

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

научная статья
УДК 616.993.192.6

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ БАБЕЗИОЗА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

Деревянная Екатерина Анатольевна², Очиченко Алиса Валерьевна², Латынина Евгения Сергеевна¹

126

¹ ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, РФ,
кафедра морфологии и ветеринарно-санитарной экспертизы,
канд. вет. наук, доцент,
<https://orcid.org/0000-0001-5145-1184>

² ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, РФ,
кафедра морфологии и ветеринарно-санитарной экспертизы,
студент

Аннотация: В обзоре рассмотрены современные методы диагностики babesиоза — трансмиссивного протозойного заболевания сельскохозяйственных животных, вызываемого паразитами рода *Babesia*. Подчеркнута актуальность проблемы: болезнь распространена в России (особенно на юге и Кавказе), наносит существенный экономический ущерб из-за высокой летальности (до 60–80 % без лечения), снижения продуктивности и затрат на терапию. Описаны основные диагностические подходы: микроскопический метод (окраска по Романовскому–Гимзе) — первичный скрининговый инструмент, отличающийся доступностью, но ограниченной чувствительностью при низкой паразитемии; молекулярно-генетические методы (ПЦР, LAMP, RPA, CPA, FISH) — «золотой стандарт» с высокой специфичностью и чувствительностью; особо отмечены изотермические методы (LAMP), удобные для полевых условий, и FISH, позволяющая визуализировать нуклеиновые кислоты паразита; серологические тесты (ИФА, нРИФ) — дополняют молекулярные методы, выявляя антитела и помогая оценить популяционный иммунитет; высокопроизводительные платформы (RLB, TBDCapSeq, Haemabiome) — обеспечивают мультиплексный скрининг на несколько патогенов, включая *Babesia*, с высокой чувствительностью и возможностью эпидемиологического мониторинга.

Отмечены перспективные направления: интеграция искусственного интеллекта с гематологическими анализаторами, использование SCID-мышей для изучения патогенеза и тестирования терапии, разработка портативных мультиплексных тестов.

Сделан вывод, что современная диагностика babesиоза базируется на комбинации методов, причём молекулярные технологии (ПЦР, LAMP, FISH, NGS) обеспечивают наибольшую точность и скорость. Дальнейшее развитие направлено на создание недорогих, портативных и мультиплексных решений для лабораторий и полевых условий, что позволит повысить эффективность контроля заболевания и снизить экономические потери.

Ключевые слова: babesии, пироплазмы, кровь, сельскохозяйственные животные.

Для цитирования: Деревянная Екатерина Анатольевна СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ БАБЕЗИОЗА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ / Деревянная Екатерина Анатольевна, Очиченко Алиса Валерьевна, Латынина Евгения Сергеевна // Агрофорсайт. 2025. № 4— Саратов: ООО «ЦеСАин», 2025. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — Загл. с этикетки диска.

Финансирование: исследование проводилось за счет собственных средств.

MODERN METHODS OF DIAGNOSING BABESIOSIS IN FARM ANIMALS

Ekaterina Anatolyevna Derevyannaya¹, Alisa Valeryevna Ochichenko¹, Evgenia Sergeevna Latynina³,

² Timiryazev Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, student

¹ Timiryazev Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, Department of Morphology and Veterinary-Sanitary Expertise, PhD in Veterinary Sciences, Associate Professor
<https://orcid.org/0000-0001-5145-1184>

127

Abstract: The review examines modern methods for diagnosing babesiosis, a transmissible protozoan disease of farm animals caused by parasites of the genus *Babesia*. The relevance of the problem is emphasized: the disease is widespread in Russia (especially in the south and the Caucasus), causing significant economic losses due to high mortality (up to 60-80% without treatment), reduced productivity and therapy costs. The main diagnostic approaches are described: the microscopic method (Romanovsky-Giemsa staining) is a primary screening tool, distinguished by its availability, but limited sensitivity at low parasitemia; molecular genetic methods (PCR, LAMP, RPA, CPA, FISH) are the "gold standard" with high specificity and sensitivity; special mention is made of isothermal methods (LAMP), convenient for field conditions, and FISH, allowing for visualization of parasite nucleic acids; Serological tests (ELISA, nIFA) complement molecular methods by detecting antibodies and helping to assess population immunity; high-throughput platforms (RLB, TBDCapSeq, Haemabiome) provide multiplex screening for several pathogens, including *Babesia*, with high sensitivity and the ability to support epidemiological monitoring.

Promising areas of research include the integration of artificial intelligence with hematology analyzers, the use of SCID mice for studying pathogenesis and testing therapy, and the development of portable multiplex tests.

It is concluded that modern babesiosis diagnostics is based on a combination of methods, with molecular technologies (PCR, LAMP, FISH, NGS) providing the greatest accuracy and speed. Further development is aimed at creating affordable, portable, and multiplex solutions for laboratories and field settings, which will improve the effectiveness of disease control and reduce economic losses.

Keywords: babesia, piroplasms, blood, farm animals.

