



Обзорная статья

Тепловизионные технологии в изучении животных

Л. Н. Владимиров¹, Г. Н. Мачахтыров¹, В. А. Мачахтырова^{✉,1},
Я. Л. Шадрина², В. В. Слепцова¹, В. А. Алексеев³

¹Академия наук РС(Я), г. Якутск, Российская Федерация

²ЯНИИСХ им. М.Г. Сафронова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

³Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

✉varvara-an@mail.ru

Аннотация

Тепловизионная технология, или инфракрасная термография (ИКТ), за последние годы стала важным инструментом для неинвазивного изучения различных физиологических процессов у животных, состояния их здоровья и поведенческих реакций. Метод позволяет регистрировать распределение поверхностной температуры тела, что дает возможность бесконтактно оценивать терморегуляцию, уровень стресса, наличие воспалительных процессов и некоторые адаптационные механизмы животных. Часто данный подход применяется при разнообразных физических нагрузках животных в условиях, где важна способность организма поддерживать температурный гомеостаз, включая негативное влияние комплекса факторов окружающей среды. Кроме того, метод применяется в некоторых исследованиях, посвященных анализу поведенческих реакций у разных видов животных, таких как социальное взаимодействие и адаптация к изменению климата. В данной статье рассматриваются современные подходы к использованию тепловизионной технологии в научных исследованиях в разных направлениях по изучению как домашних, так и диких видов млекопитающих. Показано, что ИКТ может быть эффективно использована в комплексе с другими методами диагностики и наблюдения, что делает ее ценным инструментом не только в биомедицинских, но и экологических и физиологических исследованиях. Также рассмотрены перспективы развития данной технологии, включая интеграцию с беспилотниками, системами искусственного интеллекта и мобильными приложениями. Дальнейшие разработки в области стандартизации протоколов проведения данных исследований по изучению специфичных реакций организма животных в различных условиях, несомненно, будут способствовать развитию как фундаментальных, так и прикладных исследований и помогут расширить применение тепловизионных технологий, в частности, в коневодстве.

Ключевые слова: тепловизионные исследования, терморегуляция, неинвазивная диагностика, якутская лошадь, коневодство

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-20083 «Изучение терморегуляторных механизмов лошадей для создания системы оценки и мониторинга холодовой адаптации на основе применения термографических методов», <https://rscf.ru/project/25-16-20083/> с софинансированием АНО «Якутский научный фонд».

Для цитирования: Владимиров Л.Н., Мачахтыров Г.Н., Мачахтырова В.А., Шадрина Я.Л., Слепцова В.В., Алексеев В.А. Тепловизионные технологии в изучении животных. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):486–499. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-486-499>

Thermal imaging technologies in the study of animals

Leonid N. Vladimirov¹, Grigory N. Machakhtyrov¹, Varvara A. Machakhtyrova^{✉,1},
Yana L. Shadrina², Vasilena V. Slepsova¹, Vladislav A. Alekseev³

¹Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

²Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture, Yakutsk, Russian Federation

³Amnosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

✉varvara-an@mail.ru

Abstract

Thermal imaging technology, commonly referred to as infrared thermography (IRT), has become a valuable non-invasive method for investigating various physiological processes, health conditions, and behavioral responses in animals. This method enables the recording of surface body temperature distribution, allowing for contactless assessment of thermoregulation, stress levels, inflammatory processes, and certain adaptive mechanisms in animals. IRT is frequently used to monitor animals during physical activities under conditions where maintaining thermal homeostasis is critical, including exposure to complex environmental stressors. Moreover, it is used in studies examining behavioral responses across diverse animal species, such as social interactions and adaptation to climate change. This article reviews modern approaches and applications of thermal imaging technology in research involving both domestic and wild mammal species. It highlights the effective integration of IRT with other diagnostic and observational methods, making it a valuable tool not only in biomedical research but also in environmental and physiological studies. Additionally, the article discusses future prospects for this technology, including its integration with unmanned aerial vehicles (drones), artificial intelligence systems, and mobile platforms. Progress in standardizing research protocols for assessing specific physiological responses in animals under various conditions is expected to enhance both fundamental and applied research. These developments will also promote the wider use of thermal imaging technologies, particularly in horse breeding.

Keywords: thermal imaging studies, thermoregulation, non-invasive diagnostics, Yakut horse, horse breeding

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation under grant No. 25-16-20083, titled “Investigating thermoregulatory processes in horses to establish a system for assessing and monitoring adaptation to cold environments through thermographic methods” (<https://rscf.ru/project/25-16-20083/>), with additional co-financing provided by the Autonomous Nonprofit Organization “Yakut Scientific Foundation”.

For citation: Vladimirov L.N., Machakhtyrov G.N., Machakhtyrova V.A., Shadrina Ya.L., Slepsova V.V., Alekseev V.A. Thermal imaging technologies in the study of animals. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):486–499. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-486-499>

Введение

Тепловизионные технологии представляют собой высокоточный инструмент для проведения наблюдения, бесконтактного (неинвазивного) измерения температуры и формирования изображения объектов, находящихся в поле зрения прибора тепловизора, на основе разности их температур относительно окружающей среды. Основной принцип работы тепловизора базируется на улавливании с помощью микроболометрической матрицы излучаемых от объекта инфракрасных волн, интенсивность которых пропорциональна их температуре, которые он пре-

образует в электрический сигнал и формирует термограмму – цветное изображение распределения температур. Современные тепловизоры выпускаются в разных модификациях и обладают высокой чувствительностью (точность измерения до $\pm 0,1\text{--}0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), широким диапазоном измерений (от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше), разрешением матрицы от 160×120 до 640×480 пикселей и оптическим разрешением (объективы с углом обзора $24^{\circ}\text{--}45^{\circ}$). Многие модели позволяют настраивать коэффициент излучения, что важно при съемке животных с разным типом шерстного покрова [1, 2]. Области применения

тепловизоров чрезвычайно разнообразны – от медицины и технического контроля, от экологических до биологических исследований.

Широкое использование тепловизионных устройств становится одним из передовых методов исследования при изучении животных благодаря своей способности неинвазивно регистрировать распределение температуры тела у животных и проводить анализ его динамики в ответ на внешние условия и раздражители [3–7]. В данной статье представлен обзор использования тепловизионных технологий в научных исследованиях, направленных на изучение диких и домашних животных.

