Исследовательская статья

https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-22-32

Прогноз заболеваемости бруцеллезом крупного рогатого скота в Кабардино-Балкарской Республике с использованием методов декомпозиции временных рядов и пространственного анализа

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Аминат Жагафаровна Хитиева
E-mail: aminkahitieva@mail.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Хитиева А.Ж., Тебуев А.Х. Прогноз заболеваемости бруцеллезом крупного рогатого скота в Кабардино-Балкарской Республике с использованием методов декомпозиции временных рядов и пространственного анализа. *Аграрный вестник Северного Кавказа*. 2026;16(2):22-32. https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-22-32 EDN GSHHRI

ПОСТУПИЛА: 26.03.2026
ДОРАБОТАНА: 18.05.2026
ПРИНЯТА: 01.06.2026

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ
Авторы выражают благодарность сотрудникам Управления ветеринарии КБР и ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» за предоставленные данные и содействие в проведении исследования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ
Исследование выполнено в рамках плановой научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В. М. Кокова».

COPYRIGHT: © 2026 Хитиева А.Ж., Тебуев А.Х.

А.Ж. Хитиева, А.Х. Тебуев
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В. М. Кокова, Нальчик, Россия

АННОТАЦИЯ

ВВЕДЕНИЕ. Бруцеллез крупного рогатого скота остается значимой зоонозной угрозой в регионах с развитым животноводством, включая Северный Кавказ. Изменение климата и пространственная неоднородность требуют комплексных прогностических моделей, учитывающих комплекс различных факторов.

ЦЕЛЬ. Разработать практико-ориентированную прогностическую модель, интегрирующую долгосрочные управленческие тренды, краткосрочные климатические колебания и пространственную дифференциацию рисков в условиях вертикальной зональности Кабардино-Балкарской Республики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Анализ временных рядов заболеваемости (2000–2024 гг.) проведен с использованием декомпозиции тренда и метеорологических предикторов (температура, осадки, скорость ветра и влажность). Применены корреляционный и регрессионный анализ, метод декомпозиции временных рядов decSARIMA, кригинг-интерполяция, кросс-валидация.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Коэффициент детерминации финальной модели составил R^2 = 0,84, средняя ошибка прогноза на независимой выборке — 0,16 в пересчете на 10 000 обследованных животных. Кросс-валидация подтвердила устойчивость (средняя абсолютная ошибка, MAE = 0,18–0,21). Выявлена пространственная неоднородность рисков: предгорная зона (600–1200 м над уровнем моря) характеризуется в 2,3 раза более высоким риском по сравнению с равниной. Сезонные пики: май – июнь (+35 %), октябрь – ноябрь (+28 %). Прогноз на 2025: 11–12 случаев на 10 000 обследованных (95 % доверительный интервал).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанная модель сочетает устойчивый годовой прогноз с пространственной дифференциацией рисков и анализом сезонных механизмов влияния погоды. Экономическая оценка показывает, что затраты на профилактику в зонах прогнозируемого риска в 4–6 раз ниже. Затраты на профилактику в 4–6 раз ниже потерь от вспышек. Модель может служить дополнительным инструментом поддержки принятия решений для ветеринарной службы Кабардино-Балкарской Республики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: бруцеллез КРС, прогностическая модель, климатические факторы, пространственный анализ, ГИС-технологии, декомпозиция временных рядов, экономическая эффективность

Research article

https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-22-32

Prediction of bovine brucellosis incidence in the Kabardino-Balkarian Republic using time series decomposition and spatial analysis methods

CORRESPONDENCE:
Aminat Zh. Khitieva
E-mail: aminkahitieva@mail.ru

FOR CITATION:
Khitieva A.Zh., Tebuev A.Kh. Prediction of bovine brucellosis incidence in the Kabardino-Balkarian Republic using time series decomposition and spatial analysis methods. *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2026;16(2):22-32. (In Russ.) https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-22-32

RECEIVED: 26.03.2026
REVISED: 18.05.2026
ACCEPTED: 01.06.2026

DECLARATION OF COMPETING INTEREST:
none declared.

ACKNOWLEDGMENTS
The authors express their gratitude to the staff of the Kabardino-Balkarian Veterinary Department and the North Caucasus Hydrometeorological Center for providing data and assistance in conducting the study.

FUNDING
The study was conducted as part of the planned research work of the Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov

COPYRIGHT: © 2026 Khitieva A.Zh., Tebuev A.Kh.

Aminat Zh. Khitieva, Azamat Kh. Tebuev

Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V. M. Kokov, Nalchik, Russia

ABSTRACT

INTRODUCTION. Bovine brucellosis remains a significant zoonotic threat in the North Caucasus. Climate change and spatial heterogeneity require integrated predictive models.