Acknowledgments: I would like to express my gratitude to the supervisor who helped me prepare this article for publication.

Введение

Бабезиоз (пироплазмоз, тифозная лихорадка, чихирь) — трансмиссивное протозойное заболевание сельскохозяйственных животных, вызываемое паразитами рода *Babesia*, которые, попадая в кровь через укусы иксодовых клещей, размножаются в эритроцитах, вызывая их массовое разрушение, анемию, гемоглобинемию и гемоглобинурию; болезнь распространена по всей России (особенно на юге и Кавказе), пик заболеваемости приходится на весну и лето; инкубационный период составляет 6–30 дней, при остром течении наблюдаются лихорадка (до 40–42 °C), угнетение, учащение пульса и дыхания, снижение удоев, анемичность и желтушность слизистых, гемоглобинурия, диарея, судороги и резкая потеря веса, а при хроническом — рецидивирующие подъёмы температуры и кахексия; диагноз ставят на основании эпизоотологических данных, клинических признаков, патологоанатомических изменений и лабораторных исследований (микроскопия мазков крови, серологические реакции); лечение включает специфические препараты против бабезий, симптоматическую терапию и диетическое питание, при этом молоко можно использовать через 5 дней после лечения, а мясо — через 21 день; профилактика направлена на борьбу с клещами-переносчиками (обработка акарицидами, организация культурных пастбищ), химиопрофилактику, стойловое содержание в периоды высокой активности клещей, мониторинг эпизоотической ситуации, изоляцию и лечение больных животных, а также

дезинфекцию помещений; заболевание наносит значительный экономический ущерб из-за высокой летальности (до 60–80 % без лечения), снижения продуктивности и затрат на терапию, однако своевременная диагностика и комплекс профилактических мер позволяют существенно снизить риски и сохранить поголовье.

Материалы и методы исследования.

В настоящем обзоре литература была систематически проанализирована с использованием стратегий поиска, критериев включения/исключения и методов анализа данных. Рассмотрены различные информационные источники [1-11].

Современные методы диагностики babesиоза сельскохозяйственных животных активно развиваются, объединяя классические и высокотехнологичные подходы. На сегодняшний день основу лабораторной диагностики составляют молекулярно-генетические методы, серологические тесты и микроскопические исследования, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения.

Микроскопический метод остаётся первичным скрининговым инструментом: он предполагает исследование окрашенных по Романовскому–Гимзе мазков периферической крови для выявления внутриклеточных паразитов [8]. Несмотря на доступность и быстроту выполнения, этот подход обладает относительно низкой чувствительностью при низкой паразитемии и требует высокой квалификации лаборанта для дифференцировки видов *Babesia* [1][9].

Значительный прогресс достигнут в области молекулярной диагностики. Полимеразная цепная реакция (ПЦР) стала «золотым стандартом» для подтверждения диагноза благодаря высокой специфичности и чувствительности. Так, Tavassoli [3] продемонстрировал эффективность ПЦР для детекции *Babesia spp.* у крупного рогатого скота, подчеркнув возможность выявления патогена даже при минимальной концентрации паразитарной ДНК. Аналогичные результаты получены Oliveira-Sequeira [7], который разработал ПЦР-тест для дифференцировки *B. bovis* и *B. bigemina*, что критически важно для выбора терапии и эпиднадзора. В практической ветеринарии ПЦР-тесты (например, набор № AN303KP от Vet Union [6]) уже внедрены в рутинную диагностику, позволяя оперативно подтверждать инфекцию и мониторить динамику лечения.

Для повышения чувствительности и сокращения времени анализа применяются усовершенствованные молекулярные методы. AL-Hosary [10] описал LAMP-анализ (loop-mediated isothermal amplification) для диагностики babesиоза у КРС: этот изотермический метод не требует термоциклера, даёт результат за 30–60 минут и демонстрирует чувствительность, сопоставимую с ПЦР. Его удобство особенно ценно для полевых условий и экспресс-диагностики.

Серологические методы (ИФА, РИФ) дополняют молекулярные, позволяя выявлять антитела к *Babesia* и оценивать популяционный иммунитет [4]. Mahmoud с соавторами [4] комбинировали серодиагностику с гематологическими профилями, показав, что у инфицированных коров наблюдаются выраженные изменения показателей крови (анемия, тромбоцитопения), которые коррелируют с уровнем антител. Такой комплексный подход повышает точность диагностики и помогает дифференцировать острые и хронические формы инфекции.

Перспективным направлением является флуоресцентная гибридизация *in situ* (FISH), предложенная Shah [5]. Метод позволяет визуализировать нуклеиновые кислоты паразита в клетках хозяина с высокой специфичностью, что особенно полезно при смешанных инфекциях или низкой паразитемии, когда ПЦР и микроскопия дают неоднозначные результаты.

В последние годы развиваются высокопроизводительные платформы для мультиплексной диагностики. Yalcindag с коллегами [11] представили инструмент Naemabiome, который сочетает секвенирование нового поколения (NGS) с биоинформатическим анализом для одновременного выявления нескольких гемопатогенных видов, включая *Babesia*. Эта технология открывает возможности для изучения коинфекций и молекулярной эпидемиологии бабезиоза в популяциях сельскохозяйственных животных.