*Применение тепловизионных технологий
в экологии, в мониторинге
биоразнообразия и экосистем*

Тепловизионные технологии, активно развивающиеся в последние десятилетия, становятся важным инструментом для мониторинга биоразнообразия и состояния экосистем. В экологии управление природными биоресурсами требует надежных, быстрых и доступных методов исследования популяций диких животных. Особое внимание уделяется их роли в оценке численности популяций исчезающих видов, создании карт мест обитания животных, анализе влияния климатических изменений на адаптацию организмов, а также управлении инвазивными видами для минимизации их воздействия на природные экосистемы. В связи с этим инфракрасная термография (ИКТ) часто используется для дистанционного мониторинга численности популяций диких видов, особенно на больших территориях или в отдаленных и труднодоступных районах ареала обитания животных [4, 8, 9]. В такого рода исследованиях широко используются беспилотные летательные аппараты, оснащенные тепловизионными камерами, например, для распознавания видов диких млекопитающих и определения численности популяции. Так, применение тепловизионных изображений было эффективным для идентификации видов оленей – благородного оленя (*Cervus elaphus*) и косули (*Capreolus capreolus*) [4], когда можно было определить размер и структуру популяции по количеству оленей, их возраст и пол, а также распределение оленей по пастбищам с различными типами растительности в определенные сезоны. Результаты подсчетов по проведенным опытам и наблюдениями дали среднюю точечную оценку в 77 оленей (95%-й доверительный интервал 71–83), представ-

ляющих 81–97 % известного ареала популяции. При этом полеты в период захода солнца дали оценки с наивысшей точностью, в пределах или близко к истинному ареалу популяции. Отмечается, что изменчивость оценок в первую очередь зависела от суточных климатических условий и времени суток. Такой мониторинг популяций и видов является важным элементом управления и сохранения видов, и тепловизионный метод станет одним из экономичных по времени и менее инвазивным, чем традиционные методы изучения популяций диких животных [3].

По данным Н.Л. Larsen и соавторов [9], использование информационно-коммуникационных технологий для наблюдения за дикими крупными животными является безопасным и эффективным. Предложенные системы обеспечивают высокоточную классификацию животных, а также предоставляют изображения идентифицированных особей, что повышает достоверность результатов. Это позволяет применять технологии как для определенных целей, так и для снижения риска конфликтов между людьми и дикой природой [9].

В последнее время усовершенствование характеристик инфракрасных тепловизионных сканеров способствовало их активному применению в полевых исследованиях для обнаружения, учета, изучения и фотографирования насекомых и животных, в том числе ночных млекопитающих [10]. Помимо этого, тепловизионная термография оказалась эффективной не только для наблюдения за живыми организмами, но и для поиска туш диких кабанов в определенных природных условиях, что зависит от степени их сохранности. Этот подход рассматривается как один из инструментов профилактики распространения инфекционных заболеваний среди популяций диких и домашних животных [11].

Одним из ключевых преимуществ тепловизионных исследований является возможность обнаруживать и отслеживать тепловые сигнатуры животных даже в условиях низкой видимости или густой растительности. Как отмечают В. Chang с соавторами [12] также важным фактором при интерпретации данных, полученных с помощью тепловизионных систем, являются сезонные колебания температуры окружающей среды. Наблюдения, выполненные в зимний период, характеризующийся отсутствием листвы на деревьях, показали более высокую эффективность обнаружения тепловых сигналов от животных благодаря уменьшению маскирующего эффекта раститель-

ного покрова. Помимо этого авторами выявлено, что максимальная эффективность наблюдений достигается в пасмурные дни и в вечерние часы, когда тепловая контрастность между животными и окружающей средой наиболее выражена [12].

Применение тепловизионных технологий не ограничивается только наблюдением за исчезающими видами. Они также эффективны для создания подробных карт мест обитания и маршрутных схем различных животных. Современные автономные системы на основе алгоритмов, таких как YOLOv8, позволяют автоматически обнаруживать и классифицировать тепловые профили животных с помощью данных, собранных дронами. Эти системы способны работать в режиме реального времени, предоставляя операторам понятный интерфейс для анализа информации непосредственно на мобильных устройствах в зависимости от конкретных потребностей исследователей. Важно отметить, что эти технологии особенно полезны для мониторинга экосистем в ночное время или в условиях низкой видимости, когда традиционные методы оказываются более ограниченными и менее эффективными при таких обстоятельствах. Согласно исследованиям J. Hermann, Y. Toras, J. Hoffmann и других, дроны, оснащенные тепловизорами и RGB-камерами, способны осуществлять мониторинг на значительных территориях и в труднодоступных районах со сложным ландшафтом, например, в горных и лесных местностях. Это делает их эффективным инструментом для долгосрочного мониторинга экосистем и оценки влияния климатических изменений на биоразнообразие [13].

В последнее время разработаны современные тепловизионные устройства, обеспечивающие передовые возможности для анализа данных благодаря радиометрическому режиму, который позволяет измерять температуру для каждого пикселя изображения на термографе. Например, беспилотник JOUAV CW-25E, оснащенный инфракрасной камерой с разрешением 640×512 пикселей, обеспечивает точное наблюдение за животными в любое время суток. Оснащение таких систем комплексом специализированных инструментов особенно полезно для мониторинга исчезающих видов, численность которых критически мала и требует постоянного наблюдения. Использование дронов с тепловизионными камерами позволяет исследователям собирать данные об этих животных, их этологии без прямого контакта в их естественной среде обитания, что

минимизирует стресс у животных и снижает риск отклонений их поведения при вынужденном контакте с человеком [14].

Наряду с изучением задач в области сохранения отдельно взятых видов животных дикой фауны, тепловизионные технологии также успешно применяются для управления инвазивными видами животных на больших территориях. Как отмечают S. Dawson, P. Adams, T. Low с соавторами, проект ThermEye представляет собой пример успешного использования искусственного интеллекта для автоматического анализа тепловизионных изображений для обнаружения животных, определения видов и плотности их популяции. Алгоритм способен четко различать виды животных, что позволяет землепользователям и экологами эффективно отслеживать плотность популяций таких вредителей, как дикие свиньи и олени. Информация, собранная с помощью подобных систем, имеет большое значение для решения задач, связанных с мониторингом экосистем и воздействием климатических изменений [15].

Несмотря на многочисленные преимущества, применение тепловизионных технологий сталкивается с рядом ограничений. Например, остаются нерешенными вопросы, связанные, в частности, со сложностями ведения мониторинга за животными, характеризующимися высокой степенью подвижности, а также с отсутствием достаточного количества репрезентативных данных для составления необходимых алгоритмов. Между тем, тепловизионные исследования животных стали важным эффективным инструментом для мониторинга численности популяций, анализа их пространственного распределения и изучения определенных физиологических реакций животных в различных экологических условиях. Для повышения точности, надежности и масштабируемости таких исследований необходимы дальнейшие разработки и расширение баз данных по исследуемым объектам, что откроет новые возможности для использования тепловидения в экологических исследованиях.

Одним из главных барьеров является высокая стоимость оборудования, что затрудняет доступ к нему для малых предприятий и бюджетных секторов [16]. Современные тепловизионные камеры с высоким разрешением требуют значительных инвестиций в производство. Кроме того, эффективность использования тепловизоров может снижаться в определенных погодных условиях, та-

ких как сильный дождь или густой туман. Эти факторы необходимо учитывать при планировании исследований, особенно в труднодоступных регионах, где надежность оборудования имеет решающее значение для успешного мониторинга животных.