AIM. To develop a practice-oriented predictive model incorporating long-term management trends, short-term climatic fluctuations, and spatial risk differentiation for the Kabardino-Balkarian Republic.

MATERIALS AND METHODS. Time series analysis of incidence (2000–2024) was applied using decSARIMA decomposition, correlation and regression analysis, kriging interpolation, cross-validation.

RESULTS. The model achieved a determination coefficient R^2 = 0.84. The mean forecast error on an independent test sample was 0.16 per 10,000 examined animals. Cross–validation confirmed model stability with a mean absolute error (MAE) ranging from 0.18 to 0.21. Spatial heterogeneity in risk was identified: the foothill zone (600–1200 m above sea level) exhibited a 2.3-fold higher risk compared to the plain. Seasonal peaks were observed in May–June (+35%) and October–November (+28%). The forecast for 2025 is 11–12 cases per 10,000 examined animals (95% confidence interval).

CONCLUSION. The developed model combines robust annual forecasting with spatial risk differentiation and analysis of the seasonal mechanisms of weather influence. Economic assessment shows that the costs of preventive measures in areas with predicted risk are 4–6 times lower than the losses from disease outbreaks. This model can serve as an additional decision-support tool for the veterinary service of the Kabardino-Balkarian Republic.

KEYWORDS: bovine brucellosis, prognostic model, climatic factors, spatial analysis, GIS, time series decomposition, economic efficiency

ВВЕДЕНИЕ

Бруцеллез — особо опасная зоонозная инфекция, актуальная для ветеринарии и здравоохранения. Из 12 видов *Brucella* эпизоотологическую значимость для крупного рогатого скота (далее — КРС) имеют три: *B. abortus*, *B. melitensis*, *B. suis*. Остальные виды не опасны для сельскохозяйственных животных [1; 2].

Экономические потери значительны: затраты на борьбу, снижение продуктивности, потери приплода [3]. Заражение происходит преимущественно алиментарным путем [1; 4]. Возбудитель *Brucella* сохраняется в почве, воде и навозе до 4 месяцев [5].

В глобальном масштабе бруцеллез остается одной из наиболее распространенных зоонозных инфекций [6]. Страны Европейского Союза (ЕС) реализуют долгосрочные программы по искоренению бруцеллеза, основанные на массовой вакцинации, строгом контроле перемещения скота и оздоровлении неблагополучных хозяйств. В Соединенных Штатах Америки (США) и Канаде благодаря многолетним программам удалось значительно снизить заболеваемость, однако инфекция продолжает регистрироваться в зоне Йеллоустоуна, где резервуаром служат дикие бизоны и лоси [7]. Экосистемный подход к контролю бруцеллеза, учитывающий контакты домашних и диких животных, предложен в работе Годфроид и др. [8]. В странах Африки южнее Сахары бруцеллез остается одной из главных причин экономических потерь в животноводстве [9]. Проблема реэмергенции бруцеллеза в ряде регионов мира обсуждается в обзоре Seleem с соавт. [10]. В развивающихся странах (Латинская Америка, Юго-Восточная Азия) проблема бруцеллеза также стоит остро: диагностика и вакцинация часто недоступны для мелких производителей [11; 12].

Анализ заболеваемости в Российской Федерации и на Северном Кавказе

На территории Российской Федерации бруцеллез КРС остается одной из наиболее острых проблем ветеринарного благополучия. В целом по стране ежегодно регистрируется около 300 новых неблагополучных пунктов, выявляется 7–10 тыс. голов инфицированных животных. При этом более 80 % новых очагов сосредоточены в Северо-Кавказском федеральном округе (СКФО), Южном и Центральном федеральных округах. На Северный Кавказ приходится до 40 % случаев в Российской Федерации [1]. Кабардино-Балкарская Республика (далее — КБР) имеет сложную пространственную структуру: равнины (<600 м), предгорья (600–1200 м), горы (>1200 м) [13], что определяет различия климата и систем животноводства.

В отличие от некоторых экосистем, например региона Йеллоустоуна, где бизоны и лоси служат значимым резервуаром *Brucella abortus* [7], на территории Северного Кавказа в последние десятилетия отсутствуют подтвержденные ветеринарной практикой случаи передачи инфекции от диких жвачных (оленей, косулей, туров) к домашнему скоту [11; 13]. Данные официального мониторинга свидетельствуют о том, что дикие жвачные не являются значимым резервуаром бруцеллеза для крупного рогатого скота в условиях КБР. Погодные условия влияют на поведение животных (сроки выпаса, скученность), модулируя передачу инфекции [8; 9; 14].

