективность отбора и генетический прирост, но и способствует более рациональному использованию ресурсов за счет сокращения затрат на оценку потомства и снижения скорости инбридинга [69].

Исследования Н.С. Юдина и авторов [70] показывают, что геномная селекция представляет собой метод отбора, при котором племенная ценность животных определяется на основе генетических маркеров. Для этого особи проходят генотипирование на основе десятков тысяч однонуклеотидных полиморфных маркеров (SNP), охватывающих все хромосомы. Геномная оценка племенной ценности (Genomic Estimated Breeding Value, GEBV) вычисляется как сумма эффектов всех SNP-маркеров. В настоящее время доля быков-производителей, которые продаются на основании геномной племенной ценности (GEBV), без традиционной оценки по качеству потомства, в разных странах мира действительно составляет от 25 до 50%. Это свидетельствует о широком распространении и успешном применении геномной селекции в скотоводстве.

Применение GEBV позволяет производителям быков более точно оценивать и выбирать животных для разведения, исходя из их генетической предрасположенности к желаемым характеристикам. Это ведет к повышению эффективности селекции и ускорению генетического прогресса в поголовье скота. Важно отметить, что страны с развитой скотопрмышленностью и сильными программами селекции чаще всего внедряют и успешно используют геномную селекцию. Таким образом, доля быков-производителей, продаваемых на основе GEBV, будет продолжать расти по мере распространения и утверждения этого подхода в скотоводстве всего мира.

Исследования показывают, что геномная селекция (GS) предоставляет возможность одновременно изучать большое количество маркеров ДНК в геноме животного. Эти генетические маркеры, как правило, равномерно распределены по хромосомам. При наличии такого широкого покрытия генома маркерами, можно эффективно оценить племенную ценность животного. GS позволяет оценивать не только один, но и множество хозяйственно-полезных признаков у животных. Это включает в себя такие важные характеристики, как молочная продуктивность, качество молока, долговечность, воспроизводительные способности, экстерьерные и интерьерные показатели и другие.

Применение технологий молекулярной генетики позволяет исследовать тысячи или даже сотни тысяч маркеров по всем хромосомам. Это создает возможность более полного и всестороннего анализа генетической основы различных характеристик у животных. Путем анализа взаимосвязей между генотипом и хозяйственно-полезными признаками можно вычислить геномную оценку племенной ценности (GEBV). Это предоставляет возможность выбирать лучших производителей для разведения на основе их генетического потенциала к передаче желаемых характеристик потомству. Таким образом, геномная селекция позволяет эффективно использовать информацию о генетических маркерах для оценки и прогнозирования множества хозяйственно-полезных признаков у животных, что значительно улучшает эффективность и точность селекции, что в конечном итоге приводит к повышению продуктивности и качества стада [71].

В первой части геномной оценки животных осуществляется их генетическое типирование. Это включает определение наличия и последовательности SNP-маркеров в генотипе каждой особи. SNP-маркеры (однонуклеотидные полиморфизмы) являются местами в геноме, где у разных особей может быть различие в одном нуклеотиде (например, А вместо Т). Генотипирование проводится с использованием технологий, которые позволяют анализировать тысячи SNP-маркеров у каждого животного.

Вторая часть процесса заключается в сопоставлении результатов генотипирования животных с «эталонной» группой скота. «Эталонная» группа, как было сказано выше, состоит из животных, у которых имеется достоверная фенотипическая и генотипическая информация. Это может быть группа животных с уже известной высокой продуктивностью или другими желаемыми характеристиками. Сравнивая генотипы новых животных с этой «эталонной» группой, можно определить, какие SNP-маркеры ассоциируются с желаемыми характеристиками. После сопоставления информации по SNP-маркерам с характеристиками «эталонной» группы можно предсказать племенную ценность отбираемых животных, что позволяет оценить геномную оценку племенной ценности (GEBV) для каждого животного. GEBV вычисляется как сумма эффектов всех SNP-маркеров, связанных с желаемыми признаками. Так, можно ранее и точнее предсказать, какие животные будут наилучшими производителями, основываясь на их генетическом потенциале.

Исследования Н.А. Попова и соавторов [72] подтверждают, что генетические маркеры позволяют контролировать достоверность происхождения животного, диагностировать фримартинизм телят, создавать типы, линии и семейства внутри пород, определять уровень гомо- и гетерозиготности популяций, степень их сходства и различий и на этой основе прогнозировать эффект гетерозиса.

Геномная селекция (GS) кардинально меняет подходы к разведению животных, делая отбор более точным и эффективным. Резюмируя вышесказанное, можно заключить:

1) GS позволяет использовать информацию о SNP-маркерах, которые находятся в неравновесном сцеплении с кодирующими областями для экономически важных признаков. Это позволяет получить геномные оценки племенной ценности (GEBV), которые являются более точными и надежными, чем традиционные оценки наследственности;

2) GS помогает решить три ключевых проблемы в животноводстве: точность селекции признаков с низкой наследуемостью, контроль уровня инбридинга, ускорение интервала между поколениями;

3) сокращение интервала между поколениями является ключевым фактором для увеличения генетического прогресса в животноводстве. Благодаря GS можно значительно ускорить генетический прогресс, так как более точные и ранние оценки позволяют быстрее и эффективнее выбирать лучших производителей.

Таким образом, GS действительно становится мощным инструментом для улучшения продуктивности, здоровья и других экономически важных характеристик скота. Она позволяет использовать современные технологии для более эффективного управления генетическим потенциалом стада и достижения более быстрого и точного генетического прогресса [73—75].

В настоящее время геномный отбор широко применяется в молочном скотоводстве, где проводится оценка геномной селекционной ценности (GEBV) крупного рогатого скота по всему миру. Однако данная оценка осуществляется в развитых странах, где большинство оцениваемых животных являются чистопородными и имеет обширные данные по фенотипу, генотипу и происхождению. В развивающихся странах большая часть молочного производства осуществляется на мелких фермах. Эти фермы обычно не обладают достаточными данными о фенотипе или происхождении животных, что затрудняет эффективную оценку генетического потенциала быков и мешает проведению успешной селекции в направлении улучшения генетики животных, что является важной проблемой, которую стоит учитывать при рассмотрении геномного отбора в молочном скотоводстве. В развивающихся странах, где маленькие хозяйства составляют значительную часть молочного производства, доступ к данным по фенотипу, генотипу и родословной может быть ограниченным. Это создает препятствия для эффективного внедрения геномной селекции и использования оценок геномной селекционной ценности (GEBV) для быков. Например, ограниченные данные по фенотипу и родословной: маленькие хозяйства могут иметь ограниченные средства для сбора и хранения данных по фенотипу и родословной; недостаточные данные делают сложным проведение точных оценок GEBV, так как требуется большой объем данных для построения достоверных моделей; низкая чистота породности: в некоторых случаях животные могут быть кроссбредными или не чистопородными, что делает сложным применение моделей, разработанных для чистопородных животных.

Для эффективного применения GS важно иметь достоверную информацию о генотипе каждого животного, что может быть сложно с не чистопородными животными. В этой связи малые хозяйства могут столкнуться с ограниченными финансовыми возможностями для генотипирования большого количества животных или для приобретения чистопородных животных с хорошей родословной.

Данные проблемы можно решить при содействии всех отраслей животноводческой сферы: поддержка и развитие инфраструктуры для сбора, хранения и обработки данных по фенотипу и родословной важны для эффективного использования GS; обучение и поддержка для местных хозяйств по правильному сбору данных может быть ключевым, исследования и разработка моделей, применяемых к кроссбредным животным, могут способствовать расширению применения GS; сотрудничество между хозяйствами и организациями может помочь в совместном использовании данных и ресурсов; обмен опытом и знаниями с развитыми странами может также быть полезным для внедрения GS.

Правительственные или международные программы финансирования могут помочь малым хозяйствам получить доступ к необходимым ресурсам и технологиям. Программы поощрения использования GS и других современных методов селекции могут стимулировать интерес и внедрение этих технологий. Эти решения могут помочь преодолеть проблемы, с которыми сталкиваются развивающиеся страны в использовании геномной селекции в молочном скотоводстве. Важно продолжать исследования и развитие методов, которые могут быть легко адаптированы к различным условиям и породам скота.

Геномная селекция не призвана исключить или заменить оценку дочерей и зоотехнический учет. Напротив, эти методы остаются важными и дополняют геномную селекцию. Вместе они обеспечивают более полное и точное представление о генетическом

потенциале животных. Конечно, в перспективе в качестве активно используемых производителей все больше будут встречаться быки с геномной оценкой, без собственных дочерей, что и наблюдается в мире на сегодняшний день. Однако, поскольку геномная оценка проводится на основе племенной оценки, полученной «традиционными методами», учет данных дочерей приобретает иной смысл – пополнение и обновление базы популяции для еще более точной геномной оценки будущих поколений.

Важность геномной селекции в повышении продуктивности и здоровья стада. Генетическая селекция, включая геномную селекцию, действительно обладает кумулятивным эффектом, поскольку позволяет аккумулировать желаемые генетические характеристики и улучшения в последующих поколениях.

В последние десятилетия генетический анализ и геномная селекция привлекли большое внимание ученых за рубежом, что отражено в многочисленных статьях и исследованиях. Применение передовых методов в селекции позволяет значительно ускорить генетический прогресс, улучшить продуктивные и здоровые характеристики скота, а также сократить временной интервал между поколениями.

В России и Казахстане также важно развивать и применять геномную селекцию в животноводстве. Это поможет улучшить генетический потенциал поголовья, повысить продуктивность, адаптировать животных к местным условиям, улучшить здоровье и долголетие животных, а также повысить эффективность сельскохозяйственного производства в целом.

Таким образом, исследования и разработки в области геномной селекции в России и Казахстане имеют огромное значение для улучшения сельскохозяйственной продукции, повышения конкурентоспособности отрасли и обеспечения продовольственной безопасности.

Литература

1. Есмагамбетов К.К., Донник И.М., Лоретц О.Г., Леонов П.В. Изменчивость и наследуемость хозяйственно-биологических признаков коров черно-пестрой и голштинской пород в условиях Зауралья // Аграрный вестник Урала. – 2015. – № 11 (141). – С. 27-29.
2. Зиновьева Н.А., Сермягин А.А., Доцев А.В., Боронецкая О.И., Петрикеева Л.В., Абдельманова А.С., Brem G. Генетические ресурсы животных: развитие исследований аллелофонда российских пород крупного рогатого скота – миниобзор // Сельскохозяйственная биология. – 2019. – Т. 54. № 4. – С. 631-641.
3. Dechow C.D., Rogers G.W., Clay J.S. Heritability and correlations among body condition scores, production traits, and reproductive performance // J. Dairy Sci. – 2001. – № 84. – P. 266-275.
4. Dechow C.D., Rogers G.W., Clay J.S. Heritability and correlations among body condition score loss, body condition score, production and reproductive performance // J. Dairy Sci. – 2002. – № 85. – P. 3062-3070.
5. González-Recio O., Ugarte C., Alenda R. Genetic analysis of an artificial insemination progeny test program // J. Dairy Sci. – 2005. – № 88. – P. 783-789.
6. Dekkers J.C.M. Commercial application of marker- and gene-assisted selection in livestock: Strategies and lessons. J. Anim. Sci. – 2004. – № 82 (E. Suppl.). – P. E313- E328.
7. Eggen A., Fries R. An integrated cytogenetic and meiotic map of the bovine genome // Anim. Genet. – 1995. – № 26. – P. 215-236.
8. Crawley A.M., Mallard B., Wilkie B.N. Genetic selection for high and low immune response in pigs: Effects on immunoglobulin isotype expression // Vet. Immunol. Immunopathol. 2005. – № 108. – P. 71-76.
9. de Roos A.P.W., Schrooten C., Veerkamp R.F., van Arendonk J.A.M. Effects of genomic selection on genetic improvement, inbreeding, and merit of young versus proven bulls // J. Dairy Sci. – 2011. – № 94. – P. 1559-1567.
10. Fontanesi L., Scotti E., Russo V. Analysis of SNPs in the KIT gene of cattle with different coat colour patterns and perspectives to use these markers for breed traceability and authentication of beef and dairy products // Ital. J. Anim. Sci. – 2010. – № 9. – P. e42.

11. González-Recio O., Ugarte C., Alenda R. Genetic analysis of an artificial insemination progeny test program // *J. Dairy Sci.* – 2005. – № 88. – P. 783-789.
12. Heffner E., Sorrells M., Jannink J. Genomic selection for crop improvement // *Crop Sci.* – 2009. – № 49. – P. 1-12.
13. Jannink J-L., Lorenz A.J., Iwata H. Genomic selection in plant breeding: From theory to practice // *Brief. Funct. Genomics.* – 2010. – № 9. – P. 166-177.
14. Olson K.M., VanRaden P.M. Multibreed genomic evaluation of dairy cattle // *J. Dairy Sci.* – 2010. – № 93 (E-Suppl. 1). – P. 471.
15. Toosi A., Fernando R.L., Dekkers J.C.M. Genomic selection in admixed and crossbred populations // *J. Anim. Sci.* – 2010. – № 88. – P. 32-46.
16. Боднарук В.Е., Музыка Л.И., Боднар П.В., Жмур А.И., Орихивський Т.В. Новые возможности эффективной селекции в скотоводстве на основе изучения генома // *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.* – 2017. – Т. 19. № 79. – С. 32-37.
17. Веселова В.Р., Коптев В.В., Ильина А.В., Ковалева М.И. Изучение генетического полиморфизма аллельных вариантов генов CSN2 и CSN3 у крупного рогатого скота ярославской породы // В книге: Интеграция науки и высшего образования, как основа инновационного развития аграрного производства. Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2019. – С. 36-38.
18. Букаров, Н.Г. Современное состояние использования генетических маркеров в племенном скотоводстве [Текст]/ С.Ф. Силкина, Н.Г. Букаров//Сборник научных трудов. Выпуск 5. СНИИЖК. Ставрополь, 2012. – С.41
19. Глазкова Н.Ю. Иммуногенетический полиморфизм у голштинских коров ООО «Юпитер» Орловской области// *Вестник аграрной науки.* – 2019. – №2. – С. 135-138.
20. Глазкова, Н. Ю. Иммуногенетический полиморфизм молочного скота на примере ОАО «Орловское» по племенной работе [Электронный ресурс]: выпускная квалификационная работа / Н. Ю. Глазкова. – Электрон. дан. – Орел: Изд-во Орловского ГАУ, 2018.
21. Фокша В.Ф. Использование генетических маркеров при оценке быков-производителей / В.Ф. Фокша, А.Г. Констандогло// *Зоотехническая наука Беларуси* – 2004. – № 39. – С. 139-142
22. Егорашина Е.В., Тамарова Р.В. Повышение эффективности разведения молочного скота методом маркерной селекции // В книге: Биотехнология в растениеводстве, животноводстве и сельскохозяйственной микробиологии. Сборник тезисов докладов 19-ой Всероссийской конференции молодых учёных, посвященной памяти академика РАСХН Георгия Сергеевича Муромцева. Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии». – 2019. – С. 122-124.
23. Ben J. Hayes, Harris A. Lewin, Michael E. Goddard The future of livestock breeding: genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation // *Trends in Genetics.* – 2013. – V.29, Issue 4. – P. 206-214 <https://doi.org/10.1016/j.tig.2012.11.009>
24. Dekkers, J.C.M., and Hospital, F. Multifactorial genetics: the use of molecular genetics in the improvement of agricultural populations // *Nat. Rev. Genet.* – 2002. – 3. – P. 22-32.
25. Goddard, M.E., and Hayes, B.J. Mapping genes for complex traits in domestic animals and their use in breeding programmes // *Nat. Rev. Genet.* – 2009. – V.10. – P. 381-391.
26. Bernardo, R. Genomewide selection when major genes are known // *Crop Sci.* – 2014. – V.54. – P. 68-75.
27. Bernardo, R., and Yu, J. Prospects for genomewide selection for quantitative traits in maize. *Crop Sci.* – 2007. – V.47. – P. 1082-1090.
28. Hickey, J.M., Chiurugwi, T., Mackay, I., Powell, W. Implementing Genomic Selection in CGIAR Breeding Programs Workshop Participants. Genomic prediction unifies animal and plant breeding programs to form platforms for biological discovery // *Nat. Genet.* – 2017. – V.49. – P. 1297–1303.
29. Jonas, E., and de Koning, D.-J. Does genomic selection have a future in plant breeding? // *Trends Biotechnol.* – 2013. – V.31. – P. 497–504.
30. Desta, Z.A., and Ortiz, R. Genomic selection: genome-wide prediction in plant improvement // *Trends Plant Sci.* – 2014. – V.19. – P. 592–601.
31. Berry D., Kearney F., Harris B. Genomic selection in Ireland // *Interbull*, Uppsala, Sweden. 2009. – № 39. – P. 29-34.
32. Eui-Soo Kim, Max F. Rothschild Genomic adaptation of admixed dairy cattle in East Africa // *Frontiers in Genetics.* – 2014. – Volume 5. – <https://doi.org/10.3389/fgene.2014.00443>
33. Habier, D., Tetens J., Seefried F-R, Lichtner P., Thaller G. The impact of genetic relationship information on genomic breeding values in German Holstein cattle // *Genet. Sel. Evol.* – 2010. – № 42. – P. 5