Применение тепловизионных технологий в ветеринарии

Метод инфракрасной термографии, являясь неинвазивным методом измерения температуры животного, создавая визуализацию распределения тепла поверхности кожи, стал находить широкое применение в ветеринарной практике. Одним из основных преимуществ тепловизионной съемки в ветеринарии считается ее способность обнаруживать проблемы со здоровьем животного на ранней стадии болезни. Это происходит из-за того, что малейшие изменения в терморегуляции животного могут указывать на наличие у него воспаления, травмы или инфекции. Так, в молочном скотоводстве тепловизионные технологии нашли применение при ранней диагностике воспалительных процессов в конечностях крупного рогатого скота, а своевременное и эффективное выявление болезней и патологий в конечностях дойных коров, особенно на ранних стадиях, имеет большое практическое значение для поддержания здоровья и уровня производства молока в хозяйствах [16–18]. Как отмечают Г. Наг-

ris-Bridge и другие [19], наравне с показателем максимальной температуры и визуализацией области копыта, необходимо учитывать другие статистические величины как расчеты достоверности, стандартное отклонение и коэффициент вариации, что делает метод наиболее точным при диагностике и выявлении дерматита у крупного рогатого скота. При этом авторы установили, что инфракрасная термография позволяет точно обнаруживать области поражения копыт путем измерения изменений в температуре коронарного пояса и поверхности кожи копыта, тем самым обеспечивая раннее выявление заболеваний [18,19].

В работе А. Verduzco-Mendoza с соавторами отмечается, что инфракрасная термография крайне чувствительна к изменениям температуры тела до точности 0,1 °С, зависящим от сужения или расширения поверхностных кровеносных сосудов, благодаря чему этот метод служит надежной оценкой при проведении хирургических операций, при ожоговых травмах и воспалениях [20].

Кроме того, инфракрасная термография активно применяется в диагностике мастита, одного из самых распространенных и экономически значимых заболеваний у дойных коров [21, 22].

Исследования Mansoor Nabi et al. показали, что ИКТ может применяться для выявления субклинического и клинического мастита у молочных коров (рис. 1). При этом количество соматических клеток в молоке (SCC) является важным показателем для выявления мастита у коров [23].

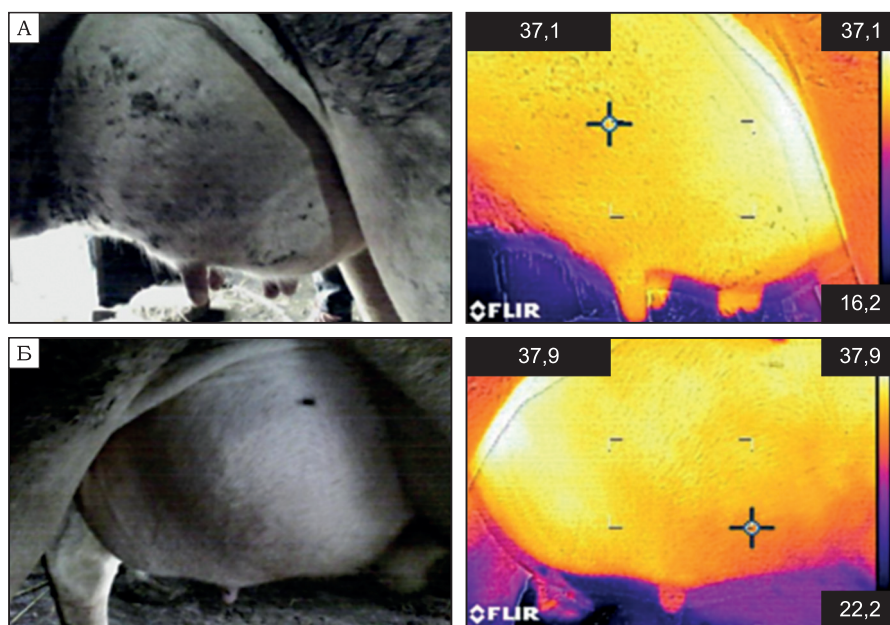


Рис. 1. Тепловые изображения здоровой четверти вымени (А) и четверти вымени с маститом (Б) [22]

Fig. 1. Thermal images of a healthy udder quarter (A) and an udder quarter with mastitis (B) [22]

тических клеток в молоке (SCC), превышающее 200 000 клеток/мл, служило золотым стандартом для выявления инфекции. ИРТ продемонстрировала умеренную чувствительность (65 %) и высокую специфичность (84 %) для выявления субклинического мастита. В клинических случаях как чувствительность (86,11 %), так и специфичность (89 %) были выше. ИРТ выявила значительные колебания температуры между поверхностью кожи тела и вымени, главным образом в клинических случаях [22].

Одним из существенных преимуществ тепловизионных исследований является выявление изменений температуры поверхности тела животного, вызванных различными проблемами в физиологическом функционировании организма, такими как нарушение кровообращения [23, 24]. Например, в экспериментах на кроликах с тромбозом глубоких вен ИКТ показала повышение температуры пораженной конечности от 39,14–39,24 °C до 41,08–41,91 °C, что подтверждает чувствительность метода к изменениям кровообращения при диагностике сосудистых патологий [26]. В случае изучения ожогов на поверхности кожи свиней исследования Jeng J.C. с соавторами продемонстрировали, что повреждения увеличивают кровоток на 15–20 %, тогда как при глубоких ожогах наблюдается снижение кровотока на $4 \pm 2,1\%$ до $27 \pm 11,8\%$ [26]. Кроме того, как отмечают Vitorino D.V. с соавторами, повышение температуры воздуха вызывает изменения в показателях термографии кожи у лошадей, что важно для понимания адаптации животных к стрессовым условиям [27]. Такие данные демонстрируют потенциал ИКТ не только для применения в диагностике, но и для оценки степени повреждений при различных травмах и ранах животных.

Следовательно, ИКТ в режиме реального времени позволяет выявлять изменения интенсивности теплового излучения, отражающие динамику кровообращения и микроциркуляции, что делает ее ценным инструментом для неинвазивной оценки сосудистых нарушений. В хирургии метод эффективен для мониторинга жизнеспособности тканей после реконструктивных вмешательств и анастомозов, позволяя оценить восстановление перфузии. При ожоговых поражениях ИКТ помогает дифференцировать зоны некроза, ишемии и воспаления, что способствует более точному определению глубины поврежде-

ния. Вместе с тем, для повышения достоверности диагностики авторы рекомендуют использовать инфракрасную термографию в комплексе с другими визуализирующими и диагностическими методами.