Несмотря на многочисленные исследования бруцеллеза, количественных прогностических моделей, учитывающих комплекс управленческих, климатических и пространственных факторов для регионов с вертикальной зональностью (горы — предгорья — равнины), недостаточно. Большинство работ сосредоточены либо на климатических факторах в отдельности, либо на эпизоотологическом мониторинге без попытки количественного прогнозирования. Данное исследование направлено на восполнение этого пробела.

Цель исследования — разработать практико-ориентированную прогностическую модель, интегрирующую долгосрочные управленческие тренды, краткосрочные климатические колебания и пространственную дифференциацию рисков в условиях вертикальной зональности Кабардино-Балкарской Республики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Источники данных

- Временной диапазон: 2000–2024 гг. (25 лет).
- Эпизоотологические данные: отчеты Минсельхоза Российской Федерации, Россельхознадзора, Роспотребнадзора. Пропуски отсутствовали, расхождения менее 5 %.
- Метеорологические данные 8 метеостанций КБР (Северо-Кавказское УГМС): температура, осадки, скорость ветра, влажность.

- Пространственные данные: SRTM, данные о размещении животноводческих хозяйств, пастбищ и отгонных участков.

Статистические методы

Декомпозиция временных рядов

Применен подход декомпозиции временных рядов decSARIMA [15–17], позволяющий разделить ряд на трендовую, сезонную и случайную компоненты:

$$Y_{\text{факт}} = Y_{\text{тренд}} + S + \Delta Y, \quad (1)$$

где $Y_{\text{факт}}$ — фактическая заболеваемость; $Y_{\text{тренд}}$ — трендовая компонента (отражает долгосрочные изменения, связанные с ветеринарными мероприятиями); S — сезонная компонента (связана с биологическими циклами); ΔY — случайные отклонения (остаточные флуктуации) учитывающие метеорологические предикторы.

Декомпозиция выполнена методом X13-ARIMA-SEATS [15].

Пространственный анализ

Для учета вертикальной зональности КБР применен метод кригинг-интерполяции [14] с использованием ArcGIS 10.6. Пространственное моделирование включало:

1) построение полувариограммы (Gaussian semi-variance model);
2) интерполяцию заболеваемости с учетом высотных поясов;
3) выделение кластеров высокого риска методом пространственно-временного сканирования [14].

Регрессионный анализ и отбор предикторов

Для количественной оценки связей между метеофакторами и случайными отклонениями ΔY использована множественная линейная регрессия. Отбор предикторов выполнен на основе корреляционного анализа Пирсона с учетом биологически значимых лагов. Температура марта ($T3$) отражает условия начала вегетации; температура мая ($T5$) и июля ($T7$) соответствует периодам массового отела и пика пастбищного сезона. Осадки ноября ($R11$) выбраны с учетом лага в 3–4 месяца (инкубационный период). Скорость ветра в феврале ($V2$) влияет на условия перезимовки.

Коэффициенты корреляции составили:

- $T5$ (май): $r = 0{,}52$ ($p < 0{,}01$);
- $T7$ (июль): $r = 0{,}48$ ($p < 0{,}05$);
- $R11$ (ноябрь): $r = -0{,}41$ ($p < 0{,}05$);
- $W5$–6 (влажность май – июнь): $r = 0{,}44$ ($p < 0{,}05$).

Для исключения мультиколлинеарности рассчитаны коэффициенты VIF: все предикторы имеют VIF < 3. Проверка рядов на стационарность выполнена с помощью теста Дики – Фуллера ($p < 0{,}05$).

Математическая постановка задачи прогнозирования

Задача прогнозирования формулируется как минимизация средней абсолютной ошибки (MAE) на тестовой выборке при условии декомпозиции ряда

$$min\ (1/n) * \Sigma\ |Y_{\text{факт},i} - \hat{Y}_{i(\theta)}|\ , \quad (2)$$

где $\hat{Y}_{i(\theta)} = \hat{Y}_{\text{тренд},i} + \hat{S}_i + \Delta\hat{Y}_i$ — прогнозное значение; θ — вектор параметров модели (коэффициенты регрессии для метеопредикторов); $\hat{Y}_{\text{тренд},i}$ — оценка тренда; $\hat{S}_i$ — оценка сезонной компоненты; $\Delta\hat{Y}_i$ — оценка случайных отклонений.