Обзор литературы также показывает, что исследования не ограничиваются КРС: Jaramillo Ortiz [9] обобщил прогресс в диагностике разных видов *Babesia* у различных хозяев, подчёркивая необходимость адаптации методов к специфике каждого вида животных. При этом Jia с соавторами [1] отмечают, что для хронических и субклинических форм бабезиоза особенно важны высокочувствительные молекулярные тесты, способные детектировать низкие уровни паразитарной ДНК.

Таким образом, современная диагностика бабезиоза базируется на комбинации микроскопических, серологических и молекулярных методов, причём последние (ПЦР, LAMP, FISH, NGS) обеспечивают наибольшую точность и скорость. Дальнейшее развитие направлено на создание портативных, недорогих и мультиплексных тестов для применения как в лабораториях, так и в полевых условиях.

Основная часть. Результаты исследования.

Бабезиоз сельскохозяйственных животных — гемолитическая болезнь, вызываемая инвазией эритроцитов пироплазмами рода *Babesia*, приводящая к анемии, гемоглобинурии и падежу до 50% поголовья в острых формах.

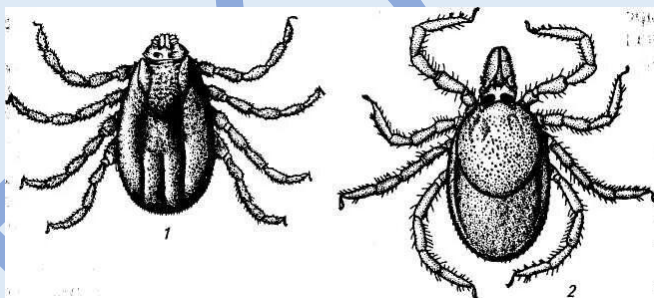


Рисунок 1 - Иксодовые клещи, переносчики *Babesia*

У крупного рогатого скота преобладают *B. Bovis* и *B. bigemina*, у овец и коз — *B. ovis* и *B. Motasi* (табл. 1). Хронические носители поддерживают эпидемический резерв, усугубляя трансмиссию через клещей *Rhipicephalus* и *Ixodes* (рис.1). Диагностика критически важна для карантина, терапии и профилактики [1-3].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика видов *Babesia*, патогенных для сельскохозяйственных животных

Показатель	<i>Babesia bovis</i>	<i>Babesia bigemina</i>	<i>Babesia ovis</i>	<i>Babesia motasi</i>
Основной хозяин	Крупный рогатый скот (КРС)		Овцы и козы	
Патогенность	Высокая; часто вызывает тяжёлые формы болезни с неврологическими нарушениями	Высокая; широко распространён, вызывает выраженную анемию и гемоглобинурию	Умеренная (в целом), но в некоторых регионах (например, Иране) — высокая летальность	Различается по регионам: в Северной Европе — низкая для интактных овец; в Индии и Северной Африке — выше, чем у <i>B. ovis</i>
Клинические признаки	— Высокая температура (40–42 °C)-атаксия-анорексия-циркуляторный шок-возможны неврологические нарушения-анемия, гемоглобинурия (на пике болезни)	— Высокая температура-выраженная анемия-гемоглобинурия-отсутствие внутрисосудистого разрушения эритроцитов (в отличие от <i>B. bovis</i>)	— Лихорадка-анемия-снижение продуктивности-в тяжёлых случаях — желтуха и гемоглобинурия	— Лихорадка-анемия-иногда желтуха и гемоглобинурия-степень тяжести зависит от региона и иммунного статуса животного
Уровень паразитемии	< 1 % инфицированных эритроцитов	Часто > 10 %, может достигать 30 %	Не указан (обычно умеренная)	Не указан (варьирует в зависимости от региона)
Переносчики	<i>Rhipicephalus (Boophilus) microplus</i> и др. иксодовые клещи	<i>Rhipicephalus (Boophilus) microplus</i> — основной переносчик	<i>Rhipicephalus bursa</i> , <i>R. turanicus</i> , <i>Hyalomma anatolicum excavatum</i> , возможно <i>R. evertsi evertsi</i>	<i>Haemaphysalis punctata</i> , <i>Rhipicephalus bursa</i>
Особенности течения инфекции	— Может сохраняться в организме пожизненно-Высокий риск осложнений и летальности без лечения	— Возможно освобождение от инфекции-Уровень антител может снизиться до отрицательного через несколько месяцев после заражения	— Нет перекрёстного иммунитета с <i>B. motasi</i> -Может длительно паразитировать в клещах без развития в позвоночном хозяине	— Нет перекрёстного иммунитета с <i>B. ovis</i> -Патогенность зависит от региона и штамма
Диагностика	— Микроскопия мазков крови-ПЦР (в т. ч. qPCR)-серологические методы		— Микроскопия мазков крови-ПЦР (ssrRNA, qPCR)-серологические методы	— Микроскопия мазков крови-ПЦР (cytochrome b, cytochrome c)-серологические методы
Лечение	Специфические противопаразитарные препараты			
Профилактика	Борьба с клещами Ограничение контакта с инвазированными пастбищами В некоторых случаях — живые ослабленные вакцины			
Экономический ущерб	— Падёж		— Падёж (в регионах с высокой патогенностью)	
	-Затраты на лечение и профилактику		-Снижение привесов и репродуктивной функции	
	-Снижение продуктивности (молочной, мясной)	-Снижение продуктивности	-Затраты на лечение	