В коневодстве метод инфракрасной термографии является одним из основных способов проведения диагностики у лошадей. В клинической практике такие системы помогают быстро и точно выявлять патологии и воспалительные процессы, анализируя минимальные изменения температуры в конечностях лошадей [28]. Это особенно важно для спортивной медицины, где своевременная диагностика необходима для предотвращения серьезных травм. M. Dymek, M. Worowska, N. Kozłowska с соавторами показали, что повышение температуры кожи в области суставов может указывать на развитие воспаления за две недели до проявления клинических симптомов, что делает ИКТ ценным инструментом для ранней диагностики артритов и тендовагинитов у лошадей [28].

Применение тепловизионных технологий в физиологии

В ряде исследований отмечается перспективность применения инфракрасной термографии в спортивной физиологии для раннего выявления перегрузок, воспалительных процессов и контроля этапов восстановления спортивных животных [29]. В частности, ИКТ демонстрирует высокую эффективность при оценке терморегуляторных реакций скаковых лошадей в условиях физических нагрузок. Исследование J.R. Amory, I.A. Wright и Mason C.S. проводилось на группе лошадей, выполнявших стандартизированную тренировку на беговой дорожке [30]. Температура поверхности кожи измерялась до и после нагрузки в нескольких анатомических точках: области плеч, предплечья, спины и бедра. Измерения проводились с помощью тепловизора при контролируемых условиях окружающей среды. После физической нагрузки наблюдалось значительное повышение температуры кожи в области конечностей, особенно в дистальных участках. Наибольшие изменения зафиксированы в плечевой области, что связано с высокой мышечной активностью и увеличением кровотока [30].

Одной из серьезных проблем в животноводстве являются стрессы у животных, вызываемые различными факторами и проведением зооветеринарных мероприятий. Так исследованиями Aragona F. с соавторами, проведенными у лоша-

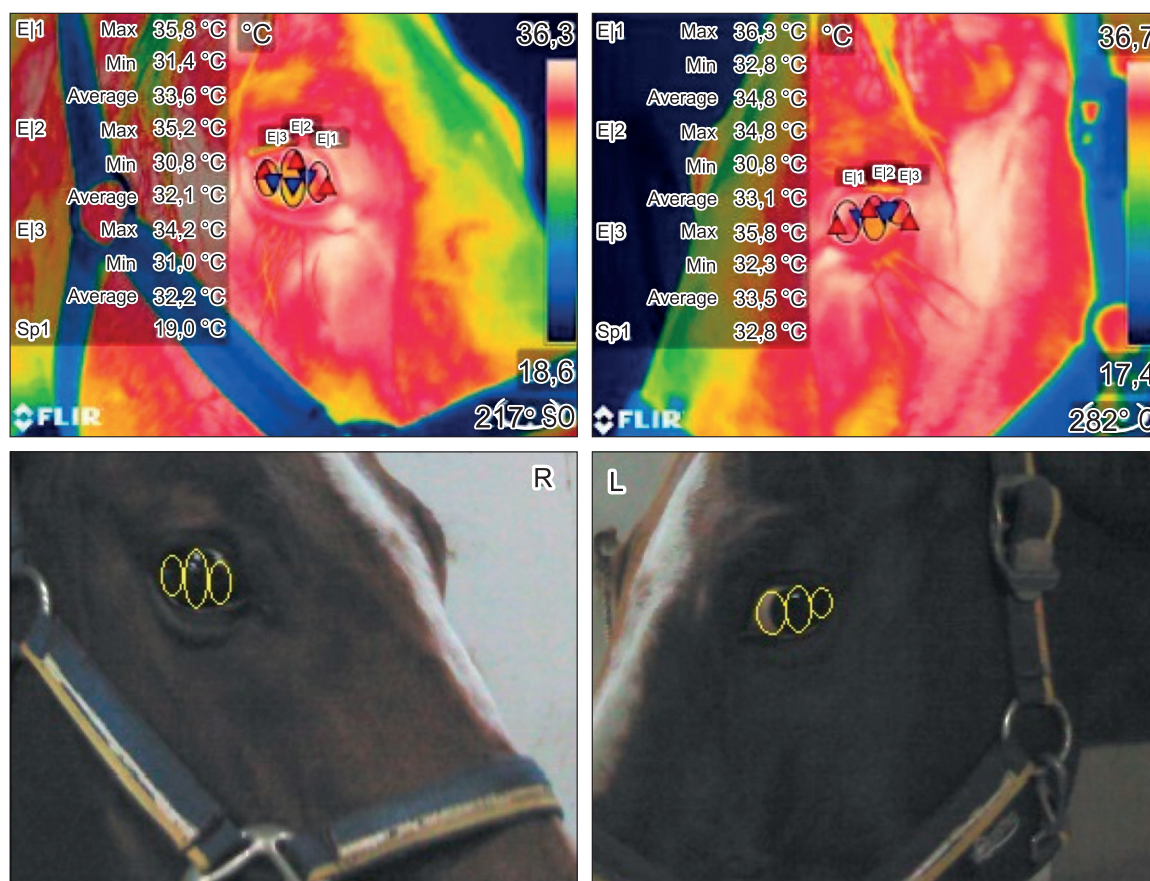


Рис. 2. Репрезентативные левый и правый глаз с wybranными областями интереса (EL1 (медиальный угол глаза), EL2 (центральный угол роговицы) и EL3 (латеральный угол глаза)) и полученными температурами EL1max, EL1avg и EL1min, EL2max, EL2avg и EL2min и EL3max, EL3avg и EL3min у лошади [31]

Fig. 2. Representative images of the left and right eyes with the selected ROIs (EL1 (medial canthus), EL2 (central cornea) and EL3 (lateral canthus)) and the obtained temperatures EL1max, EL1avg and EL1min, EL2max, EL2avg and EL2min and EL3max, EL3avg, and EL3min in a horse [31]

дей, было установлено, что стрессовые ситуации сопровождаются снижением температуры в области носа и глаз (рис. 2), связанным с активацией симпатической нервной системы [31].

Аналогичные данные приводят Т. Travain с соавторами, когда у собак было установлено снижение температуры в носовой и в глазной области при эмоциональном напряжении [32]. Эти данные позволяют использовать ИКТ для оценки уровня стресса при транспортировке, ветеринарных процедурах и и других зооветеринарных мероприятиях, являющихся стрессовыми для животных.

М. Domino с соавторами использовали инфракрасную термографию в качестве потенциально полезного инструмента для обнаружения беременности у непарнокопытных [33]. Для этого методом ИКТ измеряли температуру поверхности тела, которая, как правило, увеличивается со

сроком беременности из-за увеличения кровотока и метаболической активности в матке и тканях плода. Авторы подчеркивают, что данное исследование было направлено на разработку новых методов цифровой обработки тепловых изображений беременных кобыл для раннего обнаружения беременности с более высокой точностью [33].