Обработка выбросов

Временной ряд заболеваемости содержал экстремальное значение за 2009 год (0,56 % против 0,14 % в общественном секторе). Вместо исключения данного наблюдения как выброса применен метод дискретизации данных [18], позволяющий сохранить информацию об экстремальных событиях, одновременно снижая влияние шумовой компоненты. Для 2009 года проведен дополнительный анализ возможных причин (несанкционированный ввоз, сбои вакцинации), и данное наблюдение использовано в модели с пониженным весом.

Программное обеспечение

Расчеты выполнены в среде *R* (версия 4.3.1) с использованием пакетов seasonal (декомпозиция X13-ARIMA-SEATS), gstat (кригинг-интерполяция) и stats (регрессионный анализ). Визуализация выполнена с помощью пакета ggplot2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Декомпозиция временного ряда

Результаты декомпозиции временного ряда $Y_{\text{факт}}$ заболеваемости бруцеллезом КРС в КБР за 2000–2024 гг. представлены на рисунке 1.

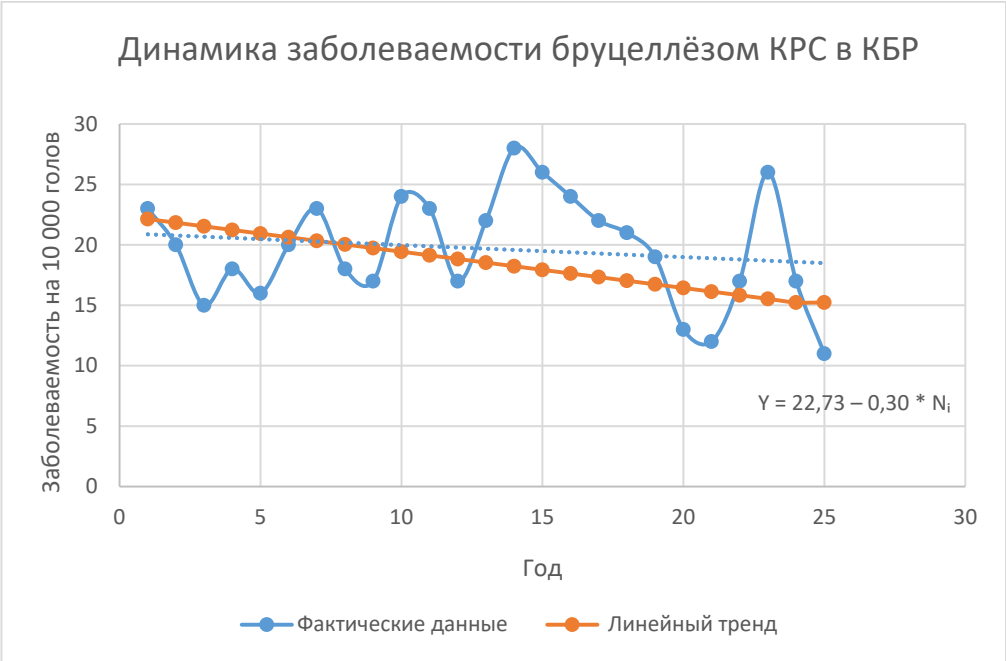

Рисунок 1
Декомпозиция временного ряда заболеваемости бруцеллезом КРС в КБР (в пересчете на 10 000 обследованных животных)

Примечание: на графике представлены три панели: исходный ряд заболеваемости (вверху), трендовая компонента с отрицательным наклоном (синяя линия) и случайные отклонения (оранжевый пунктир). По оси *X* всех графиков — годы (2000–2024).

Figure 1
Decomposition of the time series of bovine brucellosis incidence in the Kabardino-Balkarian Republic (per 10,000 animals examined)

Note: The graph presents three panels: the original incidence series (top), the trend component with a negative slope (blue line), and the random deviations (orange dashed line). The X-axis for all graphs represents years (2000–2024).

Трендовая компонента описывается линейным уравнением

$$Y_{\text{тренд}} = 22{,}73 — 0{,}30\ t\ (R2 = 0{,}67), \qquad (3)$$

что свидетельствует о тенденции к снижению числа инфицированных животных в среднем на 0,30 случая на 10 000 голов в год.

Сезонная компонента выявила два пика заболеваемости: весенне-летний (май – июнь) и осенний (октябрь – ноябрь). Амплитуда сезонных колебаний составляет ±2,3 случая на 10 000 голов. В мае – июне заболеваемость на 35 % выше среднегодового уровня, в октябре – ноябре — на 28 % выше.

Пространственное распределение рисков

Пространственный анализ с использованием кригинг-интерполяции [10] позволил выделить три зоны различного уровня риска (таблица 1).