Таблица 2. – Нарушения у животных при бабезиозе

Гемолитическая анемия	Разрушение эритроцитов вызывает резкое снижение уровня гемоглобина и эритроцитов в крови, что приводит к кислородному голоданию тканей
Гемоглобинурия (красная моча).	На пике гемолитического криза гемоглобин из разрушенных эритроцитов попадает в мочу, окрашивая её в красный цвет.
Желтуха.	Повреждение печени и нарушение билирубинового обмена приводят к желтушному окрашиванию слизистых оболочек и подкожной клетчатки
Нарушение работы сердечно-сосудистой системы	Развиваются тахикардия (учащение пульса) и тахипноз (учащение дыхания).
Поражение нервной системы	У некоторых животных наблюдаются нервные расстройства, судороги, дрожание мышц.
Снижение продуктивности	У коров резко уменьшается удой, а иногда молоко приобретает жёлтый или красноватый оттенок и становится горьким. У стельных коров часто происходят аборт, у быков возможно развитие стерильности.
Дегенеративно-воспалительные изменения внутренних органов	При патологоанатомическом исследовании обнаруживают: увеличение печени и селезёнки (спленоmegалия); зернистую и жировую дистрофию печени; застойную гиперемия лёгких и миокарда; кровоизлияния в эпикарде, эндокарде, почках и кишечнике; отёки тканей, нарушения в мышцах (набухание волокон, сглаженность поперечной исчерченности).

Таблица 3. – Факторы, влияющие на тяжесть течения заболевания

Фактор	Характеристика
Возраст.	Телята до 9 месяцев обычно переносят болезнь легко и без выраженных симптомов. Животные старше 1 года болеют с ярко выраженными признаками. Старые и ослабленные особи чаще погибают.
Иммунитет.	В эндемичных регионах у животных может формироваться иммунитет после перенесённой инфекции или повторного контакта с патогеном. Клинические случаи чаще поражают иммунологически наивных животных (например, недавно завезённых или тех, которые не имели доступа к пастбищам в первый год жизни).
Патогенность возбудителя и количество укусов клещей	Чем больше клещей укусило животное, тем выше нагрузка паразитами.
Погода	Неблагоприятные погодные и зоотехнические условия (например, стресс, недостаточное питание) могут осложнить течение болезни.

Экономический ущерб от бабезиоза приводит к падежу животных (смертность при отсутствии лечения может достигать 60%); снижению молочной и мясной продуктивности; аборт и потере приплода; затратам на лечение и профилактические мероприятия.

Традиционные методы уступают современным по чувствительности: микроскопия выявляет паразиты только при паразитемии $>0,1\%$, серология фиксирует антитела через 7–14 дней. Молекулярные технологии обеспечивают раннюю детекцию и видовую идентификацию [4,9].

К традиционным методам диагностики относятся:

1. *Микроскопия мазков крови.* Микроскопия тонких и толстых мазков, окрашенных по Гимзе или Романовскому-Гимзе, остается базовым методом. Для бабезий характерен морфологический полиморфизм: трофозоиты имеют грушевидную, кольцевидную, булавовидную, безвакуольную, амебовидную форму. Тонкие мазки оценивают морфологию (длина мерозоитов 2–5 мкм для крупных форм), толстые — паразитемию. Чувствительность 13,8–32,8% у КРС, но метод субъективен и неэффективен при $<0,1\%$ паразитемии.

Цифровая ИИ-интеграция с гематологическими анализаторами (ADVIA)³ использует PLT⁴, MPV⁵ и LUC%⁶ для предсказания с чувствительностью 100% [2,4].

2. *Серологические методы*, включают несколько направлений

Непрямая иммунофлюоресценция (ИРИФ). Позволяет определить уровень антител и установить, являются ли они высокими или низкими.

Иммуноферментный анализ (ИФА) или ELISA. В США применяют коммерческие ИФА-тесты на присутствие IgM и/или IgG антител против *B. microti*, но из-за высокой видоспецифичности эти наборы неприменимы для диагностики бабезиоза в Европе, где возбудителями являются *B. divergens* и *B. venatorum*.

Анализ парных образцов сыворотки. Например, для подтверждения инфекции *B. microti* более эффективен анализ парных образцов сыворотки, взятых в острых случаях и у реконвалесцентов.