34. Harris, B.L., Johnson D.L. Genomic predictions for New Zealand dairy bulls and integration with national genetic evaluation // J. Dairy Sci. – 2010. – № 93. – P. 1243- 1252.
35. Епишко, Т.И., Епишко О.А. SNP-маркеры в геномной селекции молочного скота // Розведение і генетика тварин. – 2012. – № 46. – С. 282-284.
36. Кислякова, Е.М., Исупова Ю.В., Якимова В.Ю., Кузнецова М.К. Использование результатов геномной оценки в селекции крупного рогатого скота // Молочное и мясное скотоводство. – 2023. – № 5. – С. 35-39.
37. Сермягин, А.А., Нарышкина Е.Н., Карпушкина Т.В., Стрекозов Н.И., Зиновьева Н.А. Перспективы использования оценки геномной племенной ценности в селекции молочного скота // Молочное и мясное скотоводство. – 2015. – № 7. – С. 2-5.
38. Goddard, M.E., Hayes B.J. Mapping genes for complex traits in domestic animals and their use in breeding programmes // Nature reviews / Genetics. – 2009. – №6. – Vol. 10. – P. 381-391
39. Daetwyler, H.D., Villanueva B., Bijma P., Woolliams J.A. Inbreeding in genome-wide selection // J. Anim. Breed. Genet. – 2007. – Vol. 124. – P. 369-376
40. Lillehammer, M.A., Meuwissen T.H.E., Sonesson A.K. comparison of dairy cattle breeding designs that use genomic selection // Journal of Dairy Science. – V.94, Issue 1. – 2011. – P. 493-500
41. Исупова, Ю.В., Юдин В.М. Продуктивность дочерей быков-производителей в зависимости от генотипа каппа-казеина (K-CAS) // Научное и кадровое обеспечение АПК для продовольственного импортозамещения: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – МСХ РФ, ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. – 2016. – С. 103-105
42. Calus, M.P.L., Meuwissen H.E., de Roos A.P.W., Veerkamp R.F. Accuracy of genomic selection using different methods to define haplotypes // Genetics. – 2008. – V.183. – P.553-561.
43. Daetwyler H.D., Villanueva B., Woolliams J.A. Accuracy of predicting the genetic risk of disease using a genome-wide approach // PLoS ONE. – 2008. – V.3. – P. e3395
44. Goddard, M.E. Genomic selection: prediction of accuracy and maximization of longterm response // Genetica. – 2009. – V.136. – P.245-257
45. Dekkers, J.C.M. Prediction of response to marker-assisted and genomic selection using selection index theory // J. Anim. Breed. Genet. – 2007. – V. 124. – P.331-341
46. VanRaden, P.M., VanTassell C.P., Wiggans G.R., Sonstegard T.S., Schnabel R.D., Taylor J.F., Schenkel F.S. Invited review: reliability of genomic predictions for North American Holstein bulls // J. Dairy Sci. – 2009. – V.74. – P.2737-2746.
47. De Roos, A.P.W., Schrooten C., Mullaart E., van der Beek S., de Jong G., Voskamp W. Genomic selection at CRV // Interbull Bulletin. – 2009. – V.39. – P.47-50
48. Manjit, Panigrahi, Harshit Kumar, K.A. Saravanan, Divya Rajawat, Sonali Sonejita Nayak, Kanika Ghildiyal, Kaiho Kaisa, Subhashree Parida, Bharat Bhushan, Triveni Dutt Trajectory of livestock genomics in South Asia: A comprehensive review // Gene. – 2022. – V. 843. – p.146808
49. Бейшова, И.С., Белая Е.В., Траисов Б.Б., Ковальчук А.М. Ассоциация полиморфных генов соматотропного каскада с признаками мясной продуктивности у коров аулиекольской и казахской белоголовой пород // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики: Серия «Естественные науки». – 2017 г. – №12. – С. 5-10.
50. Бейшова, И.С., Белая Е.В., Баймишев Х.Б., Траисов Б.Б. Влияние сочетаний соматотропных генов на мясную продуктивность крупного рогатого скота // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 2. – С.51-57
51. Andersson, L., Georges M. Domestic-animal genomics: deciphering the genetics of complex traits // Nat. Rev. Genet. – 2004. – V.5. – P.202-212.
52. Hayes, B., Goddard M. Genome-wide association and genomic selection in animal breeding // Genome. – 2010. – V.53 (11). – <https://doi.org/10.1139/G10-076>
53. Cruz, E.E-V., Guilherme L.P., Rogério A.C., et all. Effect of the g.98535683A>G SNP in the CAST gene on meat traits of Nellore beef cattle (Bos indicus) and their crosses with Bos taurus // Meat Science. – 2017. – V.123. – P.64-66
54. Electronic journal «1000 Bull Genomes Project», access mode [www.1000bullgenomes.com/] Accessed January 3, 2019
55. Hayes, B.J., Daetwyler H.D. 1000 bull genomes project to map simple and complex genetic traits in cattle: applications and outcomes // Annu. Rev. Anim. Biosci. – 2019. – V.7. – P.89-102. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-020518-115024>
56. Bouwman, A.C., Daetwyler H.D., Chamberlain JA, et al. Meta-analysis of genome-wide association studies for cattle stature identifies common genes that regulate body size in mammals. Nat Genet. – 2018. – V.50. – P.362-367.

57. Daetwyler, H.D., Capitan A., Pausch H., et al. Whole-genome sequencing of 234 bulls facilitates mapping of monogenic and complex traits in cattle. *Nat Genet.* – 2014. – V.46. – P.858-865.
58. Сермягин, А.А. Перспективы использования оценки геномной племенной ценности в селекции молочного скота / А.А. Сермягин, Е.Н. Нарышкина, Т.В. Карпушкина, Н.И. Стрекозов, Н.А. Зиновьева // Молочное и мясное скотоводство. – 2015. – №7. – С.2-5
59. Wang, X. A comparison of genomic selection methods for breeding value prediction / X. Wang, Z. Yang, C. Xu // *Science Bulletin.* – May 2015. – Volume 60, Issue 10. – P. 925-935
60. Goddard, M.E. Genomic selection / M.E. Goddard, B. Hayes // *J. Anim. Breed Genet.* – 2007. – Vol. 124. – P. 323-330
61. Henderson, C.R. Best linear unbiased estimation and prediction under a selection model / C.R. Henderson // *Biometrics.* – 1975. – Vol. 31. – P. 423-447
62. Lande, R. Efficiency of marker-assisted selection in the improvement of quantitative traits / R. Lande, R. Thompson // *Genetics.* – 1990. – Vol. 124. – P. 743-756
63. Meuwissen, T.H.E. Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps / T.H.E. Meuwissen, B.J. Hayes, M.E. Goddard // *Genetics.* – 2001. – Vol. 157. – P. 1819-1829.
64. Sellner, E.M. Board-invited review: Applications of genomic information in livestock / E.M. Sellner, J.W. Kim, M.C. McClure, K.H. Taylor, R.D. Schnabel, T.F. Taylor // *J. Anim. Sci.* – 2007. – V. 85. – P. 3148-3158
65. Hayes, B.J. Invited review: Genomic selection in dairy cattle: Progress and challenges / B.J. Hayes, P.J. Bowman, A.J. Chamberlain, M.E. Goddard // *J. Dairy Sci.* – 2009. – V.92. – P.433-443
66. Калашникова, Л. Геномная оценка молочного скота / Л. Калашникова // Молочное и мясное скотоводство. – 2010. – №1. – С.10-12
67. Айдашев, Б.А. Изменчивость и повторяемость основных селекционируемых признаков у коров алатауской породы / Б.А. Айдашев // *Аграрная наука: сер. Животноводство.* – 2007. – №2. – С.24-26
68. Стрекозов, Н.И. Разведение высокоудойных коров / Н.И. Стрекозов // *Животноводство России.* – 2004. – №5. – С.30-31
69. König, S. Economic evaluation of genomic breeding programs / S. König, H. Simianer, A. Willam // *J. Dairy Sci.* – 2009. – V.92. – P.382-391.
70. Юдин, Н.С. Применение репродуктивных технологий для повышения эффективности геномной селекции молочного крупного рогатого скота / Н.С. Юдин, К.И. Лукьянов, М.И. Воевода, Н.А. Колчанов // *Вавиловский журнал генетики и селекции.* – 2015. – №19 (3). – С. 277-285
71. Мымрин, В.С. Использование геномных индексов для отбора быков-производителей / В.С. Мымрин, О.А. Ткачук, Н.Е. Шавшукова // *Молочное и мясное скотоводство.* – 2012. – №4. – С.4-6
72. Попов, Н.А. Генетический мониторинг в селекции сельскохозяйственных животных / Н.А. Попов, А.В. Баранов, В.Ф. Максименко, В.К. Чернушенко, Р.М. Дубровская, А.А. Новиков, С.П. Безенко, Ю.П. Фомичев // *Проблемы развития и научное обеспечение животноводства Евро-Северо-Востока России: сборник материалов научно-практической конференции.* – г. Кострома, 23-25 июня 2003 г. – Кострома, 2005. – 376 с.
73. Börner, V. Optimum multistage genomic selection in dairy cattle / V. Börner, F. Teuscher, N. Reinsch // *Journal of Dairy Science.* – Volume 95. – Issue 4. – April 2012. – P. 2097-2107
74. Calus, M.P.L. Accuracy of breeding values when using and ignoring the polygenic effect in genomic breeding value estimation with a marker density of one SNP per cM / M.P.L. Calus, R.F. Veerkamp // *J. Anim. Breed. Genet.* – 2007. – V. 124. – P.362-368. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0388.2007.00691.x>
75. Muir, W.M. Comparison of genomic and traditional BLUP estimated breeding value accuracy and selection response under alternative trait and genomic parameters / W.M. Muir // *J. Anim. Breed. Genet.* – 2007. – V.124. – P.342-355. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1439-0388.2007.00700.x>

УДК 636.018

Влияние контролируемых факторов на успешную имплантацию эмбрионов после пересадки

Бабенков В.Ю.

Белгород, Россия

Аннотация. В представленной работе в результате аналитического исследования изучены основные причины низких результатов в практике трансплантации доимплантационных эмбрионов для оптимизации управления процессами повышения эффективности прикладного использования репродуктивных технологий в скотоводстве. Определена значимость таких факторов, как готовность морфофизиологического состояния репродуктивной системы реципиента к имплантации эмбриона на момент пересадки и эффективность систем синхронизации эстрального цикла. Особое значение отведено результатам пересадки в зависимости от места аппликации эмбриона в роге матки, что связано с необходимостью наличия профессионального опыта у специалистов и является существенным порогом ограничения уровня приживляемости эмбрионов. В связи с этим отмечена эффективность использования модифицированных инструментов для глубокой аппликации эмбрионов. Определена зависимость приживляемости деконсервированных эмбрионов от методов крио- и деконсервации при нехирургическом переносе реципиентам.

В общем анализе собственных исследований морфологическая оценка качества проведена у более 12000 эмбрионов, из которых около 8000 прошли процедуры крио- и деконсервации, а общее количество пересадок свежеполученными и заморожено-оттаянными эмбрионами составило более 9000, что в совокупности указывает на высокую значимость полученных результатов.

Ключевые слова: репродуктивная система, эстральный цикл, эмбрион, трансплантация, синхронизация, приживляемость, имплантация, место аппликации, криоконсервация, деконсервация.

Для цитирования: Бабенков В.Ю. Влияние контролируемых факторов на успешную имплантацию эмбрионов после пересадки // Успехи наук о животных. 2025. № 2. С. 51—68. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.004

The influence of controllable factors on successful embryo implantation after transfer

V. Yu. Babenkov

Belgorod, Russia

Abstract. In the presented work, as a result of an analytical study, the main reasons for low results in the practice of transplantation of preimplantation embryos were studied to optimize the management of processes to improve the efficiency of applied use of reproductive technologies in cattle breeding. The significance of such factors as the readiness of the morphophysiological state of the recipient's reproductive system for embryo implantation at the time of transplantation and the efficiency of estrous cycle synchronization systems was determined. Particular importance was given to the results of transplantation depending on the place of embryo application in the uterine horn, which is associated with the need for professional experience among specialists and is a significant threshold for limiting the level of embryo engraftment. In this regard, the effectiveness of using modified instruments for deep embryo application was noted. The dependence of the engraftment of depreserved embryos on the methods of cryo- and depreservation during non-surgical transfer to recipients was determined.

In the overall analysis of our own research, morphological quality assessment was carried out on more than 12,000 embryos, of which about 8,000 underwent cryo- and deconservation procedures, and the total number of transplants of freshly obtained and frozen-thawed embryos amounted to more than 9,000, which together indicates the high significance of the results obtained.

Keywords: reproductive system, estrous cycle, embryo, transplantation, synchronization, engraftment, implantation, application site, cryopreservation, deconservation.

For citation: Babenkov VYu. The influence of controllable factors on successful embryo implantation after transfer. Ernst Journal of Animal Science. 2025. 2: 51—68. Russian. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.004

Введение. На сегодняшний день в биологии воспроизводства крупного рогатого скота определилось два направления, связанных с ускоренным тиражированием генетического потенциала лучших коров. Достаточно широкое применение на практике имеет биотехнология МОЕТ (множественная овуляция и перенос эмбрионов). Она базируется на массовом получении доимплантационных зародышей, развитие которых происходит в организме матери – технология *in vivo* (IVD-эмбрионы). В последние годы интенсивно развивается технология *in vitro* – производство эмбрионов из ооцитов, извлеченных из фолликулов коров (IVP-эмбрионы) – рост и развитие таких эмбрионов проводится искусственно в лабораторных условиях. Преимущества репродуктивных технологий в сравнении с традиционными способами размножения позволяют в ускоренные сроки существенно увеличить число потомков от коров с высоким генетическим потенциалом.

Технологические этапы взаимосвязи в системе «донор-эмбрион-реципиент-потомок» в технологиях *in vivo* и *in vitro* определяют их главные практические задачи. Причем, если массовое получение эмбрионов от выдающихся матерей-доноров выполняется разными путями, то трансплантация эмбрионов как целевой и завершающий этап, а именно получение прямых потомков от доноров через матерей-реципиентов, осуществляется методами, едиными для обеих технологий.

Внедрение в производство методов репродуктивных технологий достаточно сложный процесс, поэтому практикующие специалисты нередко сталкиваются с получением низких по эффективности результатов, что обусловлено различными, но часто очевидными и определяемыми причинами.

При этом следует отметить, что и многоэтапная технология получения эмбрионов, и последующее использование их для успешной трансплантации основываются на точном выполнении технологических приемов и в большой степени зависят от профессионализма исполнителей. Специалисты часто констатируют тот факт, что получение качественной эмбриопродукции от доноров еще не гарантирует успех эффективного получения потомства.

Для обеспечения условий эффективности эмбриотрансфера необходимо учитывать комплекс объективных и субъективных факторов, который включает требования к реципиентам, технологические аспекты подготовки эмбрионов и методы их пересадки. Большое значение имеет общее физиологическое состояние и состояние репродуктивной системы животных, связанные с условиями содержания и кормления, в частности жара, жажда, голод, болезни и усталость, а также такие воспалительные процессы в организме реципиента, как мастит, пневмония, хромота и заболевания репродуктивных органов. Имеют место факторы, определить которые на практике не представляется возможным. Но их вероятность и частота проявления находятся под вопросом. Это неспособность эмбриона к имплантации в матку, связанная с невозможностью его хэтчинга, или выхода зародышевого комплекса из зоны пеллюцида, прерванное биохимическое взаимодействие между эмбрионом и маткой реципиента, генетические аспекты их взаимосвязи и различные хромосомные аномалии.

Особого внимания заслуживает изучение причин, которые непосредственно контролируются специалистами-биотехнологами. К ним следует отнести методы подготовки реципиентов и определение готовности их репродуктивной системы к имплантации эмбрионов, технология обработки эмбрионов и их подготовки к пересадке, а также технику выполнения собственно процедуры пересадки.

Поиск и анализ причин низких результатов в практике эмбриотрансфера для определения эффективных путей оптимизации управления процедурами подготовки реципиентов, обработки эмбрионов при крио- и деконсервации для трансплантации

реципиентам сегодня находятся в категории приоритетных задач повышения эффективности репродуктивных технологий, что является целью настоящего аналитического исследования на основе собственных экспериментов и данных других авторов.

Материалы и методы. Настоящая работа представляет собой аналитическое исследование, основанное на результатах наших многолетних экспериментов по биотехнологии эмбриотрансфера в Брестском биотехнологическом центре Республики Беларусь (1987–2003 гг.), в центре по производству эмбрионов ООО «Бетагран Липецк» (2014–2016 гг.), КФХ «Бату Плюс» Республики Калмыкия (2016–2018 гг.) и Калмыцком государственном университете имени Б.Б. Городовикова (2018–2024), а также данных других авторов.

В материалах экспериментов, рассматриваемых в настоящей работе, использовались результаты собственных экспериментов и данные других авторов по практическому применению репродуктивных биотехнологий, включающие: методы подготовки реципиентов, в том числе с использованием систем синхронизации полового цикла, морфологической оценки качества, криоконсервации и трансплантации свежеизвлеченных и деконсервированных эмбрионов с использованием общепринятых и разработанных методов.