Исходя из вышеизложенного следует, что преимуществами тепловизионного метода являются его безопасность, высокая чувствительность и возможность дистанционного применения для изучения животных. Современные исследования демонстрируют эффективность ИКТ как инструмента для комплексной оценки и мониторинга здоровья, благополучия и физиологического состояния животных. Использование тепловизоров в животноводстве способствует раннему обнаружению патологий, болезней и предотвраще-

нию распространения инфекционных заболеваний из-за точного выявления минимальных температурных отклонений у животных. В крупных хозяйствах, где стадо насчитывает сотни или даже тысячи животных, использование тепловизоров позволяет провести быстрое неинвазивное сканирование животных всего стада за сравнительно короткий срок и выявлять тех, у кого повышена температура поверхности всего тела или отдельно взятых его частей, что означает начало воспалительного процесса или болезни. Это не только сохраняет здоровье животных, но и способствует экономному расходованию средств на лекарственные препараты, так как лечение на ранних стадиях заболеваний обходится хозяйствам гораздо дешевле, чем борьба после обширного распространения инфекций.

*Будущие направления развития
тепловизионных исследований животных:
перспективы технологии и интеграция ИИ*

В последние годы технологические достижения в области тепловизионных исследований значительно расширили возможности изучения животных. Однако будущее этой области обещает еще более значительные прорывы, углубление понимания экосистем, терморегуляции и адаптации видов к изменяющимся условиям окружающей среды. Основными направлениями прогресса являются «миниатюризация» оборудования, интеграция искусственного интеллекта (ИИ), использование новых материалов для снижения стоимости и повышения чувствительности камер, а также применение облачных технологий для анализа данных в реальном времени [12, 24, 34, 35].

Одним из ключевых трендов является миниатюризация тепловизионных камер, что открывает новые горизонты для наблюдений за маленькими животными. Новые подходы к производству тепловизионных устройств позволяют значительно уменьшить размеры и стоимость оборудования. Например, камеры с разрешением до 1920×1080 пикселей могут быть произведены по более низкой цене, что делает их доступными для массового использования в экологических исследованиях. Компактность таких устройств позволяет устанавливать их на дроны типа FPV, что особенно важно для работы в сложных ландшафтных условиях или при необходимости минимизации человеческого воздействия на естественную среду обитания животных, а также позволяет отслеживать термические паттерны таких мелких объектов для изучения, как грызу-

ны или насекомые, включая их ночную активность [24].

Параллельно с «миниатюризацией» развивается интеграция с искусственным интеллектом для автоматизации анализа больших объемов данных, собранных тепловизионными системами. Современные алгоритмы машинного обучения уже способны различать виды животных, таких как овцы, на основе тепловых сигнатур [35]. Кроме того, автономные системы на основе YOLOv8, описанные в недавних исследованиях, позволяют операторам управлять дронами и анализировать данные одновременно, что значительно снижает трудозатраты при анализе большого объема полученных данных [39]. Мобильные приложения, разработанные для таких систем, предлагают понятный интерфейс для анализа данных в режиме реального времени, что особенно полезно для мониторинга хищников и других видов животных в их естественной среде обитания.

Технологии ИИ обладают замечательной способностью автоматизировать анализ тепловизионных изображений с высокой эффективностью. Эта автоматизация значительно ускоряет процесс диагностики. Традиционный ручной анализ тепловизионных изображений может занимать много времени и быть подвержен человеческому фактору, но алгоритмы ИИ способны быстро и согласованно обрабатывать и интерпретировать большие объемы изображений [38]. Это особенно важно при работе с несколькими животными или в ситуациях, когда быстрое принятие решений критически важно, например, в экстренных случаях или во время хирургических операций. Например, в загруженной ветеринарной клинике ИИ может быстро анализировать тепловизионные изображения, полученные в разное время, чтобы отслеживать ход выздоровления животного. Сравнивая эти изображения, ИИ может обнаруживать едва заметные изменения температуры, которые могут остаться незамеченными невооруженным глазом, что позволяет ветеринарам точно определить проблемные области и принимать обоснованные решения о лечении [37].

Развитие технологий производства тепловизионных камер также играет важную роль в снижении их стоимости и повышении чувствительности. Например, компания Obsidian Sensors разработала инновационные тепловизионные устройства на основе стеклянных подложек, что снижает стоимость производства в сотни раз по сравнению с традиционными методами. Эти

устройства характеризуются высоким разрешением и большим углом обзора, что особенно важно для наблюдений за движущимися объектами. Разработка таких технологий открывает новые возможности для долгосрочного мониторинга экосистем и оценки влияния климатических изменений на биоразнообразие [40].

Сочетание тепловизионных данных с другими методами визуализации, например магнитно-резонансной томографией (МРТ) или компьютерной томографией (КТ), открывает новые горизонты для моделирования сложных патофизиологических процессов в организме животных. Такие данные имеют важное значение для выбора оптимальной стратегии лечения и прогнозирования исходов заболеваний [41].

Одним из ключевых направлений развития тепловизионных исследований является использование многослойных нейронных сетей для автоматизации анализа термографических изображений. Современные алгоритмы машинного обучения, такие как нейронные сети (CNN), уже демонстрируют высокую точность в классификации видов животных и распознавании их тепловых сигнатур даже в условиях ограниченной видимости. Так, система, основанная на CNN, разработанная S. Meivel и коллегами, позволяет точно определять тепловые паттерны различных видов, включая слонов, что особенно важно для экологических исследований и мониторинга популяций исчезающих видов [42].

Таким образом, тепловизионные исследования представляют собой перспективное направление в изучении животных, которое активно развивается благодаря прогрессу современных технологий, программ искусственного интеллекта и автоматизированных методов анализа огромного количества данных. Комбинация ИКТ с другими методами визуализации, использование многослойных нейронных сетей и применение компактных устройств открывают новые возможности для диагностики заболеваний, моделирования патологических процессов и мониторинга состояния животных в естественных условиях. При этом данные технологии применимы в ветеринарии, где изменение температурных показателей может служить индикатором стресса, адаптационных механизмов или заболеваний, а также для мониторинга за течением лечения и восстановления животных. Кроме того, тепловизионные технологии предоставляют информацию о текущих физиологических состояниях в опре-

деленных условиях окружающей среды, а также могут выявлять некоторые механизмы адаптации животных при воздействии различных факторов среды.

Однако остаются вызовы, такие как необходимость создания более сбалансированных наборов данных для обучения моделей ИИ и дальнейшее снижение стоимости оборудования, чтобы сделать эти технологии доступными для широкого круга исследователей.