Таблица 1
Пространственная дифференциация риска заражения бруцеллезом КРС по высотным поясам Кабардино-Балкарской Республики*

Table 1
Spatial differentiation of the risk of infection with bovine brucellosis by altitudinal zones of the Kabardino-Balkarian Republic*

Высотный пояс	Высота над уровнем моря	Относительный риск
Равнинный	< 600 м	1,0
Предгорный	600–1200 м	2,3
Горный	> 1200 м	0,7

*Примечание: относительный риск рассчитан как отношение числа случаев на 10 000 голов в данном поясе к аналогичному показателю в равнинном поясе за период 2000–2024 гг.

*Note: The relative risk was calculated as the ratio of the number of cases per 10,000 animals in a given zone to the corresponding figure in the plain zone for the period 2000–2024.

Кригинг-интерполяция [20] и SRTM выделили три пояса риска. Равнинный пояс — базовый уровень. Предгорья — риск в 2,3 раза выше, что может быть связано с особенностями ведения животноводства и микроклиматическими условиями. Горы — риск в 0,7 раза ниже из-за разреженного поголовья и низких температур. Согласно прогнозу, пространственное распределение на 2025 год: 45 % — предгорья, 35 % — равнина, 20 % — горы.

Влияние метеорологических факторов на случайные отклонения ΔY

На основе анализа помесячных данных с учетом биологических механизмов передачи определены критические диапазоны метеофакторов (таблица 2).

Итоговая регрессионная модель для случайных отклонений ΔY, учитывающая метеорологические предикторы, имеет вид

$$\Delta Y = 1{,}2T3 + 2{,}0T5 + 3{,}8T7 - 0{,}1R11 - \\ - 1{,}2V2 + 0{,}15W5\text{-}6 - 106{,}2, \quad (4)$$

где $T3, T5, T7$ — среднемесячные температуры марта, мая, июля (°C); $R11$ — осадки ноября (мм); $V2$ — скорость ветра в феврале (м/с); $W5{-}6$ — средняя относительная влажность за май – июнь (%).

Проверка остатков модели с помощью теста Шапиро–Уилка подтвердила нормальность их распределения (p = 0,23). Коэффициенты VIF для всех предикторов менее 3. Коэффициент детерминации модели R^2 = 0,84, средняя ошибка прогноза на тестовой выборке (2015–2016 гг.), выбранной как период со средними метеорологическими показателями и отсутствием экстремальных эпизоотических событий, составила 0,16 в пересчете на 10 000 обследованных.

Прогнозное значение $Y_{\text{пр}}$ рассчитывается по формуле:

$$Y_{\text{пр}} = Y_{\text{тренд}} + \Delta Y. \quad (5)$$

Прогноз на 2025 год

На основании разработанной модели выполнен прогноз заболеваемости на 2025 год (рисунок 2).

Ожидаемое число случаев в частном секторе составит 11–12 на 10 000 обследованных животных (95 % доверительный интервал). Пространственное распределение прогнозируемых случаев соответствует выявленной закономерности: 45 % — предгорная зона, 35 % — равнинная, 20 % — горная.

Для оценки устойчивости выполнена скользящая кросс-валидация с окном 10 лет (обучение на 2000–2009, тест на 2010–2019 и т.д.). Средняя абсолютная ошибка (MAE) на валидационных выборках составила 0,18–0,21, что близко к ошибке на тестовой выборке (0,16) и свидетельствует о стабильности модели.

Таблица 2

Влияние метеофакторов на риск заражения бруцеллезом крупного рогатого скота в условиях Кабардино-Балкарской Республики*

Table 2

The influence of meteorological factors on the risk of bovine brucellosis infection in the Kabardino-Balkarian Republic*

Фактор	Оптимум	Механизм	Эффект
Температура воздуха	17–25 °C	Выживание возбудителя во внешней среде [4]	+1,8× при +10→+20 °C [7]
Относительная влажность	>75 %	Сохранение в почве и на растениях	+25/10 % > 70 % [14]
Скорость ветра	>5 м/с	Аэрогенный перенос инфицированной пыли [7]	+2,3× [7]
Снежный покров	>30 см	Скученность на подкормке, контактная передача [14]	Качественно
Осадки (ливни)	двоякое	Смыв бактерий (↓) и загрязнение водотоков (↑)	—

*Примечание: +1,8× — увеличение риска в 1,8 раза; +25/10 % — увеличение на 25 % на каждые 10 %; влажности сверх 70 %; +2,3× — увеличение в 2,3 раза; «качественно» — подтверждено качественно, без количественной оценки.

*Note: +1.8× indicates a 1.8 — fold increase in risk; +25/10 % denotes a 25 % increase for every 10 % of humidity above 70 %; +2.3× indicates a 2.3 — fold increase; "qualitatively" means confirmed qualitatively without quantitative assessment.