Пригодные 7-8-дневные эмбрионы, полученные от коров-доноров различных пород по технологии *in vivo* (МОЕТ) использовали в программах пересадки свежеполученными или после глубокого замораживания.

Технология глубокой криоконсервации эмбрионов включала процедуры насыщения эмбрионов путем эквilibрации в растворах проникающих криопротекторов глицерина и этиленгликоля повышающихся концентраций. Глицерин использовали для замораживания эмбрионов для классической непрямой пересадки, для прямой пересадки – этиленгликоль. Для криоконсервации отбирали эмбрионы отличного и хорошего качества на стадии развития морула-бластоциста. Глубокое охлаждение до температуры -36°C осуществлялось на программных замораживателях ЗЭМ-4 и CL5500 с последующим погружением пайет с эмбрионами в жидкий азот при температуре -196°C . Деконсервацию эмбрионов осуществляли двумя способами. Для непрямой пересадки после оттаивания в водяной бане проводилось ступенчатое выведение глицерина путем эквilibрации в растворах понижающейся концентрации с оценкой качества и сохранности эмбрионов после деконсервации с последующим переносом реципиентам. Для прямой пересадки криопротектор этиленгликоль не выводился, после оттаивания состояние эмбрионов не проверялось, а проводился прямой перенос реципиентам.

В качестве реципиентов для пересадки эмбрионов использовали коров и тёлочек случного возраста, отобранных в спонтанной охоте или после гормональной синхронизации эстрального цикла по рекомендациям А.В.Макарова и С.В.Шадрина [28] путем двукратного введения эстрофана с интервалом 11 дней.

Пересадки эмбрионов проводили ректоцервикально катетерами Кассу и разработанным инструментом для глубокой аппликации эмбрионов (патент РБ на изобретение «Устройство для трансплантации эмбрионов» №1796171, 1993 г.).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с помощью офисного программного комплекса «Microsoft Office» с применением программы «Excel» («Microsoft», США) с обработкой данных в «Statistica 9.0» («Stat Soft Inc.», США).

Результаты и обсуждение. Для обеспечения условий эффективности эмбриотрансфера необходимо учитывать комплекс объективных и субъективных факторов, который включает требования к реципиентам, технологические аспекты подготовки эмбрионов и методы их пересадки [59].

В программе эмбриотрансфера базисом для выполнения конечной цели – ускоренного получения генетически ценного потомства от элитных матерей, является отбор животных в качестве реципиентов. На этом этапе формируется начало решения цели.

На практике нехирургическая пересадка эмбрионов позволяет в среднем получать 50-60% приживляемости эмбрионов. По мнению ряда авторов, подобные результаты во многом связаны с отбором реципиентов, их качеством, возрастом и подготовкой под пересадку [51-53, 71].

Для трансплантации эмбрионов в качестве реципиентов используют коров и телок. К коровам предъявляется существенно больше требований, чем к телкам. Коровы могут быть подходящими реципиентами, если не имеют проблем с воспроизводством, и у которых наблюдались лёгкие отёлы. Перенос эмбрионов проводится после полного восстановления матки, не ранее, чем через 2 месяца после отела и восстановления половых циклов. Но при этом остается риск наличия хронических заболеваний, в частности эндометритов, нередко встречаются морфофункциональные нарушения в яичниках. Поэтому по нашим данным и данным других авторов приживляемость эмбрионов после пересадки у коров, как правило, ниже, чем у телок [5-6, 18-19, 41].

Нами в течение 1987-2003 гг. в Брестском областном центре по трансплантации эмбрионов «Литвиново» Республики Беларусь проводились практические исследования по трансплантации свежеизвлеченных и заморожено-оттаянных эмбрионов с использованием в качестве реципиентов телок случного возраста. Данные многолетних исследований, проведенных на большом фактическом материале, показали возможность достижения высокоэффективных результатов [1, 7, 9, 10, 26]. Средний уровень стельности реципиентов-телок после трансплантации свежеполученных эмбрионов составлял 54,7%, аналогичный показатель при использовании эмбрионов после деконсервации – 48,0% (Таблица 1). Следует учитывать, что для трансплантации использовались эмбрионы разных категорий качества, а также эмбрионы экспериментальных групп, что неизбежно при большом поголовье реципиентов с учетом направления и объема проводимых работ.

Таблица 1. Приживляемость свежих и деконсервированных эмбрионов у реципиентов-телок

Состояние эмбрионов	Число реципиентов	Стельных реципиентов	Стельность, %
Свежеполученные	1065	583	54,7
Деконсервированные	1030	494	48,0

Зеркальный результат (54,7% стельности) на телках-реципиентах по свежеполученным эмбрионам был получен в исследованиях Дуванова А.В. [18]: из 95 телок стельность установили у 52 животных. Как было сказано, использование коров в качестве реципиентов отличается более низкой результативностью. Так, в аналогичных условиях на большом поголовье коров-реципиентов (2797 гол.), за период с 2018 по 2021 годы после трансплантации деконсервированных эмбрионов было получено 1086 стельностей, что составило 38,8% с колебаниями по годам от 33,6 до 42,8%. [19].

Наш эксперимент, проведенный в 2002 г. в СПК «Агрокомбинат Снов» Республики Беларусь по пересадке заморожено-оттаянных эмбрионов, также показал более низкий уровень стельности у коров по сравнению с телками – 33,3 против 45,2% соответственно [5, 6] (Таблица 2).

Таблица 2. Эффективность пересадки деконсервированных эмбрионов у коров и телок-реципиентов

Показатели	Группы животных	
	Телки	Коровы
Количество реципиентов	62	21
Стельных реципиентов	28	7
Уровень стельности, %	45,2	33,3

Не вызывает сомнений, что помимо половозрастного влияния результаты трансплантации эмбрионов находится в прямой зависимости от общего состояния здоровья и состояния репродуктивной системы реципиентов. Поэтому подготовка потенциальных реципиентов начинается с отбора животных, которые отвечают необходимым морфофизиологическим требованиям [12, 15, 17]. Так, уровень оплодотворяемости, полученный у телок-реципиентов после пересадки эмбрионов составляет: у здоровых – 68 % и выше, по сравнению с телками, неоднократно бесплодно осемененными – 58% [55, 60].

Следующим необходимым условием является синхронность половых эструсов донора и реципиента. Этот фактор обеспечивает максимальной уровень приживляемости эмбрионов [61, 64]. При этом асинхронность во времени проявления охоты у доноров с реципиентами не должна превышать +/- 12 часов [13, 22].

При подготовке групп животных для искусственного осеменения и пересадки эмбрионов широкое распространение получила система синхронизации половой охоты, которая позволяет использовать большое количество животных в сжатые сроки, перенести массовые отелы на другое время, проводить осеменение и пересадку эмбрионов при затруднении выявления половой охоты [39]. По данным пенсильванского университета, многие протоколы синхронизации эструса могут вызвать овуляцию у 75–90% животных в течение 5-дневного периода [12]. В данном контексте есть как положительные, так и отрицательные стороны. Схемы гормональной стимуляции охоты приводят к угнетению эндокринных органов, обеспечивающих функционирование половой системы при бессистемном применении гормональных препаратов. Кроме того, Макаров А.В. и Шадрин И.В. приводят такие данные: «...при использовании схем синхронизации беременность наступит только в 45-50% случаев от всего количества осемененных коров» [28, с. 32; 40]. Аналогичные результаты отмечают и другие авторы [12, 17].

С чем связан низкий уровень оплодотворяемости животных? При синхронизации полового цикла одним из основополагающих требований является время прихода животных в охоту для определения оптимального времени осеменения или пересадки эмбрионов. Как правило, при четком соблюдении всех прочих условий использования животных в воспроизводстве остается «за скобками» значение отклонений в сроках проявления половой охоты от ожидаемых по схеме. В то же время, для получения положительных результатов оплодотворения рядом авторов отмечается необходимость учета даже стадий половой охоты [64–66]. В нашем контексте «сжатые сроки» означают приход животных в охоту в течение 5-дневного периода, о чем говорилось выше, а не в течение одних суток, что отвечало бы необходимым требованиям технологии переноса эмбрионов [15, 21, 34, 35, 37, 41]. Однако, туровая синхронизация эстрального цикла предусматривает осеменение или пересадку эмбрионов по прогнозируемой дате охоты, в чем и состоит ее основная цель. Потери в оплодотворении животных отодвигаются на второй план, что лимитирует эффективность в пределах 45-50% стельности. Сдвиг по срокам проявления охоты выступает как негативный фактор, существенно ограничивающий эффективность искусственного осеменения и успешную имплантацию эмбрионов. Соответственно, туровая

пересадка эмбрионов, связанная с синхронизацией эструса у реципиентов, как правило, сопровождается низкими результатами [24]. В западных странах, где трансплантация эмбрионов используется в широких масштабах, уровень стельности на большом числе пересадок ограничен 45-55% [36, 69].

Таким образом, приходится учитывать, что логистика методов синхронизации ограничена дилеммой выбора. С одной стороны – потери в уровне стельности при затруднении или невозможности выявления половой охоты, но при этом возможность проведения большого числа пересадок в сжатые сроки. С другой стороны – затруднения при проведении массовых пересадок в ограниченные сроки, но более высокая эффективность при фиксации охоты любыми возможными способами, в частности, при формировании небольших по численности групп животных. Практика показывает, что в группах, численностью до 30 голов, выявление животных в охоте не имеет затруднений. В то же время, сегодня существует система Heatime – автоматизированное выявление охоты у коров с точностью до 97% [12]. Система выявляет охоту в течение всего периода активизации половой функции (48-120 часов), что, соответственно, требует многократного подхода к животным синхронизированной группы. При этом, в отличие от искусственного осеменения, пересадка эмбрионов может быть скорректирована по результатам отбора реципиентов в охоте, поскольку проводится через 7-8 дней после охоты. С учетом возраста эмбрионов и допуска отклонений +/- 12 часов в группу по пересадке эмбрионов попадают животные, находившиеся в охоте в течение 3 дней: 1-й день – после обеда, 2-й – полный день, 3-й день – до обеда. Это позволяет достаточно полно использовать эффект синхронизации больших групп реципиентов с помощью системы Heatime: в течение трех дней в охоту приходит более 80% обработанных животных. Оптимальный уровень выявления половой охоты составляет не менее 70-80% [28] и даже 75-90% [12].

Амбициозность задач по пересадке многих десятков, а иногда и сотен эмбрионов в ограниченные сроки с корректировкой не по фактической, а по прогнозируемой дате, нередко сопровождается низкими результатами, о чем было сказано выше, и служит одной из причин дискредитации технологии эмбриотрансфера. Таким образом, в практике переноса эмбрионов большое значение имеет фиксирование половой охоты реципиентов. Практическая значимость этого фактора подтверждается исследованиями, проведенными в период с 1987 по 1993 гг. в центре по трансплантации эмбрионов экспериментальной базы «Майск» Брестского НПО по сельскому хозяйству Республики Беларусь. После пересадки деконсервированных эмбрионов телкам-реципиентам по прогнозируемой охоте при наличии желтого тела (ЖТ) в яичнике уровень стельности составил 45,2%, и заметно выше при наличии ЖТ и фиксировании половой охоты (54,3%). Этот результат не уступал пересадке свежих эмбрионов при тех же условиях на большое поголовье животных-реципиентов с фиксированной охотой – после пересадки стельность была установлена у 663 из 1183 реципиентов (56,0%) [1] (Таблица 3).

Таблица 3. Зависимость приживляемости эмбрионов от учета эстрального цикла реципиентов

Группы эмбрионов	Фиксация охоты	Показатели		
		Пересадок	Стельных	%
Деконсервирован.	Есть	81	44	54,3
Деконсервирован.	Нет	62	28	45,2
Свежие	Есть	1183	663	56,0

Успешная имплантация пересаженного эмбриона зависит от стадии эстрального цикла реципиента, когда состояние его репродуктивной системы соответствует стадии развития эмбриона, прошедшего аналогичный период развития в матке донора.

Предимплантационные эмбрионы в возрасте 6-8 дней пересаживают реципиентам, находящимся на стадии полового цикла, соответствующей структурно-функциональному состоянию яичников [62, 63]. При этом в яичнике реципиента должно присутствовать функционирующее ЖТ, продуцирующее прогестерон. По данным Erb R.E. [48], роль в регуляции эмбрионального развития принадлежит стероидным гормонам, выделяемым яичниками: эстрогенам и прогестерону. Ведущая роль принадлежит также гормонам гипофиза – ЛГ и ФСГ, которые стимулируют лютеальные клетки, способствуя секреции прогестерона [54].

На практике наличие ЖТ определяется путем ректальной пальпации яичников или с помощью УЗИ-сканера. Его присутствие или отсутствие свидетельствует о готовности или не готовности матки к имплантации эмбриона [27, 31, 33]. Однако, его наличие не гарантирует точного совпадения половых циклов доноров и реципиентов, если неизвестно точное время прихода животного в половую охоту. По морфологическим признакам стадию развития ЖТ определить невозможно, а асинхронность стадии полового цикла с возрастом эмбрионов более 12 часов приводит к снижению приживляемости эмбрионов [13, 14, 22]. Таким образом, для успешного оплодотворения становится очевидной необходимость строгой фиксации времени прихода реципиента в охоту [70]. Поэтому при отборе потенциальных реципиентов, животных, пришедших в охоту раньше или позднее указанного промежутка времени, отсеивают сразу, без оценки состояния яичников. Это является необходимостью при использовании свежеполученных эмбрионов, но при использовании замороженных эмбрионов процедура пересадки может быть перенесена на другое время в соответствии с возрастом эмбрионов.

Отсутствие ЖТ при наличии неовулировавшего фолликула говорит о задержке овуляции, вследствие нарушений в нейрогуморальной регуляции внутрияичниковых процессов. В этом случае матка не готова к имплантации эмбриона и стельность наступить не может. Таких реципиентов следует отбраковывать. Одинаковые по размеру и, как правило, уменьшенные яичники могут свидетельствовать о гипофункциональных нарушениях или ошибке при выявлении охоты. Также подлежат выбраковке реципиенты, на яичниках которых обнаруживаются кистозные изменения, пальпируемые в виде крупных образований с тугой флюктуацией [14, 32]. Таким образом, важной составляющей успешной трансплантации эмбрионов является физиологическое соответствие репродуктивной системы стадии полового цикла реципиентов при условии точного определения морфофункционального состояния яичников, что обеспечивает оптимальные условия для имплантации эмбрионов.

Решающее значение имеет техническое выполнение собственно процедуры пересадки эмбрионов, которая осуществляется нехирургическим путем. В отличие от техники искусственного осеменения, когда семя достаточно доставить в матку животного, трансплантация эмбрионов осуществляется в рог матки, что является сложной процедурой, особенно у телок и требует опыта, связанного с длительной подготовкой специалиста.

При этом инструменты, которые используются для переноса эмбрионов, в связи с особенностью репродуктивного тракта коров и телок, по аналогии с катетерами для искусственного осеменения имеют жесткую конструкцию. Недостатком таких устройств является то, что они в большинстве случаев не могут достигнуть верхушки рога матки, и, как следствие, отсутствует возможность провести точечную аппликацию эмбриона в необходимое местоположение верхушки рога матки [81]. Так, наиболее часто используемый катетер Кассу и его модификации позволяют получать 50-60% приживляемости у опытных

специалистов [1, 33, 40, 44, 45, 78]. Следует учитывать, что при таком переносе эмбрионов отмечается высокий риск микротравмирования эндометрия рога матки с выделением крови, токсичной для эмбрионов, что снижает вероятность их имплантации [1, 56, 76, 80]. Процедура пересадки связана с выполнением достаточно сложных манипуляций по ректоцервикальному проведению катетера через половые пути в оптимальное для имплантации место рога матки. Сведение такого риска к минимуму требует профессионального опыта, который достигается годами и зависит от индивидуальных способностей отдельно взятого исполнителя. Это подтверждается результатами пересадки у опытного специалиста (58% стельности) и новичка – только 35% [74].

В настоящее время установлен факт зависимости приживляемости пересаженного эмбриона от места его аппликации в роге матки животного. Так, в исследованиях Niemann H. [67] было показано, что верхушка рога матки является наиболее оптимальным местом. Ряд других авторов подтверждают эту точку зрения [35, 46-47, 74]. В случаях расположения эмбриона ближе к верхушке рога матки отмечено наиболее частое наступление стельности, где путем нейрогуморальной регуляции внутрияичниковых процессов создаются оптимальные условия для имплантации и развития пересаженного эмбриона [57, 72, 79, 81]. Отмечается также, что необходимая концентрация прогестерона обеспечивает маточную секрецию именно в верхушке рога [31, 35, 68].

По некоторым ранним данным литературы уровень стельности при пересадке эмбрионов в середину рога матки составляет 25-37,5%, а при трансплантации в верхушку рога достигает 40-50% и более [20]. Поэтому для повышения уровня стельности необходимо стремиться к проведению аппликации эмбрионов непосредственно в верхушку рога, что технически, как говорилось выше, является сложной процедурой и требует высокой квалификации специалистов [49]. Влияние квалификации на эффективность пересадки отмечается и другими авторами [1, 75, 77]. Таким образом, ограничивающим фактором высокой приживляемости эмбрионов является доступная глубина аппликации эмбрионов.