*Перспективы применения
тепловизионных технологий
в табунном коневодстве
Республики Саха (Якутия)*

В России, охватывающей различные климатические зоны, особое место занимает Республика Саха (Якутия), занимающая примерно 1/5 часть территории страны. Специфика региона продиктована географической расположенностью основной площади территории в арктической и субарктической зонах, характеризующихся наличием многолетней мерзлоты и резко-континентальным климатом. Несмотря на сочетание сложных природных факторов, в регионе развивается северное животноводство, основанное на традиционных занятиях коренных жителей и разведении аборигенных пород животных. Наряду с этим, наличие огромного количества естественных угодий делает регион перспективным для более интенсивного развития животноводства и увеличения производства сельскохозяйственной продукции. При этом одной из отраслей, позволяющих эффективное освоение такой обширной территории за сравнительно короткий период без огромных финансовых затрат, является табунное коневодство. Якутская порода табунной лошади, сформированная под влиянием сложных природных условий и селекции, наилучшим образом приспособлена к круглогодичному вольнокосячному пастбищному содержанию.

Исторически сложившаяся технология ведения табунного коневодства Якутии как круглогодичное пастбищное содержание основана на исключительно высокой выносливости и неприхотливости якутской лошади. Непревзойденная приспособленность к крайне низким температурам, нетребовательность к кормовым условиям, высокая выносливость, способность к быстрой наживке и накоплению питательных веществ в короткий период обеспечивают выживание лошади при изнурительной тебеневке в течение 7–8 месяцев при самых неблагоприятных факторах среды.

Также этому способствуют генетически обусловленные морфофизиологические признаки организма якутской лошади, к которым можно отнести характерный экстерьер, специфичный кожно-волосяной покров, его теплоизоляционные свойства, способность лошадей к быстрому нагулу, уменьшение легочной вентиляции в зимний период [43] и другие. Между тем, самостоятельная добыча корма из-под снега при крайне низких температурах в течение продолжительного зимнего периода зачастую приводит к потере веса, которая порой у кобыл может достигать 20–22 %, что может стать причиной падежа, выкидышей и абортот [44]. В то же время, несмотря на большое количество работ, посвященных улучшению способов табунного коневодства, методы оценки и контроля за состоянием лошадей в зимний период, разработанные в 70-х и 80-х годах прошлого столетия, по-прежнему остаются субъективными, не отражающими истинного состояния лошади, так как данная оценка проводится зимой визуальна на расстоянии и в основном зависит от опыта и навыков табунщика. Как показывают реалии настоящего времени, данная отрасль, не имеющая аналогов в мире благодаря высокой рентабельности из-за применения технологии круглогодичного пастбищного содержания лошадей, практически не менявшейся в течение столетий, оказалась не подвержена действиям санкций и остается абсолютно независимой от завоза племенного материала из-за рубежа.

Очень сложным для якутских табунных лошадей является продолжительный зимний период с комплексным прессингом негативных факторов на их организм: длительное воздействие низких температур до и ниже -50°C , глубина снежного покрова, туманы, ветра, низкий уровень питательности корма и энергозатраты на его добычу из-под толщн снега, осадки. Несмотря на приспособительные качества, основная масса табунных лошадей стремительно теряет живую массу, что часто сопровождается увеличением непроизводственного отхода и снижением показателей воспроизводства (падеж, аборты и выкидыши). Контроль за состоянием лошадей в этот период проводится в соответствии с принятыми инструкциями по бонитировке табунных лошадей, предусматривающими применение метода путем визуальной оценки кондиции лошади, основанной только на опыте и навыках табунщика, что указывает на субъективность такой оценки.

Применение технологии пастбищного содержания лошадей якутских пород круглогодично в непростых условиях Севера подвергает лошадей воздействию суровых погодных факторов в течение всего года. Несомненно, что лошади, в частности кобылы и молодняк, испытывают значительную нагрузку негативных факторов, влияние которых может вызвать нарушения в терморегуляции, ощутимые потери живой массы, как правило, приводящие к серьезным потерям как взрослого поголовья, так и молодняка. Вместе с тем, организм некоторых животных сформировал адаптационные механизмы, благодаря которым отдельно взятые кобылы, полученное от них потомство выходят из зимнего тебеневочного периода без ощутимых потерь для своего организма. Метод визуальной оценки, применяемый в настоящее время в практике табунного коневодства, не позволяет выявлять истинные потери живой массы у тебеняющих лошадей в силу своей субъективности.

Якутская лошадь является наиболее подходящей «моделью» для изучения механизмов адаптации рода лошадиных (*Equus*) к холоду из-за широкого ареала обитания и высокой приспособленности к экстремальным условиям. В то же время комплексное исследование терморегуляции организма лошади, основанное на изучении экологических, морфологических, физиологических, этологических аспектов, представляет несомненный интерес (рис. 3).

В связи с этим комплексное изучение терморегуляции организма лошади, охватывающее экологические, морфологические, физиологические и этологические аспекты, представляет значительный научный и практический интерес. Особую актуальность при этом приобретает внедрение в практику инновационных решений, направленных на модернизацию и совершенствование существующих технологий с учетом специфических биологических особенностей табунных лошадей.

Заключение

С учетом современных литературных данных, свидетельствующих о перспективности применения ИКТ в животноводстве, представляется целесообразным расширение потенциала метода для мониторинга физиологического состояния лошадей в условиях табунного содержания в зимний период. Особое значение данная техно-



Рис. 3. Термограмма табунной лошади якутской породы, февраль 2025 г. (фото авторов)

Fig. 3. Thermogram of a Yakut breed herd horse, February 2025 (photo by the authors)

логия приобретает в контексте изучения механизмов терморегуляции – ключевого адаптивного процесса, обеспечивающего гомеостаз организма лошади при экстремально низких температурах, характерных для северных регионов. Однако в доступной научной литературе недостаточно исследований, посвященных особенностям терморегуляторных реакций у лошадей в условиях продолжительной зимней экспозиции при температурах ниже -40°C . Это ограничивает понимание интегративных физиологических ответов организма на холодовой стресс и снижает достоверность экстраполяции данных, полученных в умеренных климатических зонах.

Качество и интерпретируемость термографических измерений существенно зависят от ряда экзогенных и эндогенных факторов, включая скорость ветра, влажность воздуха, качество шерстного покрова, фазу суточного цикла, уровень энергетического обмена и поведенческие адаптации животных. Эти параметры могут оказывать значительное влияние на распределение поверхностной температуры тела, что, в свою очередь, требует строгого контроля условий измерений, стандартизации методики и тщательной подго-

товки полевых исследований. Таким образом, для получения объективных и воспроизводимых термографических данных необходимо разработать стандартизованный протокол термографического мониторинга табунных лошадей. Данный протокол должен учитывать как биологические, анатомо-физиологические особенности якутской лошади, так и специфические экстремальные условия Севера. Внедрение такого подхода создаст основу для неинвазивной оценки функционального состояния уникальных животных и позволит углубить понимание физиологических и метаболических механизмов, лежащих в основе их устойчивости к холодовому стрессу.