ИФА (ELISA) и ИХЛА⁷ на рекомбинантных антигенах (MSA-2c⁸, RAP-1, HSP20⁹) достигают 95,9% чувствительности для *B. bovis*.

cELISA¹⁰ выявляет 32,8% серопозитивных КРС против 13,8% по мазкам. Ограничения: перекрестные реакции с *Theileria*¹¹, персистенция антител >12 мес.

Антиген-захватывающие ELISA (BdACA) детектируют секреторные антигены с порогом 115 инфицированных эритроцитов/мкл крови [4,9].

Молекулярно-биологические методы тестирования на нуклеиновые кислоты (Nucleic acid test (тест на нуклеиновые кислоты, НАТ))

1. *Полимеразная цепная реакция (ПЦР) и её модификации*. Основа метода: амплификация специфических участков ДНК (чаще — генов 18S rRNA или rap-1) с последующей детекцией продуктов.

³ **ADVIA** — бренд автоматических анализаторов для лабораторных исследований. Под этим брендом выпускаются приборы разных типов: биохимические, гематологические, иммунохимические

⁴ **PLT** — количество тромбоцитов (кровяных пластинок).

⁵ **MPV** — средний объём тромбоцитов.

⁶ **LUC%** — относительное количество больших неокрашенных (пероксидазонегативных) клеток.

⁷ **ИФА** (иммуноферментный анализ) или [англ. enzyme-linked immunosorbent assay](#), **ELISA** и **ИХЛА** (иммунохемилюминесцентный анализ) — это высокоточные лабораторные методы, основанные на реакции «антиген-антитело». Разница между ИФА и ИХЛА — в способе обнаружения реакции. ИФА использует ферменты, которые дают окрашивание, а ИХЛА — специальную световую (люминесцентную) метку.

⁸ **MSA-2c (BBOV_I003020)** — ген поверхностного антигена мерозоиота-2с у организма *Babesia bovis* T2Bo (штамм T2Bo).

⁹ Белок теплового удара 20 (**HSP-20**) и белок, ассоциированный с раптрией, 1a (**RAP-1 a**) — два белка, рассматриваемые как кандидаты для включения в вакцины или методы диагностики для контроля бабезиоза у крупного рогатого скота.

¹⁰ **cELISA** (Competitive Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) — это модификация стандартного ELISA, в которой очищенный антиген конкурирует с антигеном в исследуемом образце за связывание с антителом, иммобилизованным в лунках микропланшета

¹¹ Род *Theileria* вызывает тейлериоз (*Theileriosis*) у животных. Это трансмиссивная, сезонная, природно-очаговая болезнь крупного, мелкого рогатого скота, верблюдов, северных оленей

Классическая ПЦР — «золотой стандарт» молекулярной диагностики бабезиоза.

- Обеспечивает 100 % специфичность при корректном подборе праймеров.

Nested-ПЦР / nPCR (вложенная / гнездовая ПЦР)

- — двухэтапная амплификация, повышающая чувствительность. Позволяет детектировать 2 паразита/0,5 мл крови.

qPCR (количественная ПЦР)

- — даёт возможность количественно оценивать паразитарную нагрузку. Для *B. bigemina* порог обнаружения — 1,5 инфицированных эритроцита/мкл.

Мультиплексная ПЦР

- одновременная дифференциация *B. bovis* и *B. bigemina* в клещах и крови хозяев.

Рисунок 1. ПЦР

Источник: [6,7]

Преимущества: скорость, специфичность 100%, выявление носителей [6,7].

Изотермическая амплификация нуклеиновых кислот (или LAMP (от англ. *loop-mediated isothermal amplification*). Метод был разработан японским учёным Цугунори Номоми в 2000 году. LAMP амплифицирует ДНК при 60–65°C за 1 ч с чувствительностью 50 фг (*B. motasi*), в 10–100 раз выше ПЦР.

RPA (рекомбиназная полимеразная амплификация) и CPA¹² работают за 10–30 мин при 37–42°C, детектируя 0,25 паразита/мкл (*B. orientalis*). Идеальны для ферм без лабораторий [8–10].

Флуоресцентная гибридизация *in situ* (FISH). FISH с зондами на 18S rRNA визуализирует жизнеспособные *B. bovis*, *B. Bigemina* за 2 ч (LOD 57 паразитов/мкл). Специфичность 100%, отличает от *Plasmodium*. Дешевле ПЦР, не требует амплификации [5].

Новые технологии и перспективы

1.RLB¹³ и TBDCapSeq¹⁴ обеспечивают высокопроизводительный скрининг 11 патогенов (LOD 1–10 копий) [1].

RLB (Reverse Line Blot — гибридизация обратных линий) и TBDCapSeq (Tick-Borne Disease Capture Sequencing — секвенирование для выявления клещевых заболеваний) — это методы лабораторной диагностики, которые используются для обнаружения

¹² Cross Priming Amplification (CPA) — класс реакций изотермической амплификации, которые проводят с замещением цепи ДНК-полимеразой, не требующих начальной стадии денатурации или добавления нуклеотидов.