Отрицательное влияние сложных манипуляций при проведении катетера в верхушку рога матки реципиента может быть существенно упрощено при использовании инструментов специальных конструкций. В последние годы появились разработки различных модификаций катетеров для пересадки, конструкция которых позволяет проводить аппликацию эмбрионов непосредственно в верхушку рога матки с минимальным риском травмирования эндометрия.

В 2022 году на рынке биотехнологического оборудования появилось новое устройство XtremiA французской компании Elexinn для глубокого искусственного осеменения, которое также позиционируют, как революцию в области переноса эмбрионов. Однако эффективность данного устройства вызывает сомнения, поскольку в основе лежит использование супертонкой трубки, подобной эндотрахеальному катетеру, для продвижения ее вглубь полости рога матки. На наш взгляд, у всех устройств с подобным принципом действия имеется существенный недостаток, проверенный на практике: при продвижении очень тонкой трубки в полости рога матки имеет место риск зацепа кончика трубки между карункулами, устилающими слизистую рога [34]. В этом случае трубка не продвигается в полости рога, а образует петлю и при выталкивании эмбрион, вместо верхушки рога, попадает в место зацепа. При этом оператор может не знать о возникшем нарушении, а частота таких нарушений неизвестна. На результаты искусственного осеменения эти отклонения не влияют, поскольку семя поступает непосредственно в полость рога матки. Что касается пересаженного эмбриона, то исходя из вышесказанного, его способность к имплантации при аппликации в основание или середину рога существенно снижается.

В наших исследованиях был разработан специальный катетер с гибким сдвигаемым чехлом, который после прохождения цервикального канала шейки обеспечивает доставку эмбриона в верхушку рога матки без риска микротравмирования слизистой эндометрия (А.с. СССР на изобретение «Устройство для трансплантации эмбрионов» №1796171, 1993 г.).

Проведение пересадки этим инструментом не требует высокой квалификации исполнителя и длительного практического опыта. Достаточно профессиональных навыков техника по искусственному осеменению. Влияние конструктивных особенностей модифицированного инструмента для глубокой аппликации на эффективность пересадки можно видеть из нижеприведенного эксперимента.

Сравнительные результаты, полученные после пересадки эмбрионов катетером Кассу и инструментом новой модификации, подтверждают существующее мнение о более высоком уровне стельности при аппликации эмбрионов в верхушку рога матки (Таблица 4).

Таблица 4. Приживляемость эмбрионов в зависимости от места локализации в матке реципиента

Состояние эмбрионов	Катетер	Место в роге матки	Показатели		
			Пересадок	Стедьн.	%
Свежие	Кассу	Середина	661	343	51,9
	Новый	Верхушка	70	50	71,4***
Деконсервиров.	Кассу	Середина	603	274	45,4
	Новый	Верхушка	108	64	59,2**

Примечание: ** $P < 0,01$ *** $P < 0,001$

Так, при пересадке свежеизвлеченных эмбрионов в верхушку рога матки новым инструментом удалось достичь уровня приживляемости 71,4% (пересадок/стельных – 70/50), что было выше на 19,5% по сравнению с пересадкой в середину рога катетером Кассу – 51,9% (661/343) при высоком уровне достоверности ($P < 0,001$). Сходная тенденция сохранялась при пересадке деконсервированных эмбрионов – разница в уровне стельности составила 13,8% в пользу пересадки новым инструментом против катетера Кассу – 59,2% (108/64) против 45,4% (603/274) соответственно при уровне достоверности $P < 0,01$ [3, 4]. По мнению ряда авторов, высокий показатель результативности приживляемости эмбрионов непосредственно связан с местом аппликации эмбриона и элиминации травматизма эндометрия матки [56, 57, 81].

Близкие по значению результаты были получены в исследованиях других авторов при использовании инструмента собственной конструкции, позволяющей проводить глубокую аппликацию эмбрионов (патент РФ на полезную модель «Устройство для аппликации эмбрионов крс» №154919, 2015 г.). Уровень стельности при пересадке эмбрионов новым инструментом в верхушку рога составил: свежими – 68,2% (пересадок/стельных – 41/28), заморожено-оттаянными – 58,1% (43/25). Аналогичные показатели при пересадке в середину рога катетером Кассу были заметно ниже: свежими – 44,3% (97/43); заморожено-оттаянными – 36,3% (113/41) [24].

Таким образом, становится очевидным, что место аппликации эмбрионов в верхушку рога матки имеет преимущество по сравнению с пересадкой в середину рога.

Особое значение в репродуктивных биотехнологиях отводится технике глубокого замораживания эмбрионов. Ее использование позволяет неограниченное время сохранять ценные генетические ресурсы в виде замороженных эмбрионов, а также обходиться без содержания больших групп реципиентов, пересадки могут проводиться в сроки, независимые от сроков вымывания эмбрионов от доноров, что положительно влияет на логистику и рентабельность производства. Давно доказанным считается, что криоконсервация оказывает отрицательное влияние на жизнеспособность

деконсервированных эмбрионов [58, 42]. Их приживляемость находится на более низком уровне, по сравнению со свежеизвлеченными эмбрионами. Сегодня выживаемость деконсервированных эмбрионов превышает 90%, а уровень приживляемости после пересадки достигает 50-55% [1, 16, 38]. Однако, это далеко не предел. При сегодняшнем уровне развития методов крио- и деконсервации эмбрионов, а также учете ряда других факторов, возможно получение равноценных результатов приживляемости при пересадке заморожено-оттаянных и свежеизвлеченных эмбрионов. Из разных источников в рамках одной программы от пересадки отличных эмбрионов стельность составляла 76 % для свежеполученных и 64 % для замороженных. Аналогичные результаты были получены в Нидерландах: 77,8 % свежих эмбрионов и 66,6 % замороженных эмбрионов привели к стельности [73, 50].

При трансплантации свежеполученных и деконсервированных эмбрионов могут быть получены как схожие, так и диаметрально противоположные результаты, связанные с рядом технологических и физиологических факторов.

В частности, качество и породная принадлежность эмбрионов, связанная с фертильностью доноров, а также фертильность реципиентов, позволяют повысить приживляемость деконсервированных эмбрионов до уровня, сопоставимого с пересадкой свежеполученных эмбрионов. По статистике две трети эмбрионов, полученных *in vivo*, имеет коэффициент беременности 55–70 % [43]. При этом на приживляемость эмбрионов прямое влияние оказывает качество эмбрионов. Так, в исследованиях Голубец Л.В., Дешко А.С. и др. в 2019-2023 годах в ОАО «Гастелловское» Минского района приживляемость отличных эмбрионов составила 58,0%, тогда как при пересадке удовлетворительных эмбрионов этот показатель был ниже на 18,4%.

В наших исследованиях при изучении зависимости приживляемости от качества эмбрионов были получены следующие результаты. В 1998 году в Брестском областном центре биотехнологии ООО «Литвиново» Республики Беларусь на большой выборке уровень стельности составил 54,4%: из 913 реципиентов стельность установили у 497 животных [1]. В то же время, в 2012 г. в ОАО «Ваганово» Кемеровской области после эксперимента по внутривидовой пересадке свежеизвлеченных эмбрионов уровень приживляемости был на 11,0% выше и составил 65,4%: из 26 телок-реципиентов стельность была получена у 17 голов. Полученные результаты отражены в таблице 5.

Таблица 5. Средний уровень приживляемости свежих эмбрионов разной категории качества

Показатели	Результаты	
	ООО «Литвиново»	ОАО «Ваганово»
Количество реципиентов	913	26
Пересажено свежих эмбрионов	913	26
Стельных реципиентов	497	17
Приживляемость эмбрионов, %	54,4	65,4

В данном случае заметная разница в полученных результатах объясняется качеством эмбрионов. В ОАО «Ваганово» на небольшом объеме пересадок использовались эмбрионы только отличного и хорошего качества, без видимых морфологических нарушений. В то же время, при прочих равных условиях в ООО «Литвиново», где работа велась поэтапно на протяжении ряда лет с использованием большого количества реципиентов, для пересадки использовались эмбрионы разной категории качества, в том числе удовлетворительные и условно пригодные с более низким потенциалом к имплантации.

В ряде экспериментов изучалось влияние репродуктивных качеств, фертильности реципиентов и доноров эмбрионов на эффективность трансплантации деконсервированных эмбрионов. Так, в 2017-18 годах в ПЗ АО «Абабковское» Нижегородский области и КФХ «Бату Плюс» Республики Калмыкия нами были проведены исследования по межпородной пересадке деконсервированных эмбрионов красногорбатовской мясомолочной и абердин-ангусской пород телкам-реципиентам калмыцкой мясной породы [7, 10]. Уровень приживляемости красногорбатовских эмбрионов составил 62,4% (из 117 реципиентов стельность установили у 73 животных). Высокие результаты были получены также при пересадке абердин-ангусских эмбрионов: 65,6% стельности (40 стельных из 61 реципиентов). В обоих случаях уровень стельности не уступал пересадке свежеизвлеченных эмбрионов (Таблица 6). При этом высока вероятность, что помимо других факторов (свойства используемого криопротектора для не прямой пересадки, оценка качества эмбрионов после деконсервации и точность фиксации охоты у реципиентов), большое значение имеет также породная фертильность доноров эмбрионов и реципиентов. В нашем контексте высокой фертильностью отличались красная горбатовская (доноры) и калмыцкая (реципиенты) породы [10].

Таблица 6. Эффективность межпородной пересадки деконсервированных эмбрионов красной горбатовской и абердин-ангусской пород

Показатели	Результаты	
	Красная горб.	Ангусская
Проведено пересадок	117	61
Пересажено деконсервированных эмбрионов	117	61
Стельных реципиентов, n – %	73 – 62,4	40 – 65,6

При нехирургическом переносе деконсервированных эмбрионов реципиентам большое значение имеет техника выполнения непосредственно процедуры пересадки. В настоящее время для этой цели у крупного рогатого скота используют прямой и не прямой методы, которые в техническом исполнении отличий не имеют. Однако имеют ряд отличий, в частности в способах подготовки эмбрионов к пересадке, возможности выявления половой охоты реципиентов, разнице в используемых криопротекторах и методах деконсервации, что в совокупности определяет уровень их эффективности.

Главным преимуществом не прямой пересадки является более высокий уровень приживляемости деконсервированных эмбрионов по сравнению с прямой пересадкой, что, главным образом, связано с процедурами крио- и деконсервации эмбрионов для пересадки и точностью фиксации половой охоты у реципиентов.

В настоящее время при криоконсервации эмбрионов в качестве веществ криопротектантов наибольшее распространение получили глицерин и этиленгликоль.

Для не прямой пересадки в качестве криопротектора применяют глицерин, менее токсичный для эмбрионов, по сравнению с этиленгликолем [8, 16, 30, 38]. Это позволяет увеличить время манипуляций с эмбрионами в процессе криоконсервации с минимальным риском снижения их жизнеспособности (при использовании этиленгликоля время ограничено 10 минутами). При деконсервации сразу после оттаивания следует процедура эквilibрации эмбрионов для выведения глицерина с последующей морфологической оценкой состояния эмбрионов на наличие криоповреждений зоны пеллюцида и зародышевого комплекса. Таким образом, при не прямой пересадке исключается вероятность переноса критически поврежденных эмбрионов. Время на выполнение непосредственно процедуры пересадки не имеет строгого лимита, поскольку эмбрион при

отсутствии токсичного воздействия криопротектора способен дольше сохранять жизнеспособность.

При непрямах пересадках (ограниченное количество реципиентов) облегчен отбор животных в охоте, что позволяет более точно синхронизировать стадию полового цикла реципиентов со стадией развития эмбрионов для повышения уровня их приживляемости.

Сравнительные исследования по непрямой и прямой пересадкам деконсервированных эмбрионов в ООО «Литвиново» Республики Беларусь показали зависимость стельности реципиентов от точности синхронизации половых циклов доноров и реципиентов с фиксированной охотой и определения жизнеспособности эмбрионов после оттаивания. Так, уровень стельности при непрямой пересадке с фиксированной охотой был на 9,1% выше по сравнению с прямой пересадкой без оценки качества эмбрионов и фиксации охоты реципиентов, и составил 54,3% против 45,2% соответственно [1]. Результаты, полученные тремя годами ранее в 1995 г. после непрямок пересадок на большой выборке, также показали более высокую приживляемость по сравнению с прямой пересадкой: 50,7% против 45,2%. Из 258 пересаженных эмбрионов успешно прижился 131 [9] (Таблица 7).

Таблица 7. Результаты пересадки заморожено-оттаянных эмбрионов

Группы эмбрионов	Фиксация охоты	Показатели		
		Пересадок	Стельных	%
Деконсервированные	Есть	81	44	54,3
Деконсервированные	Есть	258	131	50,7
Деконсервированные	Нет	62	28	45,2

В исследованиях в КФХ «Бату Плюс», расположенного в Калмыкии, в результате непрямой пересадки деконсервированных эмбрионов с оценкой сохранности после криоконсервации в глицерине телкам калмыцкой породы, отличающимся высокой фертильностью, уровень приживляемости был сравним с пересадкой свежеполученных эмбрионов: стельность установили у 40 животных из 61, что составило 65,6% [10] (Таблица 8).

Таблица 8. Приживляемость деконсервированных эмбрионов в зависимости от криопротектора, фиксированной охоты и фертильности реципиентов

Показатели	Результат
Проведено пересадок	61
Пересажено заморожено-оттаянных эмбрионов	61
Стельных реципиентов, n – %	40 – 65,6

Таким образом, результативность трансплантации заморожено-оттаянных эмбрионов может быть существенно повышена при комплексном учете положительных для успешной имплантации факторов.

Недостатком метода непрямой пересадки является трудность единовременного проведения массовых пересадок. Это связано с затратами времени на проведение процедур по выведению криопротектора и морфологической оценке состояния эмбрионов после деконсервации. Однако, как следует из вышеизложенного, более высокий уровень стельности реципиентов, в частности, связанный с оценкой жизнеспособности эмбрионов после деконсервации, может компенсировать этот недостаток.

Главным преимуществом прямой пересадки является возможность единовременного проведения массовых пересадок. После оттаивания эквивилибация эмбрионов для выведения криопротектора не проводится. Поэтому пересадка осуществляется путем

прямого переноса эмбриона из оттаянной пайеты непосредственно в матку реципиента. Это сокращает затраты времени на манипуляции с эмбрионами, что и обеспечивает возможность единовременной пересадки большого числа эмбрионов.

Специалистами ООО «Бетагран-Липецк» в 2016 г. в Республике Башкортостан в результате прямых пересадок без оценки качества эмбрионов после оттаивания результаты стельности составили 35,8%: из 95 реципиентов стельность установили у 34 голов. Этими же специалистами в АПК «ПЗ за мир и труд» Краснодарского края телкам-реципиентам провели прямые и не прямые пересадки (Таблица 9). Полученный результат прямых пересадок составил 39,4% стельности, что также не является показательным. В то же время не прямые пересадки с оценкой качества эмбрионов после оттаивания показали очень высокую эффективность в 71,4% [11].

Таблица 9. Эффективность прямой и не прямой пересадок деконсервированных эмбрионов у телок-реципиентов

Показатели	Краснодарский край	Башкортостан
Прямые пересадки, гол.	94	95
Из них стельных, гол. – %	37 – 39,4	34 – 35,8
Не прямые пересадки, гол.	35	-
Из них стельных, гол. – %	25 – 71,4	-

Близки по значению результаты, полученные в 2018 г. группой других исследователей в ООО «Кубанский МТК» Краснодарского края после прямой пересадки коровам-реципиентам без точной фиксации половой охоты [18]. Одной группе реципиентов пересадки проводили летом в период теплового стресса с результатом в 36,8% стельности, второй группе пересаживали эмбрионы в весенне-летний период с уровнем стельности в 41,2% (Таблица 10). В обоих случаях эффективность пересадок была относительно невысокой. Несмотря на присутствие негативного температурного фактора в первом случае и его отсутствие во втором случае, он существенного влияния не оказал. Таким образом, имеет место общая тенденция снижения приживляемости эмбрионов при прямой пересадке.

Таблица 10. Эффективность прямой пересадки деконсервированных эмбрионов коровам-реципиентам

Показатели	Период теплового стресса	Комфортный сезон
Количество эмбриопересадок	690	165
Количество стельных	254	68
Уровень стельности, %	36,8	41,2

При криоконсервации эмбрионов для прямой пересадки в качестве криопротектора используется этиленгликоль, более токсичный для эмбрионов по сравнению с глицерином. Во избежание риска снижения жизнеспособности эмбрионов время при манипуляциях с ними в процедурах, предшествующих криоконсервации, ограничено 10 минутами [22, 23]. После оттаивания по этой же причине эквilibрация эмбрионов по выведению криопротектора не проводится, пайета без оценки качества эмбриона сразу заряжается в катетер для прямого переноса реципиенту. Поскольку контроль жизнеспособности эмбрионов отсутствует, не исключен риск пересадки эмбрионов, потерявших жизнеспособность. Из-за токсичности этиленгликоля время от оттаивания до собственно пересадки также ограничено 10 минутами.