Список литературы / References

1. Ring E.F. The historical development of temperature measurement in medicine. *Infrared Physics & Technology*. 2007;49(3):297–301. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2006.06.029>
2. Hovei K., Durek K., Soroko M. Thermal camera performance and image analysis repeatability in equine thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2020;110:103447. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103447>
3. Soroko M., Davies M. *Equine Thermography in practice*. Cabi; 2016. 116 p.
4. Hänninen L., Pastell M., Keeling L.J., et al. Thermographic assessment of stress in horses during different handling

- procedures. *Physiology & Behavior*. 2009;98(5):633–637. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2009.09.002>
5. Turner T.A. Thermography as a tool for evaluating equine lameness. *AAEP Proceedings*. 2003;49:130–132.
6. Amory J.R., Wright I.A., Mason C.S. The use of infrared thermography to assess surface temperature changes in horses following treadmill exercise. *The Veterinary Journal*. 2002;164(2):148–153. <https://doi.org/10.1053/tvj.2002.0715>
7. McCafferty D.J. The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Review*. 2007;37(3):207–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00103.x>
8. Jones J.P., Asner G.P., Butchart S.H., Karanth K.U. The ‘why’, ‘what’ and ‘how’ of monitoring for conservation. In: *Key Topics in Conservation Biology 2*. Hoboken, NJ: Wiley Online Library; 2013:327–343.
9. Larsen H.L., Möller-Lassen K., Enevoldsen E.M.E., et al. Drone with Mounted Thermal Infrared Cameras for Monitoring Terrestrial Mammals. *Drones*. 2023;7(11):680. <https://doi.org/10.3390/drones7110680>
10. Havens K.J., Sharp E.J. Chapter 11 – Using Thermal Imagers for Animal Ecology. In: Havens K.J., Sharp E.J., eds. *Thermal Imaging Techniques to Survey and Monitor Animals in the Wild*. Academic Press; 2016:245–314. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803384-5.00011-7>
11. Rietz J., van Beeck Calkoen S.S., Ferry N., et al. Drone-based thermal imaging in the detection of wildlife carcasses and disease management. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2023;2023:5517000. <https://doi.org/10.1155/2023/5517000>
12. Chang B., Hwang B., Lim W., et al. Enhancing wildlife detection using thermal imaging drones: designing the flight Path. *Drones*. 2025;9(1):52. <https://doi.org/10.3390/drones9010052>
13. Hermann J., Topac Y., Hoffmann J., et al. User-Centric Wildlife Monitoring: AI-Powered Animal Detection and Tracking with Drone-Based Thermal Imaging. In: *Proceedings of Woodstock '18: ACM Symposium on Neural Gaze Detection*; 2018 Jun 3–5; Woodstock, NY. New York, NY: ACM; 2018:12 p.
14. JOUAV. How to Use Drones for Wildlife Conservation? JOUAV Blog. 2023. URL: <https://www.jouav.com/blog/wildlife-drone.html> (дата обращения: 12.04.2025).
15. Dawson S., Adams P., Low T., et al. *Automated thermal imagery analysis platform for multiple pest species*. Canberra: Centre for Invasive Species Solutions; 2022. 28 p. ISBN 978-1-922971-00-5.
16. Кирсанов В.В., Павкин Д.Ю., Довлатов И.М. и др. Разработка математической модели определения состояния копыт крупного рогатого скота на основе профилей термограмм. *Агроинженерия*. 2022;24(5):35–39. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-35-39>
17. Kirsanov V.V., Pavkin D.Yu., Dovlatov I.M., et al. Development of a mathematical model for determining the condition of cattle hooves based on thermogram profiles. *Agroengineering*. 2022;24(5):35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-5-35-39>
18. Lokesh Babu D.S., Jeyakumar S., Patil J.V., et al. Monitoring foot surface temperature using infrared thermal imaging for assessment of hoof health status in cattle: a review. *Journal of Thermal Biology*. 2018;78:106–115. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.08.021>
19. Harris-Bridge G., Young L., Handel I., et al. The use of infrared thermography for detecting digital dermatitis in dairy cattle: What is the best measure of temperature and foot location to use? *The Veterinary Journal*. 2018;237:26–33.
20. Verduzco-Mendoza A., Olmos-Hernández A., Bueno-Nava A., et al. Thermal imaging in biomedical research: a non-invasive technology for animal models. *Frontiers in Veterinary Science*. 2025;12:1544112. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1544112>.
21. Жилич Е.Д., Рогальская Ю.Н., Колоско Д.Н. Применение метода термографии для идентификации заболевания молочной железы коров. *Техника и технология в животноводстве*. 2022;(2):108–112. <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-108>
22. Zhilich E.D., Rogalskaya Yu.N., Kolosko D.N. Application of the thermography method for identification of mammary gland disease in cows. *Engineering and technology in animal husbandry*. 2022;(2):108–112. (In Russ.) <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-2-108>
23. Mansoor Nabi, et al. Assessing the potential of infrared thermography for early detection of subclinical mastitis in crossbred cows. *International Journal of Veterinary Sciences and Animal Husbandry*. 2025;10(2):08–15.
24. Stewart M., et al. Eye temperature and health status in cattle measured using infrared thermography. *Physiology & Behavior*. 2008;93(4–5):858–866.
25. McCafferty D.J. The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Review*. 2007;37(3):207–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00113.x>.
26. Wang L., et al. Monitoring of deep vein thrombosis in a rabbit model using infrared thermography. *Biomedical Optics Express*. 2018;9(6):2783–2795. <https://doi.org/10.1364/BOE.9.002783>.
27. Jeng, J.C., et al. Skin temperature changes in second- and third-degree burns in a porcine model using infrared thermography. *Journal of Burn Care & Rehabilitation*. 2003;24(5):315–320. <https://doi.org/10.1097/00004623-200309000-00006>
28. Vitorino, D.V., et al. Infrared thermography as a method to assess thermal comfort in horses (*Equus caballus*). *Journal of Thermal Biology*. 2019;85:102410. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102410>.
29. Dymek K., Eksell P., Wattle O., Roepstorff L. Use of thermography to detect subclinical lameness in horses. *Equine Veterinary Journal*. 2006; 38. № 5; 454–458. <https://doi.org/10.2478/acve-2023-0023>
30. Amory J.R., Wright I.A., Mason C.S. The use of infrared thermography to assess surface temperature changes in horses following treadmill exercise. *The Veterinary Journal*. 2002;164(2):148–153.
31. Kruljc. Thermographic Examination of the Horse. *Acta Veterinaria*; 2023: 73. 289–316. <https://doi.org/10.2478/acve-2023-0023>.
32. Aragona F., Rizzo M., Arfuso F., et al. Eye temperature measured with infrared thermography to assess stress responses to road transport in horses. *Animals*. 2024; 14(13):1877. <https://doi.org/10.3390/ani14131877>.
33. Travain T., Colombo E. S., Grandi L. C., et al. How good is this food? A study on dogs’ emotional responses to a potentially pleasant situation using infrared thermography. *Physiology & Behavior*. 2016;155: 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.11.036>.
34. Domino M., Borowska M., Kozłowska N., et al. Advances in thermal image analysis for the detection of pregnancy in horses using infrared thermography. *Sensors*. 2022; 22: 191. <https://doi.org/10.3390/s22010191>