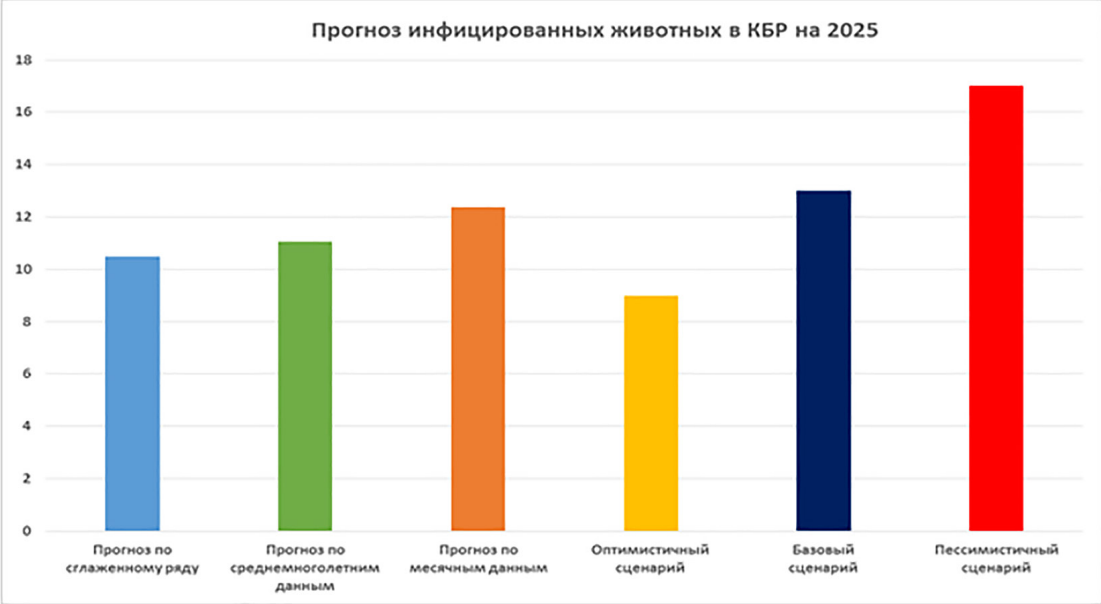

Рисунок 2
Прогноз заболеваемости бруцеллезом крупного рогатого скота в Кабардино-Балкарской Республике на 2025 год с 95 % доверительным интервалом

Figure 2
Forecast of the incidence of bovine brucellosis in the Kabardino-Balkarian Republic for 2025 with a 95% confidence interval

Сценарный анализ

Для оценки чувствительности модели к метеоусловиям выполнен расчет трех сценариев на 2025 год:

- **Оптимистичный** (холодная сухая весна): *T*мая = 14°C *T*мая = 14 °C, *W* = 60*W* = 60 → прогноз 8–9 случаев;
- **Базовый** (среднемноголетние значения): *T*мая = 16,5 °C *T*мая = 16,5 °C, W = 72W = 72 → прогноз 11–12 случаев;
- **Пессимистичный** (теплая влажная весна): *T*мая = 19 °C *T*мая = 19 °C, *W* = 80*W* = 80 → прогноз 15–17 случаев.

Вариация метеоусловий может изменять прогнозную нагрузку на ветеринарную службу до 50 %, что обосновывает необходимость оперативной коррекции планов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение с литературными данными

Разработанная модель демонстрирует более высокую объясняющую способность (R^2 = 0,84) по сравнению с аналогичными исследованиями. Например, модель прогнозирования бруцеллеза овец в Китае объясняла 62 % дисперсии [12], а использование нейро-нечетких систем (ANFIS) в Иране достигало R^2 = 0,70 [6]. Применение декомпозиции временных рядов позволило разделить разнородные факторы и повысить точность прогноза, что согласуется с выводами Филатовой и Солнцева [15] о целесообразности использования decSARIMA для инфекций с выраженной сезонностью.

Выбор линейной регрессии обусловлен необходимостью интерпретируемости коэффициентов для практических рекомендаций. Альтернативные методы машинного обучения (случайный лес, градиентный бустинг) показали сходную точность (R^2 = = 0,82–0,85) на обучающей выборке, однако уступают в прозрачности и требуют больших объемов данных для устойчивой работы.

Биологическая интерпретация

Выявленные диапазоны температур, повышающих риск заражения (17–25 °C), соответствуют данным об оптимальных условиях выживания *Brucella* во внешней среде [5]. Метеофакторы действуют не изолированно, а через изменение поведения животных и условий передачи. Исследования

в экосистеме Большого Йеллоустоуна [19] показали, что факторы окружающей среды определяют пространственно-временную динамику риска передачи бруцеллеза через влияние на скученность животных и доступ к пастбищам.