К недостаткам прямого метода при массовых пересадках можно отнести также лимит времени на выполнения процедуры пересадки, что связано с временными рамками протокола синхронизации. После синхронизации животные приходят в охоту в течение 24-120 часов, основная масса через 48-72 часа. По прогнозируемой охоте искусственное осеменение проводится через 60-72 часа, когда в охоту приходит около 70% животных [15, 37, 41]. Поэтому ошибка в сроках осеменения составляет 30% и более, что ограничивает эффективность турового осеменения до 45-50%, что нами рассматривалось выше. Однако пересадка эмбрионов в этих пределах, о чем говорилось выше, в отличие от искусственного осеменения, приводит к ошибке в совпадении стадии полового цикла реципиента со стадией развития эмбриона в недопустимых пределах ($\pm$ 12 часов). Поэтому для достижения приемлемых результатов пересадки эмбрионов необходим строгий учет времени прихода реципиентов в охоту, что затруднительно при большом количестве животных при туровой пересадке. Это может быть осуществлено при использовании системы Heatime, автоматизированного выявления охоты у коров с точностью до 97% [12]. Но и в этом случае из числа животных, пришедших в охоту в разные сроки, необходимо формировать группы реципиентов с привязкой времени проявления охоты к стадии развития эмбрионов.

Заключение. При анализе результатов собственных исследований и данных других авторов определен комплекс факторов, оказывающих влияние на эффективность нехирургической трансплантации эмбрионов.

Проведена сравнительная оценка эффективности использования в качестве реципиентов коров и телок случного возраста. Установлено, что приживляемость эмбрионов у коров показывает более низкие результаты, чем у телок. При пересадке деконсервированных эмбрионов на большой выборке коров-реципиентов средний уровень стельности составлял 38,8%, тогда как у телок – 48,0%. Исходя из экономической целесообразности, коров в качестве реципиентов следует использовать лишь в случае недостатка реципиентов-телок.

Фиксация половой охоты при подготовке реципиентов является обязательным условием. В практике пересадки эмбрионов успешная имплантация зависит от синхронности стадий эстральных циклов доноров и реципиентов. Так, при прямой пересадке деконсервированных эмбрионов с допуском ошибки в совпадении стадии полового цикла реципиентов с возрастом эмбрионов стельность составляет 35,8-42,8%. В то же время, учет этих показателей позволяет повысить этот уровень до 45,2-65,6%.

Подтверждено, что при техническом выполнении процедуры пересадки оптимальным местом для имплантации эмбрионов является верхушка рога матки. Но для катетеров Кассу доступная глубина аппликации является ограничивающим фактором высокой приживляемости эмбрионов. Сложность выполнения процедуры переноса эмбрионов требует высокой квалификации – у опытного специалиста уровень стельности составляет 58%, у новичка – 35%. Доказано, что сложные манипуляции при проведении катетера в верхушку рога матки могут быть упрощены при использовании разработанных инструментов для глубокой аппликации. Так, использование для пересадки инструментов двух модификаций позволило повысить уровень приживляемости свежих эмбрионов до 71,4 и 68,2% и деконсервированных – до 59,2 и 58,1%.

Налаживание производства инструментов для глубокой аппликации эмбрионов позволит существенно повысить уровень рентабельности действующих лабораторий ВРТ.

Установлено, что уровень приживляемости и жизнеспособность эмбрионов имеют прямую связь с фертильностью пород животных в системе «донор-эмбрион-реципиент-потомок». Эксперименты по межпородной трансплантации деконсервированных эмбрионов показывают, что при высокой фертильности пород, используемых в программе пересадок,

результат приживляемости эмбрионов может быть сопоставим с пересадкой свежеизвлеченных эмбрионов. В исследованиях по пересадке деконсервированных эмбрионов красной горбатовской породы реципиентам калмыцкой породы этот показатель составлял 62,4%. Пересадка деконсервированных абердин-ангусских эмбрионов реципиентам калмыцкой породы позволила достичь уровня приживляемости 65,6%. Красная горбатовская и калмыцкая породы, участвовавшие в экспериментах, отличаются высокими репродуктивными качествами. В сравнительном аспекте при внутривидовой пересадке деконсервированных эмбрионов голштинской породы, отличающейся невысокой фертильностью, уровень приживляемости был заметно ниже и составлял 54,4%.

Таким образом, в программе пересадок эмбрионов положительным фактором следует считать породную фертильность коров-доноров – матерей эмбрионов и фертильность животных-реципиентов.

В настоящее время при пересадке деконсервированных эмбрионов используют прямой и непрямой методы. Общеизвестный непрямой метод включает пересадку эмбрионов после оценки качества и сохранности после оттаивания. При использовании прямого метода перенос эмбрионов осуществляется без оценки их жизнеспособности. Сравнительный анализ эффективности практического применения двух методов показывает следующие результаты. Пересадка эмбрионов непрямым методом позволяет получать от 45,4 до 65,6% стельности, тогда как при использовании прямого метода уровень стельности снижается до 35,8-42,8%.

Анализ многочисленных исследований показал, что при комплексном учете максимально возможного количества факторов разной степени влияния на успешную имплантацию эмбрионов, возрастает вероятность получения высоких результатов при использовании на практике репродуктивных технологий в системе «донор-эмбрион-реципиент-потомок».

Литература

1. Бабенков, В. Ю. Биотехнологические методы интенсификации воспроизводства молочного и мясного скота: Дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.23. ВИЖ. – Дубровицы, 2004. – 234 с.
2. Бабенкова Л.В., Попов Д.В., Кысса И.С. Получение монозиготных близнецов КРС методом микрохирургии доимплантационных эмбрионов. // Журнал «Аграрное Обозрение», №2(08), 2010.
3. Бабенков В.Ю., Семечко А.П. Эффективность трансцервикальной пересадки эмбрионов с помощью нового инструмента. // Биотехнология и воспроизводство в животноводстве: тез. докл. науч.-практ. конф. – Горки, 1991. – С. 6-8.
4. Бабенков В.Ю. Инструмент нового типа для нехирургической трансплантации эмбрионов. // Генетико-селекционные и технологические проблемы разведения сельскохозяйственных животных: Тез. докл. науч.-практ. конф. – Киев, 1994. – С. 73-74.
5. Бабенков В.Ю., Жук Н.Ф., Черневский Н.А. Пересадка эмбрионов крупного рогатого скота как биотехнический метод борьбы с бесплодием. // Интенсификация производства продуктов животноводства: Матер. междуна. науч.-произв. конф. – Жодино, 2002. – С. 8.
6. Бабенков В.Ю. Опыт использования трансплантации эмбрионов как биотехнического метода борьбы с бесплодием высокопродуктивных коров. // Ветеринарная медицина Беларуси. – 2003. – № 3. – С. 30-31.
7. Vladimir Babenkov , Nadezhda Chimidova , Altana Ubushieva , Arslang Khakhlinov , Victor Onkaev , and Roman Sangadje. Modern Developments in Biotechnology Embryotransfer of the Kalmyk Meat Breed INTERAGROMASH 2023: XVI International Scientific Conference “INTERAGROMASH 2023”
8. Бабенков В.Ю., Кысса И.С. Использование этиленгликоля при замораживании эмбрионов. // Новые методы селекции и разведения высокопродуктивных пород и типов животных: Матер. науч.-практ. конф. – Киев, 1996. – С. 304.
9. Бабенков В.Ю. Использование трансплантации эмбрионов в воспроизводстве крупного рогатого скота Брестской области / Зоотехнич. наука Беларуси, 2000. – т.34. – С. 62-67.
10. В.Ю. Бабенков, Н.В. Чимидова, А.И. Хахлинов, А.В. Убушиева, В.И. Манжиев Роль репродуктивных биотехнологий в воспроизводстве и сохранении генофонда редких и исчезающих пород крупного рогатого скота // Животноводство и кормопроизводство. 2023. Т. 106, № 1. С. 67-76.

11. Бабенков В.Ю., Хромов Н.И., Машталер Д.В., Хромова В.В. Вспомогательные репродуктивные технологии в воспроизводстве и селекции КРС// Журнал «ФЕРМЕР. Черноземье». 2017. Источник: www.vfermer.ru.
12. Богдан А.Н. Синхронизация охоты у коров – схемы, рекомендации, причины неудач. Ветеринария/Зоотехния. 2022
13. Бугров А.Д. Совершенствование технологии трансплантации эмбрионов. // Зоотехния. – 1989. – №11. – С. 50-52.
14. Бугров А.Д., Невинный Н.А. Приживляемость эмбрионов в зависимости от качества желтого тела реципиента. // Трансплантация эмбрионов крупного рогатого скота: Тез. докл. – Жодино, 1989. – С. 101-102.
15. Вильсон В., Зуев Н. Синхронизация охоты у коров и телок. // Животноводство. – 1984. – №5. – С. 40-41.
16. Гавриков А., Маслев Ц., Алексеенко А., Карадочев М. Некоторые аспекты замораживания и оттаивания эмбрионов крупного рогатого скота. // Животн. науки. – София, 1989. – 26. – № 8. – С. 66-69.
17. Гавриченко Н. Синхронизация половой охоты. 2014. Имя файла: Синхронизация половой охоты.doc
18. Дуванов А.В. и Хромов Н.И. Применение технологии трансплантации эмбрионов для повышения оплодотворяемости коров голштинской породы в период теплового стресса. ООО «Кубанский молочно-товарный комплекс», Краснодарский край. 2020. Источник: Dairy News. today <https://dairynews.today/news/primenenie-tekhnologii-transplantatsii-embriionov-d.html>
19. Дуванов А.В. Трансплантация сексированных эмбрионов и ее преимущество. 2022. DairyNews.ru <https://dairynews.ru/news/primenenie-tekhnologii-transplantatsii-embriionov-d.html>
20. Завертяев Б.П. Биотехнология в воспроизводстве крупного рогатого скота. – Л.: Агропромиздат 1989. – 98 с.
21. Завертяев Б.П. Биотехнология в воспроизводстве и селекции крупного рогатого скота. – Ленинград, 1989. – 255 с.
22. Инструкция по трансплантации эмбрионов крупного рогатого скота. – М., 1984. – 136 с.
23. Инструкция по трансплантации эмбрионов крупного рогатого скота. /Росагропром СССР, ВАСХНИЛ – М., 1987. – 92 с.
24. Косовский Г.Ю., Попов А.В., Бригида А.В. «Сравнительная оценка результатов трансплантации эмбрионов крупного рогатого скота в зависимости от места их локализации в роге матки реципиента. Журнал «Ветеринария Кубани», №3, 2016
25. Кысса И.С., Бабенков В.Ю., Сивая Н.Н., Бабенкова Л.В., Радкевич В.В., Пронько А.Ф. Сравнение эффективности трансплантации эмбрионов различного происхождения. // Матер. междунауч.-практ. конф. "Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства". – Горки, 1996. – С. 184-185.
26. Кысса И.С., Бабенков В.Ю., Бабенкова Л.В., Лушинская Н.Н., Радкевич В.В., Рошлау К., Вестфаль Я. Эффективность трансплантации различных групп эмбрионов. // Матер. междунауч.-произв. конф. "Конкурентоспособное производство продукции животноводства в Республике Беларусь", Жодино, 1998. – С. 93-94.
27. Мадисон В.В., Мадисон В.Л. Трансплантация эмбрионов в практике разведения молочного скота. – М: ВО "Агропромиздат". – 1988. – 128 с
28. Макаров А.В. Синхронизация половой охоты у коров и телок с помощью гормональных препаратов / А.В.Макаров, И.В.Шадрин. – Красноярск: рекламно-издательский центр «Типография РИЦ», 2020.
29. Методические рекомендации по хирургическому извлечению и пересадке эмбрионов крупного рогатого скота. Н.И.Сергеев, А.В.Овчинников, А.А.Некрасов, Н.И.Смылова. – Дубровицы, 1983. – 23 с.
30. Нетеча В.И., Плаксеев А.А., Мазепкин С.А. Влияние некоторых факторов на приживляемость замороженно-оттаянных эмбрионов при нехирургической пересадке. // Бюл. науч. работ, ВИЖ. – Дубровицы, 1987. – вып. 87. – С. 44-46.
31. Овчинников А.В. Результаты нехирургической трансплантации эмбрионов у крупного рогатого скота. // Трансплантация эмбрионов в молочном скотоводстве и овцеводстве, ВИЖ. – Дубровицы, 1985. – С. 25-28.
32. Панкратова А.В., Косовский Г.Ю., Насибов Ш.Н. Синхронизация охоты коров в молочном скотоводстве. Ветеринарная патология, №2. 2016
33. Прокофьев М.И., Белевич В.П., Рябых В.П. Технология нехирургической трансплантации эмбрионов крупного рогатого скота. // Животноводство. – 1980. – № 2. – С. 50-54.

34. Сергеев Н.И. Факторы, определяющие эффективность нехирургической пересадки эмбрионов крупного рогатого скота. / Бюл. науч. работ ВИЖ. – Дубровицы, 1987. – вып. 87. – С. 34-37.
35. Сергеев Н.И., Амарбаев А. Трансплантация эмбрионов крупного рогатого скота. – Алма-Ата, Кайнар – 1987. – 158 с.
36. Сергеев Н.И., Гавриков А.М. Симпозиум по трансплантации. // Животноводство. – 1986. – № 4. – С. 62.
37. Сергеев Н.И., Овчинников А.В., Смылова Н.И. Взаимодействие между донором, эмбрионом и реципиентом при нехирургической трансплантации. // Животноводство. – 1987. – № 6. – С. 52-54.
38. Смылова Н.И., Бушманов В. Влияние некоторых факторов на жизнеспособность заморожено-оттаянных эмбрионов. / Бюл. научн. работ. ВИЖ. –Дубровицы,1988. – вып.104. – № 89. – С. 26-28.
39. Хон Ф. Синхронизация охоты у телок при переходе от естественной случки к искусственному осеменению / Ф. Хон, Т. Лещук, А. Шалимов [и др.] // Главный зоотехник. – 2016. – № 12. – С. 3–7.
40. Шадрин С.В. Повышение воспроизводства стада крупного рогатого скота путем гормональной регуляции половых циклов / С.В. Шадрин, А.В. Макаров, И.В. Шадрин. – Красноярск: Рекламно-издательский центр «Типография РИЦ», 2018].
41. Эрнст Л.К., Сергеев Н.И. Трансплантация эмбрионов сельскохозяйственных животных. – М.: Агропромиздат. – 1989. – 302 с. Anim. Prod. Assoc. I. – 1976. – V. 11. – P. 115.
42. Almiñana, C. What is new in the cryopreservation of embryos? / C. Almiñana, C. Cuello. // Anim. Reprod., v.12, n.3, Jul./Sept. 2015. – P.418- 427.
43. Arega, H. Review on Growth and Development of Multiple Ovulation and Embryo Transfer Technology in Cattle / H. Arega // World Sci. news. – 2019. – Vol. 127, № 3. – P. 191–211.
44. Brand A., Drost M., Aarts M.H. and Gunnink J.E. A device for non-surgical transfer in bovine embryos and its effect on uterine contamination. // Theriogenology. – 1976. – V. 6 (15). – P. 509-514.
45. Brand A., Taverne M.A.M. et all. Non-surgical embryo transfer in cattle. Myometrial activity as a possible cause of embryo expulsion. // Proc. Seminar on Egg Transfer in Cattle (Camb.). – 1976, p.41-56. – E.E.C. Publ.
46. Brand A., Aarts M.H., Zaayer D., Oxender W.D. Recovery and Transfer of embryos by non-surgical procedures in lactating dairy cattle. / In: Control of Reprod. in the Cow. (Galway,Sreenan J.Ed.). – C.E.C. Luxembourg, 1978.
47. Critser J.K., Rowe R.F., Del Campo V.R., Ginther O.J. Embryo transfer in cattie: Factors affecting superovulatory response, number of transferable embryos and length of pastreatment estroys cycle. // Theriogenology. – 1980. – V. 13. – P. 397-406.
48. Erb, R.E. Profile of reproductive hormones associated with fertile and non – fertile inseminations of dairy cattle / Erb R.E. // Theriog. – 2003. – vol. 5. – P.227-242.
49. Factors in cattle affecting embryo transfer pregnancies in recipient animals Авторы: Roper, David A.; Schrick, F. Neal; Edwards, J. Lannett; с соавторами. Animal Reproduction Science Том – 199. – С. 79-83 Опубликовано: Dec. 2018.
50. Hasler, J. F. Bovine Embryo Transfer: Are Efficiencies Improving? / J. F. 125 Hasler // Appl. Reprod. Strateg. Beef Cattle. – 2012. – № 5-6. – P. 363–376
51. Hasler, J.F. Bovine embryo transfer: are efficiencies improving? / J.F. Hasler.// Bioniche Animal Health, Inc., 2011. – P. 18.
52. Hopper, R.M. Bovine Reproduction / R.M. Hopper. – USA. Wiley Blackwell, 2015. – p. – 696-733.
53. Kugonza, D. R. Factors Affecting Suitability of Surrogate Dams for Embryo Transfer in Cattle. / D. R. Kugonza, A. Kayitesi, F. Semahoro, D. Ingabire, M. Manzi, C. A. Hirwa, D. Gahakwa // Journal of Animal Science Advances, 2013. – 3 (4). p. – 203-210.
54. Laintinen, J., E., Tenhunen. Milk progesterone in finnish dairy cows: a field study on the control / J. Laintinen, E. Remes, M. Tenhunen // British. Veter. J. – 2005. – Vol. – 141, 3. – P.297 – 306.
55. Lim, H. J. Investigation of relation between the Ovulation Confirmation and Conception Rate in Dairy Cattle / H. J. Lim, H. B. Yoon // J. Embryo Transf. – 2018. – Vol. 33, № 2. – P. 55–59.
56. Lonergan P., Woods A., Fair T., Carter F., Rizos D., Ward F., Quinn K., Evans A. Effect of embryo source and recipient progesterone environment on embryo development in cattle. ReprodFertil Dev. 2007; 19(7):861-8
57. Looney CR., Nelson JS., Schneider HJ., Forrest DW. Improving fertility in beef cow recipients. Theriogenology 2006; 65:201-209.
58. López–Saucedo, J. Superovulation, in vivo embryo recovery and cryopreservation for Aoudad (Ammotragus lervia) females using osmotic pumps and vitrification: a preliminary experience and its