¹³ RLB — метод, который позволяет одновременно обнаруживать и дифференцировать несколько видов патогенов, передаваемых клещами

¹⁴ TBDCapSeq (Tick - Borne Disease Capture Sequencing) — метод, который использует зонды для захвата и обогащения нуклеиновой кислоты патогенов перед секвенированием

патогенов, в том числе при бабезиозе. RLB (Reverse Line Blot — гибридизация обратных линий) и TBDCapSeq (Tick-Borne Disease Capture Sequencing — секвенирование для выявления клещевых заболеваний) — это методы лабораторной диагностики, которые используются для обнаружения патогенов, в том числе при бабезиозе. RLB — метод молекулярной диагностики, основанный на гибридизации ДНК или РНК с видоспецифичными зондами, закреплёнными на твёрдой подложке. При этом происходит связывание комплементарных последовательностей, что позволяет идентифицировать конкретный патоген.

В контексте бабезиоза RLB используется для выявления клещевых видов *Babesia spp.* Метод стал надёжной платформой для диагностики благодаря использованию специфических зондов, которые позволяют точно определять виды бабезий. Примером применения RLB являются интегрированные системы, такие как Tekenscanner, которые позволяют быстро подтверждать инфицирование хозяина. Преимущества RLB: высокая специфичность за счёт использования видоспецифичных зондов; возможность одновременного тестирования на несколько видов патогенов; относительно быстрая обработка образцов.

TBDCapSeq — высокопроизводительная зондовая технология, которая позволяет одновременно выявлять геном нескольких клещевых патогенов в одном запуске. Метод основан на секвенировании с использованием специальных зондов, которые захватывают целевые последовательности ДНК из образца. Метод TBDCapSeq (Tick-Borne Disease Capture Sequencing Assay) разработали учёные из Центра инфекции и иммунитета (CII) при Школе общественного здравоохранения Мейлмана Колумбийского университета. Некоторые характеристики TBDCapSeq: способен одновременно анализировать 11 клещевых патогенов в 50 образцах за один запуск; демонстрирует исключительную чувствительность — 1–10 копий генома; превосходит секвенирование со сверхвысокой пропускной способностью (UHTS) в 25–10 000 раз и превышает пределы обнаружения qPCR; предоставляет геномные данные, что позволяет идентифицировать вид патогена без дополнительных подтверждающих тестов. TBDCapSeq особенно эффективен для крупномасштабного эпидемиологического надзора. Метод позволяет выявлять инфекции на ранних стадиях (например, у кошачьих хозяев), при хронических случаях (у собак), а также при низкой или персистирующей паразитемии у различных хозяев, включая овец, коз и яков. Ограничения TBDCapSeq: требует оптимизированных протоколов для образцов с низким уровнем паразитемии (например, увеличенных объёмов крови или глубины секвенирования); зависит от известных последовательностей при разработке зондов, что ограничивает обнаружение новых патогенов; существует риск перекрёстной реактивности из-за сохранённых участков генов рРНК, что может потребовать дополнительных генетических анализов для подтверждения вида.

Таблица 4 – Сравнение методов RLB и TBDCapSeq

Параметр	RLB	TBDCapSeq
Принцип работы	Гибридизация с видоспецифичными зондами	Секвенирование с использованием зондов захвата
Количество анализируемых патогенов	Несколько (зависит от набора зондов)	11 клещевых патогенов одновременно
Чувствительность	Высокая, но ниже, чем у TBDCapSeq	Исключительная (1–10 копий генома)
Применение	Диагностика конкретных видов бабезий	Крупномасштабный эпиднадзор, одновременный скрининг нескольких патогенов
Требования к оборудованию	Менее требовательный к оборудованию, чем TBDCapSeq	Требует высокопроизводительных секвенаторов

Оба метода дополняют традиционные подходы (микроскопию, ПЦР) и расширяют возможности диагностики бабезиоза и других клещевых инфекций.

2. Naemabiome секвенирует 16S/18S rDNA¹⁵ для смешанных инфекций.

Naemabiome — это инновационная диагностическая платформа на основе глубокого ампликонного секвенирования (NGS), предназначенная для выявления широкого спектра гемопатогенов у сельскохозяйственных животных. Диагностический инструмент Naemabiome был разработан международной группой исследователей. Среди разработчиков — учёные из Эдинбургского университета (Великобритания) и Международного научно-исследовательского института животноводства (Кения). Инструмент позволяет: идентифицировать виды патогенов в биологическом образце; исследовать сообщества гемопатогенов; выявлять сопутствующие (множественные) инфекции. Ключевое преимущество — возможность одновременного скрининга на множество патогенов в рамках одного исследования, что устраняет необходимость поочерёдного тестирования на каждый возбудитель. Платформа ориентирована на обнаружение важнейших клещевых патогенов, циркулирующих в кровотоке млекопитающих, в том числе: *под Theileria*; *под Babesia*; *под Anaplasma*; *под Ehrlichia* [11].

3. ИИ-модели (ML/CS) интегрируют гематологию с ПЦР. Интеграция искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения (ML) и компьютерных наук (CS) с гематологией и ПЦР при бабезиозе — это перспективное направление, которое может повысить точность диагностики, ускорить анализ данных и улучшить персонализацию лечения.