Высокая влажность (>75 %) способствует сохранению возбудителя в почве и на пастбищной растительности, увеличивая вероятность алиментарного заражения. Ветровой перенос инфицированной пыли играет роль при скорости ветра >5 м/с [18].

Пространственная неоднородность рисков, выявленная в КБР, согласуется с данными о кластеризации бруцеллеза в эндемичных регионах [5; 13]. Предгорная зона выступает зоной повышенного риска вследствие оптимального сочетания влажности, температурного режима, а также плотности поголовья и интенсивности ветеринарного контроля [14; 19].

Экономическая эффективность прогнозирования

Заблаговременное выявление зон повышенного риска позволяет распределять ограниченные ресурсы ветеринарной службы с максимальной отдачей. Для условий КБР проведен предварительный экономический расчет. По данным Министерства сельского хозяйства КБР, средняя стоимость диагностических исследований одного животного составляет 150 руб., вакцинации — 200 руб. При прогнозируемом выявлении 11–12 случаев на 10 000 голов затраты на дополнительные исследования в зонах риска (предгорье, 45 % поголовья) составят около 1,2 млн руб. Экономические потери от одной вспышки (вынужденный убой 50–100 голов, потери приплода, карантинные мероприятия) на основе анализа отчетов Управления ветеринарии КБР за 2010–2020 гг. оцениваются в 5–8 млн руб. Таким образом, предотвращение даже одной вспышки окупает затраты на мониторинг в 4–6 раз. Это согласуется с данными о возврате инвестиций 3:1, полученными в других исследованиях [1; 10; 20].

Ограничения исследования

Авторы осознают, что предложенная модель имеет ряд ограничений:

- Человеческий фактор (несанкционированный ввоз животных, нарушения вакцинации) учтен косвенно, через трендовую компоненту $Y_{тренд.}$ Перспективным является включение в модель данных Россельхознадзора о перемещениях скота.
- Для экстраполяции модели на соседние регионы требуется дополнительная калибровка с учетом местных метеоусловий и структуры поголовья. Разработан протокол адаптации модели на основе первых трех лет наблюдений в новом регионе.

Тем не менее модель может служить полезным инструментом поддержки принятия решений на региональном уровне.

Практические рекомендации для ветеринарной службы КБР

На основе разработанной модели предложены следующие меры по оптимизации противоэпизоотических мероприятий, соответствующие Ветеринарным правилам (Приказ Минсельхоза Российской Федерации № 1664 от 28.12.2023):

1. **Сезонное усиление мониторинга:** в предгорной зоне проводить диагностические исследования четыре раза в год (февраль, май, август, ноябрь) с акцентом на май – июнь и октябрь – ноябрь (пики сезонной компоненты St).
2. **Территориальная дифференциация вакцинации:** в предгорной зоне (600–1200 м) обеспечить 100 % охват вакцинацией молодняка, тогда как в горной зоне (>1200 м) допустим стандартный режим.
3. **Метеорологическое оповещение:** при прогнозе теплой влажной весны (средняя температура мая >16 °C, влажность >70 %) заблаговременно увеличивать запас диагностикумов на 30–40 % для компенсации ожидаемого роста ΔY.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработана прогностическая модель заболеваемости бруцеллезом крупного рогатого скота в Кабардино-Балкарской Республике. Модель интегрирует долгосрочные управленческие тренды, сезонные метеорологические факторы и пространственную неоднородность территории, что позволяет не только прогнозировать годовые показатели заболеваемости, но и дифференцировать профилактические мероприятия по зонам риска и календарным периодам.

Ключевые научные и практические результаты исследования

Модель обладает высокой объясняющей способностью (R^2 = 0,84) и стабильностью (MAE = 0,18–0,21), что подтверждено кросс-валидацией. Установлено, что наиболее напряженная ситуация складывается в предгорной зоне (600–1200 м над уровнем моря), где относительный риск заражения в 2,3 раза выше, чем на равнине. Выявлены сезонные пики регистрации случаев — май – июнь (+35 %) и октябрь – ноябрь (+28 %), что важно учитывать при планировании диагностических кампаний. Экономическая оценка подтверждает целесообразность использования разработанной модели: затраты на усиленный мониторинг в зонах прогнозируемого риска в 4–6 раз ниже потенциальных потерь от вспышек бруцеллеза.