- implications for conservation. / J. López-Saucedo, J.P. Ramón-Ugalde, J.J. Barroso-Padilla, A.M. Gutiérrez-Gutiérrez, R. Fierro, R.E. Piña-Aguilar. // *Mongabay.com Open Access Journal – Tropical Conservation Science* Vol.6 (1): 2013. – P.149-157.
59. Macmillan, K. L. Effect of anagonist of gonadotropin-releasing hormone on ovarian follicles in cattle / K. L. Macmillan, W. W. Thatcher // *Biol Reprod.* – 2015. – Vol. 45. – P. 883–889.
60. Mapletoft, R. History and Perspectives on Bovine Embryo Transfer / R. Mapletoft // *Animal Reproduction.* – 2013. –Vol. 10, № (3). – P. 168–173.
61. Mapletoft, R. J. Innovative strategies for superovulation in cattle / R. J Mapletoft, G. A. Bó // *Anim. Reprod.* – 2013. – Vol. 10. – P. 174–179.
62. Mapletoft, R. J. Bovine Embryo Transfer./ R. J. Mapletoft. // *IVIS Reviews in Veterinary Medicine, I.V.I.S. (Ed.). International Veterinary Information Service, Ithaca NY (www.ivis.org), Last updated: 17-Nov-2006.*
63. Mapletoft, J. In vitro and in vivo embryo production in cattle superstimulated with FSH for 7 days. / J. Mapletoft, A. Garcia Guerra, 151 F.C.F. Dias, J. Singh, G.P. Adams // *Anim. Reprod.*, v.12, n.3, Jul./Sept. 2015. – p. 151-388.
64. Moore, S. G. A 100-Year Review: Reproductive technologies in dairy science/ S. G. Moore, J. F. Hasler // *Dairy Sci.* – 2017. – Vol. 100, №12. – P. 10314 – 10331.
65. Morrell, J. M. Artificial Insemination: Current and Future Trends / J. M. Morrell // *Artificial Insemination in Farm Animals.* – 2012. – Chapter 1. – P. 1–14.
66. Morrow, C. J. Artificial insemination in deer and nondomestic bovids / C. 127 J. Morrow, L. M. Penfold, B. A. Wolfe // *Theriogenology.* – 2009. – Vol.71. –P.149–165.
67. Niemann H. Der embryotransfer entwickelt sich weiter. // *Der Tiersuchter.* – 1985. – 37(11). – P. 484-485.
68. Newcomb R., Rowson L.E.A. Conception rate after uterine transfer of cow eggs in relation to synchronization of oestrus and age egg. // *Reprod. Fert.* – 1975. – V. 43. – P. 539-541.
69. Newcomb R., Christie W.R., Rowson L.E.A. Fetal survival rate after the surgical transfer of the bovine embryos. // *J. Reprod. Fert.* – 1980. – V. 59. – P. 31-36.
70. Ombelet, W. Artificial insemination history: hurdles and milestones / W. Ombelet, J. Van Robays // *Facts, Views & Vision in ObGyn.* – 2015. – Vol. 7(2). – P. 137–143.
71. Păcală, N. Possibilities to induce twin calving in cows by embryotransfer./ N. Păcală, I. Bencsik, D. Dronca, Ada Cean, V. Carabă, A. Boleman. // *Universitatea de Științe Agricole și Medicină Veterinară Iași Lucrări Științifice* – vol. 52, Seria Zootehnie, 2008. – p. 480-481.
72. Peterson A.J., Lee RSF. Improving successful pregnancies after embryo transfer. *Theriogenology* 2003; 59: 687-697.
73. Pregnancy losses in cattle: potential for improvement / M. Diskin, S. Waters, M. Parr, D. Kenny // *Reprod. Fert. Dev.* – 2016. – Vol. 28, № 1-2. – P. 83–93.
74. Rowe R.F., Critser J.K., Ginther O.I. Non-surgical embryo transfer in cattle. // *Theriogenology.* – 1979. – 11 (1). – P. 17.
75. Rowe R.F., Del Campo M.R., Eilts C.L. et al. A single cannula technique for non-surgical collection of ova from cattle. // *Theriogenology.* – 1976. – V. 6. – P. 471-483.
76. Rowson L.E.A., Moor R.N., Lawson R.A.S. Fertility following egg transfer in the cow: effect of method, medium and synchronization of oestrus. // *J. Reprod.Fert.* – 1969. – 18. – P. 517-523.
77. Schneider H.I., Castleberry R.S., Griffin J.L. Comercial aspects of bovine embryo transfer. // *Theriogenology.* – 1980. – V. 13 (17). – P. 73-85.
78. Sreenan J.M. Egg transfer in the cow: effect of site of transfer. // In: *Proc. 8 th Intern. Congr. Anim. Reprod. Artif. Insem.* – Krakow, 1976. – V. 3. – P. 269-272.
79. Sreenan J.M. Egg transfer in the effect of site of transfer. // *Jg. Grassland Anim. Prod. Assoc. I.* – 1976. – V. 11. – P. 115.
80. Tervit H.R. Culture and transfer of sheep and cattle ova. // *Ph. D. Thesis. Univ. of Cambridge,* 1973.
81. Vasconcelos, J.LM., Demetrio DGB., Santos RM., Chiari JR., Rodrigues CA., Sa FILHo OG. Factors potentially affecting fertility of lactating dairy cow recipients. *Theriogenology* 2006; 65:192-200.

УДК 612.08: [612.3:504.3]

Методы изучения газообразования в организме жвачных животных

Боголюбова Н.В., Девяткин В.А.

ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста,
Московская обл., Россия

Аннотация. Изучение газообразования в организме животных является важным разделом физиологических исследований. Методы изучения со временем претерпевали существенные изменения. Изначально целью изучения газообразования являлись фундаментальные основы энергетического обмена в организме. С развитием научно-технического прогресса и климатическими изменениями в мире прибавились экологические причины изучения выделения животными парниковых газов. Методы измерения выделения газов зависят от цели, оборудования, знаний, времени и бюджета, доступных для содействия исследователям и производителям в разработке и мониторинге. Целью данного обзора является обобщение информации о современных методах определения выделения парниковых газов в организме жвачных животных в России и мире. Методы делятся на 3 большие группы: изучение выделения газов от животных, от объектов и глобальные выбросы газов в атмосферу. Наиболее популярным методом исследований в РФ, согласно публикаций за 2022-2025 гг. на русском языке, являются лабораторные эксперименты *in vitro*, что связано с их невысокой стоимостью, доступностью и быстротой исследования большого количества вариантов за относительно короткие сроки. Не существует универсального метода количественной оценки газов от животных. Некоторые методы отличаются высокой стоимостью, необходимостью высокой квалификации сотрудников, другие – наличием сопутствующих факторов, влияющих на полученные результаты. «Золотым» стандартом исследований является использование респирационных камер. Для получения достоверных результатов целесообразно сочетание лабораторных исследований *in vitro* и на животных *in vivo*. Использование современных методов позволяет не только проводить скрининг выделений парниковых газов в организме жвачных, но и разрабатывать способы регуляции с целью снижения негативного влияния на окружающую среду и повышения экономической составляющей отраслей животноводства.

Ключевые слова: жвачные животные, газообразование, методы изучения.

Для цитирования: Боголюбова Н.В., Девяткин В.А. Роль факторов липидного питания в процессе метаногенеза у жвачных // Успехи наук о животных. 2025. № 2. С. 69—80. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.005

Methods for studying gas formation in ruminants

N.V. Bogolyubova, V.A. Devyatkin

L.K. Ernst Federal Research Center for Animal Husbandry
Moscow Region, Russia

Abstract. The study of gas formation in the animal body is an important stage of physiological research. The methods of study have undergone significant changes over time. Initially, the purpose of studying gas formation was the fundamental principles of energy metabolism in the body. With the development of scientific and technological progress and climate change in the world, environmental reasons for studying the emission of greenhouse gases by animals were added. Methods for measuring gas emission depend on the purpose, equipment, knowledge, time and budget available to assist researchers and manufacturers in development and monitoring. The purpose of this review is to summarize information on modern methods for determining greenhouse gas emissions in the body of ruminants in Russia and the world. The methods are divided into 3 large groups: the study of gas emission from animals, from objects and global gas emissions into the atmosphere. The most popular research method according to publications for 2022-2025 in Russian are *in vitro* laboratory experiments, which is due to their low cost, availability and speed of studying a large number of options in a relatively short time. There is no universal method for quantifying gases from animals. Some methods are expensive, require highly qualified staff, others have accompanying factors that affect the results. The "gold" standard of research is the use of respiration chambers. To obtain reliable results, it is advisable to combine laboratory studies *in vitro* and on animals *in vivo*. The use of modern methods allows not only to screen greenhouse gas emissions in the body of ruminants, but also to develop regulation methods in order to reduce the negative impact on the environment and increase the economic component of livestock industries.

Keywords: ruminants, gas formation, study methods.

For citation: Bogolyubova NV, Devyatkin VA. Methods for studying gas formation in ruminants. Ernst Journal of Animal Science. 2025. 1: 69—80. Russian. doi: 10.25687/3034-493X.2025.3.2.005

Интерес исследователей и ученых к изучению процесса газообразования в организме животных стал проявляться после открытия основных законов сохранения материи и энергии (М.В. Ломоносов, 1748). Жизненные функции организма животных обуславливаются постоянным обменом вдыхаемых и выдыхаемых газов. По этой причине изучение газового обмена имеет большое значение для определения уровня и направления обмена веществ и энергии в организме. Для этого важно точно определить количество потребляемого кислорода и количество выделенного углекислого газа за определенный промежуток времени. С этой целью в середине прошлого столетия в нашей стране стали активно применять респирационные исследования с использованием установок закрытого или открытого типа, а также с помощью масок [1]. Респираторный метод исследований с использованием установок закрытого типа для жвачных и моногастричных животных широко использовался и учеными отдела кормления ВИЖ. Благодаря этому методу были установлены закономерности в обмене веществ и энергии в зависимости от уровня кормления, возраста, пола животных, что позволило разработать основы нормированного кормления сельскохозяйственных животных и птиц [2]. Учеными-физиологами из ВНИИФБиП, ныне филиала ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им Л.К. Эрнста, в середине прошлого столетия была изобретена климатическая установка «Климатотрон» для коров и молодняка скота. Установка предназначалась для проведения долгосрочных экспериментов (от 2 до 10 дней) в условиях различных температур (от -5°C до $+35^{\circ}\text{C}$), влажности (35-98 %) и освещенности, что позволяло оценивать воздухообмен в организме при моделировании различных условий среды [3].

В настоящее время исследования газообразования у животных сохраняют свою научную значимость, приобретая новые аспекты в контексте современных экологических вызовов. Особую актуальность данная проблема получает в связи с глобальными климатическими изменениями [4]. Так, температура нижних слоев атмосферы за последние 40 лет повысилась на 0,8 градусов, при ожидаемом повышении до 1,5 градусов. Парниковые газы являются причиной этого явления. Опасность их заключается в том, что они надолго остаются в атмосфере и разрушают озоновый слой. Основными парниковыми газами является двуокись углерода, метан и закись азота [5]. Считается, что 60 % выбросов парниковых газов приходится на антропогенные, а 40 % на природные выбросы [6]. Среди антропогенных выбросов на долю сельского хозяйства приходится около 40 %, из них от жвачных животных выделяется более 60 %. Метан также образуется и при хранении навоза, причём уровень его выделения зависит от режимов хранения, в том числе температуры [7]. Метан – один из главных парниковых газов, в организме жвачных образуется путём жизнедеятельности метаногенных архей из водорода и углекислого газа. Этот процесс сопровождается потерями энергии (от 2 до 12 процентов, в зависимости от рациона) [7,8]. Поэтому климатическая составляющая актуальности изучения выделения газов в организме жвачных перекликается с экономическими вопросами.

Существует огромный интерес к разработке точного учета выбросов парниковых газов жвачными животными [9,10]. Все известные методы имеют разные сферы применения, преимущества и недостатки, и ни один из них не идеален во всех аспектах [11]. Методы измерения выделения газов зависят от цели, оборудования, знаний, времени и бюджета, доступных для содействия исследователям и производителям в разработке и мониторинге. Знание преимуществ и недостатков каждого метода облегчит правильную интерпретацию экспериментальных результатов [12]. Таким образом, изучение методических подходов к изучению выделения газов является актуальным, поэтому цель данного обзора заключается в обобщении информации о современных методах определения выделения парниковых газов в организме жвачных животных в России и мире.

На рисунке 1 представлена общая схема всех методов изучения газообразования у животных. Как видно из рисунка, все методы можно разделить на 3 большие группы: изучение выделения газов от животных, от объектов и глобальные выбросы газов в атмосферу. Подробнее остановимся на методах, основанных на измерении газообразования от животных.

Методы изучения выделения газов от животных. Эти методы можно разделить на прямые и косвенные. К прямым относят измерения с помощью дыхательных (респираторных камер), инертного газа и точечные методы (масочный, метод Сниффера, с применением лазера, система GreenFeed).

Респираторные (дыхательные) камеры (РК) используются для изучения энергетического метаболизма у жвачных животных уже более 100 лет [13,14]. Принцип метода РК основан на измерении концентраций газов, в частности метана, выделяемого в результате отрыжки и кишечной ферментации в образцах газа, и общего объема воздуха, удаляемого из камеры [15,16]. Использование данного метода обеспечивает точный эталонный метод, используемый в исследовательских целях, и считается «золотым стандартом» методов измерений выделения газов [17-19].



Рисунок 1. Методы измерения выбросов парниковых газов от отраслей животноводства

Существует два типа РК: замкнутого и открытого цикла [20]. Системы замкнутого цикла в наши дни почти никогда не используются [15], их заменили устройства открытого типа [21], способные обеспечивать относительно простой и точный способ измерения газообмена животных, содержащихся в них. Устройство открытого типа представляет собой герметичную камеру, в которой удерживается животное и поддерживается слегка отрицательное атмосферное давление для того, чтобы потоки газа оставались внутри, а не утекали наружу [11]. Выбросы газов рассчитываются по измеренному воздушному потоку, умноженному на разницу в концентрациях между входным и выходным воздухом [22]. В

камерах предусматривается автоматический забор проб, который в определенной периодичностью, многократно определяет концентрацию газов. Анализ газов осуществляется с помощью различных газоанализаторов, инфракрасных (ИК) фотоакустических мониторов или систем газовой хроматографии [23, 24]. Используется для одновременного исследования выбросов парниковых газов (ПГ) и производства тепла животных [25]. Размеры камер варьируются в зависимости от объекта исследований. Например, в ряде исследований камеры для взрослых особей крупного рогатого скота конструируются шириной 4,4 м, глубиной 3,7 м и высотой 3,9 м, 63,5 м³ [26]. Камеры для овец имеют общий объем 5,4 м³ (2,0 м в длину, 1,5 м в ширину и 1,8 м в высоту) и снабжены вентиляторами, установленными в диапазоне от 16 до 20 м³/ч [27]. Примерно такие же габариты используются в камерах для коз [28].

Некоторые респираторные камеры предназначены в том числе и для проведения физиологических (балансовых) опытов. Для этого внутри камеры предусматриваются приспособления для сбора фекалий и мочи в виде лотков или желобов и сепараторов, что позволяет собирать общий суточный объем фекалий и мочи в отдельные пластиковые пакеты или другие контейнеры [29, 30].

Для обеспечения точности определения камеры должны регулярно калиброваться и демонстрировать показатели восстановления газа, близкие к 100% как до, так и после каждого эксперимента [17]. К плюсам РК относится то, что они обеспечивают наиболее точные и достоверные измерения выбросов, включая метан, образующийся в результате ферментации в рубце и кишечнике. Кроме этого, с помощью камер можно отследить посуточную динамику выделения газов [30]. В описанных устройствах можно установить дополнительные детекторы влажности и температуры, что позволяет изучать влияние окружающей среды на процессы газообразования. Минусами является дороговизна в конструировании и обслуживании. Они не подходят для изучения в пастбищных условиях, ограничивают нормальное поведение и движение животных.