34. Daniel A., Ferdous S., Mathew A., Amanda J. Collectively advancing deep learning for animal detection in drone imagery: Successes, challenges, and research gaps. *Ecological Informatics*. 2024;83:102842. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102842>.
35. Jinxin Liang, Zhiyu Yuan, Xinhui Luo, et al. Application of non-invasive monitoring technology in intensive sheep farming: A review. *Smart Agricultural Technology*. 2025;12: 101215. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101215>.
36. Reddy C., Kumar S., Sharma S., Natesan G., et al. Real-time tracking of wildlife with iot solutions in movement ecology. *Journal of Advanced Zoology*. 2023; 44: 1122–1134. <https://doi.org/10.17762/jaz.v44iS-5.1191>.
37. Meivel S., Karthikraja R., Mohamad Sajudeen S., Rokith K. Thermal imaging based animal intrusion using artificial intelligence. May 2021. *Türk Fizyoterapi ve Rehabilitasyon Dergisi/Turkish Journal of Physiotherapy and Rehabilitation*.
38. Hermann J., Topac Y., Hoffmann J., et al. User-centric wildlife monitoring: ai-powered animal detection and tracking with drone-based thermal imaging. In: *Woodstock '18: ACM Symposium on Neural Gaze Detection, June 03–05, 2018. Woodstock, NY. ACM, New York, NY, USA;2018*. 12 pages.
39. Dave B., Mori M., Bathani A., Goel P. Wild animal detection using YOLOv8. *Procedia Computer Science*.2023; 230: 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.065>.
40. Rogalski A. Infrared detectors: advances and applications. *Progress in Quantum Electronics*. 2022; 85: 100421.
41. Oikonomou G., et al. Multimodal imaging in veterinary medicine: combining thermography with MRI and CT for improved diagnosis in equine and canine patients. *Veterinary Journal*. 2021; 278: 105743. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2021.105743>.
42. Hartmann M., Schott M., Dsouza, A., et al. A text and image analysis workflow using citizen science data to extract relevant social media records: Combining red kite observations from Flickr, eBird and iNaturalist. *Ecological Informatics*. 2022;71: 101782. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101782>.
43. Алексеев Н.Д., Неустроев М.П., Иванов Р.В. *Биологические основы повышения продуктивности лошадей*. Якутск; 2006. 280 с.
- Alekseev N.D., Neustroev M.P., Ivanov R.V. *Biological basis for increasing the productivity of horses*. Yakutsk; 2006: 280 p. (In Russ.)
44. Винокуров Н.Т., Владимиров Л.Н., Мачахтырова В.А. Особенности динамики изменений живой массы лошадей якутской породы в зимнее время. *Достижения науки и техники АПК*. 2012; 4: 80–82.
- Vinokurov N.T., Vladimirov L.N., Machakhtyrova V.A. Peculiarities of the dynamics of changes in the live weight of Yakut horses in winter. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2012; 4: 80–82. (In Russ.)

Об авторах

ВЛАДИМИРОВ Леонид Николаевич, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-5889-281X>, Scopus Author ID: 57004575000, SPIN: 2189-0659, e-mail: vladimirovln@mail.ru

МАЧАХТЫРОВ Григорий Николаевич, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, ResearcherID: ABA-4349-2021, Scopus Author ID: 57222057965, SPIN: 2088-3016, e-mail: aylga@mail.ru

МАЧАХТЫРОВА Варвара Анатольевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, ResearcherID: ABA-4356-2021, Scopus Author ID: 57222058847, SPIN: 6781-3467, e-mail: varvara-an@mail.ru

ШАДРИНА Яна Лаврентьевна, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4477-6332>, ResearcherID: J-6517-2018, SPIN: 6121-0532, e-mail: yanalina_12@mail.ru

СЛЕПЦОВА Василиена Васильевна, научный сотрудник, <https://orcid.org/0009-0003-0657-4355> SPIN: 2168-8658, e-mail: vvsleptsova1990@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Владислав Амирович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6751-6210>, ResearcherID: G-6157-2019, Scopus Author ID: 57222298326, SPIN: 2904-9620, e-mail: vldslvalexseev@gmail.com

Вклад авторов

Владимиров Л.Н. – руководство исследованием, разработка концепции, получение финансирования; **Мачахтыров Г.Н.** – администрирование проекта, редактирование рукописи; **Мачахтырова В.А.** – методология; создание черновика рукописи; **Шадрина Я.Л.** – проведение исследования; **Слепцова В.В.** – ресурсное обеспечение исследования; **Алексеев В.А.** – ресурсное обеспечение исследования

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, профессор Владимиров Леонид Николаевич является главным редактором журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.

About the authors

VLADIMIROV, Leonid Nikolaevich, Dr. Sci. (Biol.), Correspondent Member of RAS, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-5889-281X>, Scopus Author ID: 57004575000, SPIN: 2189-0659, e-mail: vladimirovln@mail.ru

MACCHAKHTYROV, Grigory Nikolaevich, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-8328-4744>, ResearcherID: ABA-4349-2021, Scopus Author ID: 57222057965, SPIN: 2088-3016, e-mail: aylga@mail.ru

MACCHAKHTYROVA, Varvara Anatolyevna, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0988-0943>, ResearcherID: ABA-4356-2021, Scopus Author ID: 57222058847, SPIN: 6781-3467, e-mail: varvara-an@mail.ru

SHADRINA, Yana Lavrentievna, Cand. Sci. (Vet.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4477-6332>, ResearcherID: J-6517-2018, SPIN: 6121-0532, e-mail: yanalina_12@mail.ru

SLEPTSOVA, Vasilena Vasilievna, Researcher, <https://orcid.org/0009-0003-0657-4355>, SPIN: 2168-8658, e-mail: vvsleptsova1990@mail.ru

ALEKSEEV, Vladislav Amirovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6751-6210>, ResearcherID: G-6157-2019, Scopus Author ID: 57222298326, SPIN: 2904-9620, e-mail: vldslvalexseev@gmail.com

Authors' contribution

Vladimirov L.N. – supervision; conceptualization, funding acquisition; **Machakhtyrov G.N.** – project administration, writing – review & editing; **Machakhtyrova V.A.** – methodology, writing – original draft; **Shadrina Ya.L.** – investigation; **Sleptsova V.V.** – resources; **Alekseev V.A.** – resources

Conflict of interest

One of the authors, Leonid N. Vladimirov, Dr. Sci. (Biol.), Corresponding Member of RAS, Professor is the Editor-in Chief for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 14.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 09.09.2025

Принята к публикации / Accepted 15.09.2025