4. Перспективы: мультиплексные панели, биосенсоры, культивирование на моделях (SCID-мыши).

SCID-мыши (мыши с тяжёлым комбинированным иммунодефицитом) используются в исследованиях бабезиоза для изучения патогенеза заболевания, тестирования терапевтических подходов и моделирования определённых клинических сценариев. Эти животные имеют генетический дефект, который приводит к нарушению развития и созревания Т- и В-лимфоцитов, что делает их иммунную систему значительно

¹⁵ 16S rDNA — последовательность ДНК, кодирующая малую субъединицу рибосомальной РНК (рРНК) прокариот (бактерий и архей).

18S rDNA — это участок ДНК, кодирующий малую субъединицу рибосомальной РНК (18S рРНК) у эукариот.

ослабленной. Это позволяет исследовать влияние инфекции на организм с подавленным иммунитетом, что особенно актуально для бабезиоза, который часто протекает тяжелее у иммунокомпрометированных пациентов.

Изучение патогенеза и взаимодействия паразит–хозяин. Мыши с ослабленным иммунитетом, получающие переливание эритроцитов крупного рогатого скота (BoRBC) наряду с обработкой моноклональными антителами против мышинных эритроцитов, позволяют создать «гуманизированную» гематологическую нишу. У подвергшихся спленэктомии SCID-мышей, инокулированных *Babesia* spp., полученной от пасущихся телят, развивается выраженная паразитемия, сопровождающаяся характерными проявлениями: гемоглобинурией, гемолитическим кризом и неврологическими осложнениями. Это позволяет надёжно изолировать патоген и изучать механизмы его воздействия на организм.

Тестирование терапевтических агентов. SCID-мыши могут использоваться для оценки эффективности потенциальных противопаразитарных препаратов. Ослабленный иммунитет животных позволяет более чётко наблюдать влияние лечения на динамику инфекции, так как исключается вклад адаптивного иммунного ответа.

Исследование роли иммунитета в защите от инфекции. Сравнивая течение заболевания у SCID-мышей и иммунокомпетентных животных, учёные могут выяснять, какие компоненты иммунной системы играют ключевую роль в контроле инфекции. Например, эксперименты с SCID-мышами помогли понять, что клеточно-опосредованные реакции (Th1-тип ответа) и гуморальный ответ могут вносить вклад в защиту от бабезиоза.

Моделирование клинических сценариев. SCID-мыши полезны для изучения бабезиоза у пациентов с иммунодефицитными состояниями, так как их состояние имитирует ситуацию ослабленного иммунитета у человека. Это позволяет прогнозировать течение болезни и ответ на лечение в подобных случаях.

Комбинация методов минимизирует ошибки [9].

Выводы.

В заключение подытожим - бабезиоз представляет собой зоонозное паразитарное заболевание, вызываемое протозойными возбудителями рода *Babesia*, которое наносит значительный ущерб сельскохозяйственному животноводству, особенно крупному рогатому скоту, овцам и козам. Современные молекулярные методы радикально повысили точность диагностики, а интеграция ИИ с цифровой микроскопией и анализом гематологических параметров (PLT, MPV) повышает чувствительность до 100%.

Список источников

1. Jia, Z. Research progress on diagnostic techniques for different *Babesia* species in persistent infections / Z. Jia, Y. Zhang, D. Zhao, H. Wang, M. Yu, Z. Liu, X. Zhang, J. Cui, X. Wang // *Frontiers in cellular and infection microbiology*. — 2025. — Vol. 15. — Art. 1575227. — DOI: 10.3389/fcimb.2025.1575227.
2. Бабезиоз крупного рогатого скота (КРС): сайт / Белагропром. — Минск, 2025. — URL: <https://www.belagrogen.by/inform/blog/182-babesioz-krupnogo-rogatogo-skota-krs.html> (дата обращения: 10.06.2025).
3. Tavassoli, M. PCR-based Detection of *Babesia* spp. Infection in Cattle / M. Tavassoli // *J. Arthropod-Borne Dis.* — 2013. — Vol. 7, № 2. — P. 142–148. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3875879/> (дата обращения: 10.06.2025).
4. Mahmoud, M. S. Serological and molecular diagnostic surveys combined with examining hematological profiles suggests increased levels of infection and hematological response of cattle to babesiosis infections compared to native buffaloes in Egypt / M. S. Mahmoud, O. M. Kandil, S. M. Nasr, S. H. Hendawy, S. M. Habeeb, D. M. Mabrouk, M. G. Silva, C. E. Suarez // *Parasites & vectors*. — 2015. — Vol. 8. — Art. 319. — DOI: 10.1186/s13071-015-0928-9. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4467044/> (дата обращения: 10.06.2025).