Метод с использованием инертного газа (гексафторида серы (SF₆)) был впервые разработан в Университете штата Вашингтон [31] и описан в 1993–1994 годах [32]. Данный метод привлек значительное внимание из-за их использования во время выпаса и выгула, поскольку позволяет осуществлять мониторинг, не ограничивая поведение животных [33]. Этот метод включает в себя введение трубки или болюса в рубец, где гексафторид серы (SF₆) или дейтерированный CH₄ (13 CH₃ D) высвобождается с известной скоростью [34]. После введения трассера животное находится на свободном выпасе. В течение этого периода выдыхаемый воздух от животного непрерывно отбирается с помощью трубки, помещенной около ноздри животного, направляемой в вакуумный цилиндр для сбора [35]. При использовании SF₆ в качестве индикаторного газа расчет скорости выделения кишечного метана проводится путем умножения установленной скорости выделения SF₆ на отношение концентраций CH₄ к SF₆, обнаруженных в собранных образцах [36]. Концентрация SF₆ и CH₄ в собранных образцах количественно определяется с помощью газовой хроматографии. Было показано, что SF₆ является идеальным индикаторным газом, поскольку его легко обнаружить, отследить при низких концентрациях и он имеет синтетическое происхождение [33].

Минусы этого метода заключаются в необходимости соответствующей квалификации сотрудников для установки оборудования, высоком риске отказа оборудования и большой трудоемкости, чем при проведении исследований в РК. Данный метод позволяет измерять газы только при отрыжке и дыхании, не затрагивая при этом выделения из прямой кишки. К положительным сторонам метода можно отнести возможность определять газы в условиях выпаса, он применим для большого количества отдельных животных, позволяет особям свободно перемещаться.

Кроме описанных прямых методов изучения газообразования существуют различные их модификации. Например, известна система переносной накопительной камеры, которая представляет собой герметичную коробку без воздушного потока. В комплект входит переносной пробоотборник воздуха и анализатор газов. В этом методе улавливаются все газы в течении 2 часов, а в конце проводится 1 измерение концентрации метана. Эта конструкция удобна своей мобильностью и возможностью использования на большом количестве голов, но является не таким точным, как РК или метод инертного газа [37].

Суть **точечных методов** исследования газообразования заключается в получении краткосрочных данных преимущественно во время кормления или доения. Такие методы обычно автоматизированы, неинвазивны, что позволяет обеспечить высокую пропускную способность животных [38]. Отрицательной стороной точечных методом является отсутствие измерений кишечных выбросов метана.

Масочный метод используется для измерения выбросов крупного рогатого скота, овец и коз [1, 39]. Существует множество простых и сложных модификаций масок, различающиеся наличием дополнительного оборудования. Описан масочный метод, который предусматривает использование аппаратуры, включающей контроллер массового расхода, блок отбора проб газа и анализатор выбросов метана, прикрепленный к каждой лицевой маске [40]. Масочный метод гораздо дешевле в применении по сравнению с ранее описанными и позволяет осуществлять замеры у большой выборки животных, но использование оборудования затрудняет доступ к пище и воде, что влияет на поведение животных.

Метод «Сниффера» заключается в пассивном измерении концентрации газов рядом с носом животного, при этом пробы воздуха отбираются в пробоотборник и автоматически анализируются с использованием инфракрасного анализатора. Как правило, это происходит во время доения или кормления животного [41]. Этот метод основан на корреляции между суточными выделениями газов и выделением с отрыжкой [30]. Метод «Сниффера» имеет преимущество в том, что он позволяет быстро и часто оценивать концентрацию метана у большого количества отдельных дойных молочных коров во время обычного доения в производственных условиях [41]. Однако, данный метод не отличается высокой точностью измерений и полученные значения отличаются большим разбросом среди животных. На точность определения влияют движения головы коровы в кормушке, различные конструкции кормушек и положения точек отбора проб, вызывая различные условия смешивания воздуха и эффекты разбавления окружающего воздуха на концентрацию газа при отрыжке [38].

Известна коммерчески доступная система количественной оценки газового потока (C-lock Inc., Rapid City, SD, USA) **GreenFeed® (GF)**, которая объединяет автоматическую систему кормления с измерениями углекислого газа и метана в воздухе от животного во время кормления животного. Отличие от предыдущего метода заключается в том, что анализируются не точечные пробы от животного, а весь выдыхаемый воздух. Метод GF основан на том, что множество краткосрочных образцов выбросов газов от отдельного животного, взятых несколько раз в течение дня, могут быть объединены для оценки среднего суточного выброса животным за определенный период времени [15]. Принципы измерения выбросов газов этой системой аналогичны принципам РК открытого цикла. Различие состоит в том, что данный способ предусматривает свободное перемещение животных, а газы измеряются только тогда, когда голова животного находится в блоке «головной камеры», что определяется датчиком [26]. Когда голова животного оказывается в колпаке системы, воздух втягивается в сборную трубу. Непрерывно измеряются концентрации газов как от животного, так и фоновые значения, пока животное принимает корм. Как правило, в данном случае используются инфракрасные анализаторы,

параллельно измеряются температура и влажность. Система оснащена автоматической приманкой, измерениями расхода воздуха и концентрации газа, устройствами связи и устройством отслеживания газа, а также датчиком положения головы. Ежедневные выбросы газов рассчитываются с использованием объемного расхода воздуха, концентраций фоновых и полученных от животного концентраций газов на момент времени [16]. Система обеспечивает сопоставимые оценки с результатами, полученными методами РК и SF 6 [44], и является более экономически эффективным методом, поскольку может применяться в условиях выпаса животных [17].

К точечным методам измерения концентрации газов от животных можно отнести различные модификации **лазерных технологий** [38]. Например, есть информация об измерении выбросов метана с помощью ручного лазерного детектора [43], при его использовании лазерный луч направляется в ноздри животному и определяется концентрация метана в выдыхаемом воздухе. Такие измерения проводятся несколько раз в день в течение нескольких смежных суток, и на основании полученных значений от каждого животного рассчитывается выделение за сутки. Фоновые значения при этом не измеряются, за них принимается минимальное определяемое значение [44,45]. Этот метод позволяет производить замеры от большого числа животных в реальном времени. Минусы метода в том, что на точность полученных значений могут оказывать влияние температура, скорость ветра, влажность, атмосферное давление.

На основе лазерных технологий разработан новый метод количественной оценки выделения газов от животных, который применяется во время их кормления и рассчитан на определение выбросов от большого числа животных, целого стада [23].

К косвенным методам относят методы *in vitro* и метод моделирования.

Основной принцип **метода *in vitro*** заключается в инкубации корма в герметичных культуральных бутылках с участием естественных микробов рубца в анаэробной среде [46], отличается легкой воспроизводимостью в лабораторных условиях и позволяет в короткий промежуток времени отработать большое количество вариантов экспериментальных рационов. Метод измерения газа широко используется для оценки переваримости кормов и моделирования ферментации кормов и кормовых продуктов в рубце [47-48]. В этом методе корма инкубируются в течение определенного периода времени (2, 4, 8, 24, 48, 72, 96 и/или 144 ч) со смесью восстанавливающего раствора, буфера и рубцовой жидкости при температуре 39 °C [46]. При этом используется свежее содержимое рубца [49]. Метод позволяет проводить столько репликаций в одной партии, сколько требуется для выявления различий между обработками, а результаты могут служить предпосылкой для оптимизации более крупных и более дорогих экспериментов *in vivo*. Однако система может имитировать только ферментацию корма в рубце. Кроме того, в нормальных условиях система не способна охватить благоприятную среду для микроорганизмов рубца в тестируемых кормах.

Моделирование является одним из альтернативных методов оценки выделения газов из организма животных [50, 51] и предполагает использование уравнений для описания и моделирования процессов образования газов в организме. Все данные, используемые в этих уравнениях, как правило, являются результатом экспериментов на животных. В ряде моделей используются данные по индивидуальным параметрам животных (вес, порода, пол) и по переваренным питательным веществам корма [52]. Их сложно получить в условиях промышленного содержания или выпаса. Известны модели на основании значений жирнокислотного состава молока [53]. Это связано с тем, что метан в основном образуется в рубце в результате ферментации компонентов корма микроорганизмами. При этом образование газа связано с синтезом специфических жирных кислот, которые переносятся в молоко и могут использоваться в качестве индикаторов

процесса. Во многих моделях используются биохимические (тип и количество субстратов) и физико-химические (pH, температура и др.) параметры рубца [54]. К сожалению, ни одна эмпирическая модель не является универсальной, зависит от географических и климатических условий, рационов кормления животных. Кроме того, используемые разные методы определения содержания валовой энергии, субстратов, метана могут накладывать отпечаток на результативность расчетов на основании модели.

Нами был проведен анализ доступных источников литературы за период 2022-2025 г.г. на русском языке по методам изучения газообразования у жвачных животных. Поиск был проведен в системе Google Scholar. Некоторые данные представлены в таблице 1. Наиболее популярным методом исследований по рассматриваемой теме является лабораторные эксперименты *in vitro*. Это связано с их невысокой стоимостью, доступностью и быстротой исследования большого количества вариантов за относительно короткие сроки. Лидирующим объектом внимания авторов по данной теме являются фитобиотики, использование которых способствует снижению метаногенеза в организме жвачных.

**Таблица 1. Методы изучения газообразования
(по анализу публикаций за 2022-2025 г.г на русском языке)**

	Год	Метод	Страна	Предмет изучения	Источник
1.	2024	РК	Россия	Фитобиотики	55
2	2022	Обзор	Россия	Фитобиотики	56
3	2024	Обзор	Россия	Фитобиотики	57
4	2022	In vitro	Россия	Фитобиотики	58
5	2024	РК	Россия	Уровень концентратов	59
6	2022	In vitro	Россия	Минеральные компоненты	60
7	2023	In vitro	Россия	Фитобиотики с минеральными компонентами	61
8	2022	Обзор	Россия	Обзор	62
9	2023	Косвенный метод (по содержанию микрофлоры)	Казахстан	Микрофлора	63
10	2022	Моделирование	Россия	Фитобиотики	64
11	2023	Моделирование	Россия	Фитобиотики	65
12	2024	Обзор	Россия	Обзор	66
13	2023	In vitro	Россия	Минеральные компоненты	67
14	2023	In vitro	Россия	Растительные масла	68
15	2023	In vitro	Россия	Фитобиотики	69
16	2024	Моделирование	Россия	Моделирование	70
17	2022	In vitro	Россия	Минеральные компоненты	71

Примечание: РК – респираторные камеры

Закключение. Изучение процесса газообразования в организме животных является важным этапом физиологических исследований и не теряет свой актуальности как с точки

зрения фундаментальных основ энергетического обмена, так и изменений климата и экономики. Проведенный нами анализ методов изучения газообразования позволил установить, что не существует универсального метода количественной оценки газов от животных. Некоторые методы отличаются высокой стоимостью, необходимостью высокой квалификации сотрудников, другие – наличием сопутствующих факторов, влияющих на полученные результаты. «Золотым» стандартом исследований является использование респирационных камер. Для получения достоверных результатов целесообразно сочетание лабораторных исследований *in vitro* и на животных *in vivo*. Использование современных методов позволяет не только проводить скрининг выделений парниковых газов в организме жвачных, но и разрабатывать способы регуляции с целью снижения негативного влияния на окружающую среду и повышения экономической составляющей отраслей животноводства. Также необходимо проведение комплексных исследований, сочетающих биохимические, клинические и респирационные исследования для разработки отечественных моделей для оценки выбросов климатически активных веществ.

Литература

1. Надаляк Е.А. Изучение газоэнергетического обмена у сельскохозяйственных животных с помощью масок и другой присоединяющейся аппаратуры/ Е.А. Надаляк, Г.Г. Карлсен // В сб.: Новые методы и модификации биохимических и физиологических исследований в животноводстве. Боровск.- 1972.- № 2.-С.121-166.
2. Томмэ М, Обмен веществ и энергии у сельскохозяйственных животных/ М. Томмэ // Исследования респирационным методом, М., 1949.
3. Методы исследований питания сельскохозяйственных животных / Под ред. Акад.РАСХН Б.Д. Кальницкого.- Боровск.- 1998.-С. 405.
4. Pachauri R. K. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / R. Pachauri, L. Meyer (eds). // Geneva, Switzerland, IPCC, 2014.
5. Islam, M. Advanced estimation and mitigation strategies: a cumulative approach to enteric methane abatement from ruminants / M. Islam, S.S. Lee // Journal of Animal Science and Technology.- 2019.- V. 61(3).-P. 122-137 doi: 10.5187/jast.2019.61.3.122.
6. Haque, M. N. Dietary manipulation: A sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants / M. N. Haque // Journal of Animal Science and Technology,- 2018.-V. 60.-P. 1–10 doi: 10.1186/s40781-018-0175-7
7. Гриднева, Т. Т. Эмиссия вредных газов при производстве животноводческой продукции / Т. Т. Гриднева // Вестник ВНИИМЖ.-2012.-V 4(8).-P. 61–69.
8. Hristov, A.N. Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options / A.N. Hristov, J. Oh, Firkins, J. Dijkstra, E. Kebreab, G. Waghorn, H. Makkar, A. Adesogan, W. Yang, C. Lee // J. Anim. Sci.- 2013.-V. 9.-P. 5045–5069. doi: 10.2527/jas.2013-6583.
9. Prajapati, P. Estimating Herd-Scale Methane Emissions from Cattle in a Feedlot Using Eddy Covariance Measurements and the Carbon Dioxide Tracer Method / P. Prajapati, E.A. Santos // J. Environ. Qual.- 2019.-V. 48.-P. 1427–1434. doi:10.2134/jeq2018.09.0332.
10. Huhtanen, P. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions/ P. Huhtanen, E.H. Cabezas-Garcia, S. Utsumi, S. Zimmerman // J. Dairy Sci.- 2015.-V. 98.-P. 3394–3409. doi:10.3168/jds.2014-9118.
11. Storm, I.M.L.D. Methods for Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants / I.M.L.D. Storm, A.L.F. Hellwing, N.I. Nielsen, J.O. Madsen // Animals.- 2012.-V. 2.-P. 160–183. doi: 10.3390/ani2020160.
12. Ramin, M. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants / M. Ramin, P. Huhtanen // J. Dairy Sci.- 2013.-V. 96.-P. 2476–2493. doi:10.3168/jds.2012-6095.

13. Armsby, H.P. The Principles of Animal Nutrition / H.P. Armsby // J. Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1903.- Available online: <http://hdl.loc.gov/loc.gdc/scd0001.00008948185> (accessed on 10 September 2020).
14. Hammond, K.J. The GreenFeed system for measurement of enteric methane emission from cattle / K.J. Hammond, G.C. Waghorn, R.S. Hegarty // Anim. Prod. Sci.- 2016.-V. 56.-P. 181–189. doi:10.1071/AN15631.
15. Brouček, J. Methods of methane measurement in ruminants // Slovak J. Anim. Sci.- 2014.-V. 47.-P. 51–60.
16. Patra, A.K. Recent Advances in Measurement and Dietary Mitigation of Enteric Methane Emissions in Ruminants // Front. Vet. Sci.- 2016.-V. 3.-P. 39. doi:10.3389/fvets.2016.00039.
17. Hristov, A. Symposium review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models / A. Hristov, E. Kebreab, M. Oh, J. Niu, A. Bannink, A. Bayat, T. Boland, A. Brito, D. Casper, L. Crompton et al.// J. Dairy Sci.- 2018.- V.101.-P. 6655–6674. doi:10.3168/jds.2017-13536.
18. McGinn, S. M., Beauchemin, T. Coates, and D. Colombatto.2004. Methane emissions from beef cattle: Effects of monensin,sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid / S. M. McGinn, K. A. Beauchemin, T. Coates, D. Colombatto // J. Anim.Sci. – 2004.- V.82.-P.3346–3356. doi:10.2527/2004.82113346x.
19. Beauchemin, K. A. Methane emissions from beef cattle: Effects of fumaric acid, essential oil, and canola oil / K. A. Beauchemin, S. M. McGinn // J. Anim. Sci.- 2006.-V.84.-P.1489–1496. doi:10.2527/2006.8461489x.
20. Wainman, F.W. Closed-Circuit Respiration Apparatus for the Cow and Steer / F.W. Wainman, K.L. Blaxter // In Proceedings of the 1st Symposium in Energy Metabolism, Principles, Methods and General Aspects, Copenhagen, Denmark, 15–19 September.- 1958.-P. 80–84.
21. Blaxter, K.L. Prediction of the amount of methane produced by ruminants / K.L. Blaxter, J.L. Clapperton // Br.J. Nutr.- 1965.-V. 19.-P. 511–522.
22. Jiao, H.P. Enteric methane emissions and efficiency of use of energy in Holstein heifers and steers at age of six months / H.P. Jiao, T.Yan, D.A. McDowell, A.F. Carson, C.P. Ferris, D.L. Easson, D. J. Wills // Anim. Sci.- 2013.-V. 91.-P. 356–362. doi: 10.2527/jas.2012-5259.
23. Goopy J.P. Comparison of Methodologies for Measuring Methane Emissions from Ruminants. In Methods for Measuring Greenhouse Gas Balances and Evaluating Mitigation Options in Smallholder Agriculture; Rosenstock, T., Rufino, M.,Butterbach-Bahl, K., Wollenberg, L., Richards, M., Eds.:/ J.P. Goopy, C.Chang, N. A. Tomkins // Springer: Cham, Switzerland.- 2016.- doi:10.1007/978-3-319-29794-1_5.
24. Hellwing, A.L.F. Technical note: Test of a low-cost and animal-friendly system for measuring methane emissions from dairy cows/ A.L.F. Hellwing, P. Lund, M.R. Weisbjerg, M. Brask, T. Hvelplund // J. Dairy Sci.- 2012.-V. 95.-P. 6077–6085. doi: 10.3168/jds.2012-5505.
25. Zhao, Y.G. Prediction of enteric methane emissions from sheep offered fresh perennial ryegrass (*Lolium perenne*) using data measured in indirect open-circuit respiration chambers / Y.G. Zhao, N.E. O'Connell, T.Yan // J. Anim. Sci.- 2016.-V. 94.-P. 2425–2435. doi: 10.2527/jas.2016-0334.
26. Alemu, A. W. Enteric methane emissions from low– and high–residual feed intake beef heifers measured using GreenFeed and respiration chamber techniques1,2/ A. W. Alemu, D. Vyas, G. Manafiazar, J. A. Basarab, & K. A. Beauchemin // Journal of Animal Science.- 2017.- V.95(8).-P. 3727–3737. doi:10.2527/jas.2017.1501.
27. Zhao, Y. G. Effects of breed, sex, and concentrate supplementation on digestibility, enteric methane emissions, and nitrogen utilization efficiency in growing lambs offered fresh grass1/ Y. G. Zhao, A. Aubry, N. E. O'Connell, R. Annett, T. Yan, // Journal of Animal Science.-2015.-V. 93(12).-P. 5764–5773. doi:10.2527/jas.2015-9515.
28. Abecia, L. Effect of bromochloromethane on methane emission, rumen fermentation pattern, milk yield, and fatty acid profile in lactating dairy goats / L. Abecia, P.G Toral, A.I. Martín-García, G.Martínez, N.W. Tomkins, E. Molina-Alcaide, C.J. Newbold, D.R. Yáñez-Ruiz // J. Dairy Sci.- 2012.- V.95.-P. 2027–2036. doi:10.3168/jds.2011-4831.
29. Pérez-Barbería, F. J. Ericaceous species reduce methane emissions in sheep and red deer: Respiration chamber measurements and predictions at the scale of European heathlands / F. J. Pérez-Barbería, R. W. Mayes, J. Giráldez, D. Sánchez-Pérez // Science of The Total Environment.-2020.-V. 714.-P/ 136738. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136738.

30. Zhao, Y., A review of enteric methane emission measurement techniques in ruminants/ Y. Zhao, X. Nan, L. Yang, S. Zheng, L. Jiang, B. Xiong // *Animals*.-2020.-V. 10(6).-P. 1004. doi:10.3390/ani10061004.
31. De Ramus, H.A. Methane emissions of beef cattle on forages: Efficiency of grazing management systems / H.A. De Ramus, T.C. Clement, D.D. Giampola, P.C. Dickison // *J. Environ. Qual.*-2003.-V. 32.-P. 269–277. doi: 10.2134/jeq2003.2690.
32. Johnson, K. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique / K. Johnson, M. Huyler, H. Westberg, B. Lamb, P. Zimmerman // *Environ. Sci. Technol.*- 1994.-V. 28.-P. 359–362.
33. Hill, J. Measuring Methane Production from Ruminants. Trends/ J. Hill, C. McSweeney, A.D.G. Wright, G. Bishop-Hurley, K. Kalantar-zadeh // *Biotechnol.*- 2016.-V. 34.-P. 26–35. doi: 10.1016/j.tibtech.2015.10.004.
34. Boadi, D.A. Methane Production from Dairy and Beef Heifers Fed Forages Differing in Nutrient Density Using the Sulphur Hexafluoride (SF₆) Tracer Gas Technique. Can / D.A. Boadi, K.M. Wittenberg // *J. Anim. Sci.* - 2011.-V. 82.-P. 201–206. doi:10.4141/A01-017.
35. Tedeschi, L.O. Quantification of Methane Emitted by Ruminants: A Review of Methods/ L.O. Tedeschi, A.L. Abdalla, C.Álvarez, S.W. Anuga, J.Arango, K.A Beauchemin, P.Becquet, A. Berndt, R. Burns, C. De Camillis // *J. Anim. Sci.*- 2022.-V. 100.- P.197. doi: 10.1093/jas/skac197.
36. Garnsworthy, P.C. Comparison of Methods to Measure Methane for Use in Genetic Evaluation of Dairy Cattle / P.C. Garnsworthy, G.F. Difford, M.J. Bell, A.R. Bayat, P.Huhtanen, B.Kuhla, J.Lassen, N.Peiren, M. Pszczola, D. Sorg et al.// *Animals*.- 2019.-V. 9.-P. 837.
37. Patra, A.K. Recent Advances in Measurement and Dietary Mitigation of Enteric Methane Emissions in Ruminants// *Front. Vet. Sci.*-2016.-V. 3.-P. 39. doi:10.3389/fvets.2016.00039.
38. Bekele, W. Contemporary methods of measuring and estimating methane emission from ruminants/ W. Bekele, A. Guinguina, A .Zegeye, A. Simachew, M. Ramin // *Methane*.-2022.-V. 1(2).-P. 82-95. 1 doi: 0.3390/methane1020008.
39. Bhatta, R.B. / R.B. Bhatta, O. Nishi, M. Kurihara Measurement of Methane Production from ruminants. Asian-Aust // *J. Anim. Sci.*- 2007.-V.20.-P. 1305–1318.
40. Oss, D.B. An evaluation of the face mask system based on short-term measurements compared withthe sulfur hexafluoride (SF₆) tracer, and respiration chamber techniques for measuring CH₄ emissions / D.B. Oss, M.I. Marcondes, F.S. Machado, L.G.R. Pereira, T.R. Tomich, G.O. Ribeiro, M.L. Chizzotti, A.L.Ferreira, M.M. Campos, R.M. Maurício, et al.// *Anim. Feed Sci. Technol.*-2016.-V. 216.-P. 49–57. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.03.008.
41. Garnsworthy, P. On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows / P. Garnsworthy, J. Craigon, J. Hernandez-Medrano, N. Saunders // *J. Dairy Sci.*- 2012.-V. 95.-P. 3166–3180. doi: 10.3168/jds.2011-4605.
42. Hammond, K. Methane Emissions from Growing Dairy Heifers Estimated Using an Automated Head Chamber (GreenFeed) Compared to Respiration Chambers or SF₆ Techniques. Adv / K. Hammond, D. Humphries, L. Crompton, P. Kirton, C. Green, C. Reynold // *Anim. Biosci.*- 2013.-V. 4.-P. 391.
43. Lanzoni, L. Assessment of seasonal variation in methane emissions of mediterranean buffaloes using a laser methane detector / L. Lanzoni, M. G. Chagunda, I. Fusaro, M. Chincarini, M. Giammarco, A. S. Atzori, G. Vignola // *Animals*.- 2022.-V.12(24).-P. 3487. doi: 10.3390/ani12243487.
44. Sorg, D. Measuring livestock CH₄ emissions with the laser methane detector: //A review *Methane*.- 2022.-V. 1.-P. 38–57. doi: 10.3390/methane1010004.
45. Pinto, A. Enteric methane emissions of dairy cattle considering breed composition, pasture management, housing conditions and feeding characteristics along a rural-urban gradient in a rising megacity / A. Pinto, T. Yin, M. Reichenbach, R. Bhatta, P.K. Malik, E. Schlecht, S. König // *Agriculture*.- 2020.-V. 10.-P. 628. doi: 10.3390/agriculture10120628.
46. Setiawan, M. A. The Balance of Rumen Degradable protein with non-fibre carbohydrate in cattle rations and its effect on total gas production, gas kinetics and methane gas production M. A./ M. A. Setiawan, U. H. Tanuwiria, A. Mushawwir// *Adv. Anim. Vet. Sci.*-2024.-V. 12(10).-P. 2000-2007. doi:10.17582/journal.aavs/2024/12.10.2000.2007.

47. Мирошников С. А. Конструкция и эксплуатация ферментера, используемого для переработки растительных отходов / С. А. Мирошников, Д. А. Проскурин, М. В. Овечкин [и др.] // Пищевая промышленность. – 2024. – № 2. – С. 27-32. – doi:10.52653/PPI.2024.2.2.005.
48. Сечнев, Ю. А. Характер ферментации питательных веществ ячменя при использовании экзоферментов / Ю. А. Сечнев, Е. В. Шейда, О. В. Кван, Я. А. Сизенцов // Животноводство и кормопроизводство. – 2024. – Т. 107, № 2. – С. 170-178. – doi:10.33284/2658-3135-107-2-170.
49. Permatasari, F. The additional effect of cinnamon leaf powder (*Cinnamomum burmanni* Ness ex. Bl) as a source of cinnamaldehyde on in vitro gas and methane production/ F. Permatasari, C. Hanim, A. Kurniawati // *Livestock Research for Rural Development*.-2024.-V. 36.
50. Peng, C. Unveiling microbial biomarkers of ruminant methane emission through machine learning / C. Peng, A. May, T. Abeel // *Frontiers in Microbiology*.- 2023.-V.14.-P. 1308363. doi:10.3389/fmicb.2023.1308363.
51. Guru, E. B., Ndung'u, P. W., Wilkes, A., Getahun, D., Graham, M. W., Leitner, S. M., ... & Arndt, C. Comparison of methodologies for estimating enteric methane emission factors from sheep in smallholder systems in Africa: // A case study from Ethiopia // *Small Ruminant Research*.-2024.-V. 240.-P. 107362. doi:10.1016/j.smallrumres.2024.107362.
52. Kebreab, E. Modeling Greenhouse Gas Emissions from Enteric Fermentation; *Advances in Agricultural Systems Modeling* / E. Kebreab, L. Tedeschi, J. Dijkstra, J.L. Ellis, A. Bannink, J. France // Wiley: New York.- 2015.-NY, USA. doi:10.2134/advagricsystmodel6.2013.0006.
53. Massaro, S. Review of equations to predict methane emissions in dairy cows from milk fatty acid profiles and their application to commercial dairy farms / S. Massaro, D. Giannuzzi, N. Amalfitano, S. Schiavon, G. Bittante, F. Tagliapietra // *Journal of Dairy Science*.- 2024.-V.107(8). – P. 5833-5852. doi: 10.3168/jds.2024-24814.
54. Selormey, G. K. Development of mathematical model for predicting methane-to-carbon dioxide proportion in anaerobic biodegradability of cattle blood and rumen content / G. K. Selormey, B. Barnes, E.A. Awafo, F. Kemausuor, L. Darkwah // *Energy Conversion and Management*.- 2022.- V.16. – 100250. doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100250.
55. Колесник, Н. С. Изучение влияния фитогеников на метанообразование в организме овец методами in vitro/ Н. С. Колесник, Н. В. Боголюбова // *Овцы, козы, шерстяное дело*.- 2024.- № (2).-С. 18-20.
56. Боголюбова, Н. В. Метанообразование в рубце и методы его снижения с использованием алиментарных факторов (обзор)/ Н. В. Боголюбова, А. А. Зеленченкова, Н. С. Колесник, П. Д. Лахонин, // *Сельскохозяйственная биология*.-2022.-Т.57.-С. 1025-1054. doi: 10.15389/agrobiology.2022.6.1025rus.
57. Колесник, Н. С. Влияние различных классов танинов на метаногенез у жвачных животных (обзор) / Н. С. Колесник, Н. В. Боголюбова, А. А. Зеленченкова // *Сельскохозяйственная биология*. – 2024. – Т. 59, № 2. – С. 221-236. – doi: 10.15389/agrobiology.2024.2.221rus.
58. Рязанов, В. А. Оценка воздействия фитобиотических препаратов *Salviae folia*, *Scutellaria baicalensis*, *Origanum vulgare* на обменные процессы в модели рубца/ В. А. Рязанов, Е. В. Шейда, Г. К. Дускаев, Ш. Г. Рахматуллин, О. В. Кван // *Аграрная наука*.-2022.-№ 1(7-8) .-С. 86-92. doi:10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-86-92.
59. Зеленченкова, А. А. Влияние концентратного типа кормления на выработку метана у овец / А. А. Зеленченкова, Н. В. Боголюбова, Н. С. Колесник, П. С. Вьючная, П. Д. Лахонин, Е. А. Гладырь // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. -2024.- № 6 (207).-С. 94-100. doi: 10.36718/1819-4036-2024-6-94-100.
60. Шейда, Е. В. Изменение параметров рубцового содержимого in vitro при использовании лузги подсолнечника и цинка в ультрадисперсной форме / Е. В. Шейда, С. А. Мирошников, Г. К. Дускаев, В. А. Рязанов, В. В. Гречкина // *Аграрная наука*.-2022.-№ (6).-С. 43-47. doi: 10.32634/0869-8155-2022-360-6-43-47.
61. Шейда Е.В. Метаболические параметры и интенсивность метанообразования в рубцовой жидкости in vitro при тестировании рационов с добавками растительных препаратов и CoCl_2 / Е.В. Шейда, В.А. Рязанов, Г.К. Дускаев // *Сельскохозяйственная биология*.- 2023.- Т. 58.- № 4.- С. 713-725. doi: 10.15389/agrobiology.2023.4.713rus.

62. Петрунина И.В. Системные меры по сокращению выбросов парниковых газов в животноводческих предприятиях. Обзор/ И.В. Петрунина, Н.А. Горбунова // Продовольственные системы. -2022.- №5(3).-С. 202-211. doi: 10.21323/2618-9771-2022-5-3-202-211.
63. Даугалиева, А. Разнообразие микробиоты кишечного содержимого крупного рогатого скота и ее влияние на выделение метана в республике Казахстан/ А. Даугалиева, С. Даугалиева, А. Ашанин, С. Канатбаев, Л.Мамырова, , З. Есембекова, Б. Ергали // Ġylım žāne bilim.-2023.-V. 1(1 (70).-Р. 87-97.
64. Короткий, В.П. Снижение метаногенеза у лактирующих коров путём введения в их рацион хвойной энергетической добавки / В. П. Короткий, В. В. Зайцев, Н. В. Боголюбова [и др.] // Зоотехния. – 2023. – № 5. – С. 9-11. – doi: 10.25708/ZT.2023.74.35.003.
65. Зайцев, В. В. Влияние хвойной энергетической добавки на метаногенез у лактирующих коров/ В. В. Зайцев, Н. В. Боголюбова, В. П. Короткий, М. С. Сеитов, Л. М. Зайцева, В. А. Рыжов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. -2023.-V. 2 (100).-Р. 250-253.
66. Малков, Н. В.Методы снижения выбросов парниковых газов, образуемых сельскохозяйственными животными / Н. В. Малков, Н. А. Политаева // In X46 Химия. Экология. Урбанистика: матер. всерос. науч.-практ. конф.(с междунар. участием), г. Пермь, 17–19 апреля 2024 г.: в 4 т./ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».– Пермь, 2024. ISBN 978-5-6049141-4-4 (р. 79).
67. Рязанов, В. А. Влияние различных доз органического марганца на метаногенез и метаболические процессы в рубце мясных бычков/ В. А. Рязанов, Б. С. Нуржанов, Г. К. Дускаев // Аграрный научный журнал.-2023.- №(1).-С. 102-108. doi: 10.28983/asj.y2023i1pp102-108.
68. Шейда, Е. В. Влияние добавок растительных масел на микробиоту рубца жвачных и течение обменных процессов в рубце в in vitro исследованиях/ Е. В. Шейда, В. А. Рязанов, Г. К. Дускаев, Ш. Г. Рахматуллин, О. В. Кван, // Аграрная наука.-2023.- №(6).-С. 58-64. doi: 10.32634/0869-8155-2023-371-6-58-64.
69. Шейда, Е. В.. Влияние *Artemisiae absinthil herba* и *Inulae rhizomata et radices* на процессы ферментации и метаногенез в рубце молодняка крупного рогатого скота/ Е. В.Шейда, В. А. Рязанов, Г. К. Дускаев, Ш. Г. Рахматуллин, О. В. Кван // Аграрная наука.-2023.-№ (3).-С. 46-51. doi: 10.32634/0869-8155-2023-368-3-46-51.
70. Вертянкина, В. Ю. Уточнение оценок выбросов метана от крупного рогатого скота в национальном кадастре антропогенных выбросов парниковых газов на территории Российской Федерации/ В. Ю. Вертянкина // Экологический мониторинг и моделирование экосистем.-2024.-V. 35(3-4).-Р. 73-87.
71. Шейда, Е. В. Адаптационные процессы в пищеварительной системе при введении ультрадисперстных частиц железа в жировые рационы крупного рогатого скота / Е. В. Шейда, С. В. Лебедев, С. А. Мирошников, В. В. Гречкина, О. В. Шошина // Сельскохозяйственная биология.-2022.- № 57(2).-С. 328-342. doi: 10.15389/agrobiology.2022.2.328rus.

№2
2025 г.

УСПЕХИ НАУК О ЖИВОТНЫХ

Сетевое научное издание

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ



КОНТАКТЫ

Ершова Анастасия Игоревна

Email: ernst_journal@vij.ru

Телефон: +7(4967)-65-11-44

Адрес редакции: 142132, Московская обл.,
г.о. Подольск, пос. Дубровицы, д. 60