5. Shah, J. S. A Fluorescence In Situ Hybridization (FISH) Test for Diagnosing Babesiosis / J. S. Shah // *Diagnostics (Basel)*. — 2020. — Vol. 10, № 6. — Art. 377. — DOI: 10.3390/diagnostics10060377. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7344499/> (дата обращения: 10.06.2025).
6. Анализ Бабезиоз (ПЦР), № AN303KP для крупного рогатого скота : сайт / Vet Union. — Москва, 2025. — URL: <https://vetunion.ru/lab/analysis/pcr-diagnostics-infektsionnyh-zabolevanij-obshchih-dlya-raznyh-vidov-zhivotnyh-krs/babeziroz-ptsr> (дата обращения: 10.06.2025).
7. Oliveira-Sequeira, T. C. G. PCR-based detection of *Babesia bovis* and *B. bigemina* / T. C. G. Oliveira-Sequeira // *Int. J. Parasitol.* — 2005. — Vol. 35, № 1. — P. 37–43. — DOI: 10.1016/j.ijpara.2004.10.013.
8. Rimal, S. Bovine Babesiosis: A Clinical Review / S. Rimal // *Mathews J. Vet. Sci.* — 2025. — URL: <https://www.mathewsopenaccess.com/full-text/bovine-babesiosis-a-clinical-review> (дата обращения: 10.06.2025).
9. Jaramillo Ortiz, J. M. Research progress on diagnostic techniques for different *Babesia* species / J. M. Jaramillo Ortiz // *Front. Cell. Infect. Microbiol.* — 2025. — Vol. 15. — Art. 1575227.
10. AL-Hosary, A. A. T. A. LAMP assay for diagnosis of bovine babesiosis / A. T. A. AL-Hosary // *Adv. Vet. Res.* — 2017. — Vol. 7. — P. 74–80. — URL: <https://advetresearch.com/index.php/AVR/article/view/134> (дата обращения: 10.06.2025).
11. Yalcindag, E. Development of a novel Haemabiome tool for the high-throughput analysis of haemopathogen species co-infections in African livestock / E. Yalcindag, D. Vasoya, J. D. Hemmink [et al.] // *Frontiers in Veterinary Science*. — 2024. — Vol. 11. — Art. 1491828. — DOI: 10.3389/fvets.2024.1491828.

References

1. Jia, Z., Zhang, Y., Zhao, D., Wang, H., Yu, M., Liu, Z., Zhang, X., Cui, J., & Wang, X. (2025). Research progress on diagnostic techniques for different *Babesia* species in persistent infections. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 15, 1575227. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2025.1575227>
2. Belagroprom. (2025). *Babesiosis in cattle (KRS)* [Website]. Minsk. Retrieved from <https://www.belagrogen.by/inform/blog/182-babeziroz-krupnogo-rogatogo-skota-krs.html>
3. Tavassoli, M. (2013). PCR-based detection of *Babesia* spp. infection in cattle. *Journal of Arthropod-Borne Diseases*, 7(2), 142–148. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3875879/>
4. Mahmoud, M. S., Kandil, O. M., Nasr, S. M., Hendawy, S. H., Habeeb, S. M., Mabrouk, D. M., Silva, M. G., & Suarez, C. E. (2015). Serological and molecular diagnostic surveys combined with examining hematological profiles suggests increased levels of infection and hematological response of cattle to babesiosis infections compared to native buffaloes in Egypt. *Parasites & Vectors*, 8, 319. <https://doi.org/10.1186/s13071-015-0928-9>. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4467044/>
5. Shah, J. S. (2020). A fluorescence in situ hybridization (FISH) test for diagnosing babesiosis. *Diagnostics (Basel)*, 10 (6), 377. <https://doi.org/10.3390/diagnostics10060377>. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7344499/>
6. Vet Union. (2025). *Babesiosis (PCR) analysis, No. AN303KR for cattle* [Website]. Moscow. Retrieved from <https://vetunion.ru/lab/analysis/pcr-diagnostics-infektsionnyh-zabolevanij-obshchih-dlya-raznyh-vidov-zhivotnyh-krs/babeziroz-ptsr>
7. Oliveira-Sequeira, T. C. G. (2005). PCR-based detection of *Babesia bovis* and *B. bigemina*. *International Journal for Parasitology*, 35 (1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijpara.2004.10.013>
8. Rimal, S. (2025). Bovine babesiosis: A clinical review. *Mathews Journal of Veterinary Sciences*. Retrieved from <https://www.mathewsopenaccess.com/full-text/bovine-babesiosis-a-clinical-review>
9. Jaramillo Ortiz, J. M. (2025). Research progress on diagnostic techniques for different *Babesia* species. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 15, 1575227.
10. AL-Hosary, A. A. T. A. (2017). LAMP assay for diagnosis of bovine babesiosis. *Advances in Veterinary Research*, 7, 74–80. Retrieved from <https://advetresearch.com/index.php/AVR/article/view/134>
11. Yalcindag, E., Vasoya, D., Hemmink, J. D., [et al.]. (2024). Development of a novel Haemabiome tool for the high-throughput analysis of haemopathogen species co-infections in African livestock. *Frontiers in Veterinary Science*, 11, 1491828. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1491828>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.