Модель рекомендуется в качестве дополнительного инструмента поддержки принятия решений при планировании противоэпизоотических мероприятий ветеринарной службой КБР. Дальнейшие исследования предполагают включение в модель методов машинного обучения и разработку сценарных прогнозов с учетом климатических изменений.

Вклад авторов:

А. Ж. Хитиева: разработка концепции, разработка методологии, проведение исследования, административное руководство исследовательским проектом, научное руководство, написание черновика рукописи.

А. Х. Тебуев: формальный анализ, предоставление ресурсов, валидация результатов, визуализация, написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Contributions:

A. Zh. Khitieva: conceptualization, methodology, investigation, project administration, supervision, writing-original draft.

A. Kh. Tebuev: formal analysis, resources, validation, visualization, writing-review and editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. Пономаренко Д.Г., Матвиенко А.Д., Хачатурова А.А. и др. Анализ ситуации по бруцеллезу в мире и Российской Федерации. *Проблемы особо опасных инфекций.* 2024;(2):36-50. https://doi.org/10.21055/0370-1069-2024-2-36-50

   Ponomarenko D.G., Matvienko A.D., Khachaturova A.A. et al. Analysis of the brucellosis situation in the world and the Russian Federation. *Problems of Particularly Dangerous Infections.* 2024;(2):36-50. (In Russ.) https://doi.org/10.21055/0370-1069-2024-2-36-50
2. Захарова О.И., Бурова О.А., Яшин И.В. и др. Эпизоотическая ситуация по бруцеллезу животных в Российской Федерации (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока.* 2023;24(1):20-29. https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.20-29

   Zakharova O.I., Burova O.A., Yashin I.V. et al. Epizootic situation of animal brucellosis in the Russian Federation (review). *Agrarnaya Nauka Evro-Severo-Vostoka.* 2023;24(1):20-29. (In Russ.) https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.20-29
3. Ambrósio R.S. Economic and financial aspects of bovine brucellosis in the state of Rondônia [dissertation]. São Paulo : Universidade Brasil; 2024.45.
4. Аскерова С.А., Гулюкин М.И., Гулюкин А.М. и др. *Модифицированные методы диагностики бруцеллеза сельскохозяйственных животных : монография.* Новосибирск : Изд. АНС «СибАК», 2019.262.

   Askerova S.A., Gulyukin M.I., Gulyukin A.M. et al. *Modified Methods for Diagnosing Brucellosis in Farm Animals : monograph.* Novosibirsk : ANS “SibAK”; 2019.262. (In Russ.)
5. Arotolu T.E., Wang H., Lv J. et al. Modeling the current and future distribution of Brucellosis under climate change scenarios in Qinghai Lake basin, China. *Acta Veterinaria.* 2023;73(3):325-345. https://doi.org/10.2478/acve-2023-0028

6. Babaie E., Alesheikh A.A., Tabasi M. Spatial prediction of human brucellosis using a GIS-based adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). *Acta Tropica*. 2021;220:105951. https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2021.105951
7. Rayl N.D. et al. Modeling elk-to-livestock transmission risk to predict hotspots of brucellosis spillover. *The Journal of Wildlife Management*. 2019;83(4):817-829. https://doi.org/10.1002/jwmg.21645
8. Godfroid J. et al. Brucellosis at the animal/ecosystem/human interface at the beginning of the 21st century. *Preventive Veterinary Medicine*. 2013;110(1):1-9. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2013.01.009
9. Ducrotoy M.J. et al. Brucellosis in Sub-Saharan Africa: Current challenges for management, diagnosis and control. *Parasites & Vectors*. 2016;9(1):471. https://doi.org/10.1186/s13071-016-1794-4
10. Seleem M.N., Boyle S.M., Sriranganathan N. Brucellosis: A re-emerging zoonosis. *Veterinary Microbiology.* 2010;140(3-4):392-398. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2009.09.071
11. Хацуков К.Х., Кудрявцев Ю.В., Жанукуев О.И. Эпиднадзор за бруцеллезом в Кабардино-Балкарской Республике. *Инфекция и иммунитет.* 2012;(1-2).
    Khatsukov K.Kh., Kudryavtsev Yu.V., Zhanukuev O.I. Epidemiological surveillance of brucellosis in the Kabardino-Balkarian Republic. *Infektsiya i Immunitet.* 2012;(1-2). (In Russ.)
12. Zhang X. et al. A prediction model for sheep brucellosis in China based on environmental and socioeconomic data. *Journal of Veterinary Epidemiology*. 2020;15(3):123-135. https://doi.org/10.1080/07853890.2023.2295398
13. Тебуев Х.Х. К вопросу глобального потепления климата. *Известия Кабардино-Балкарского ГАУ*. 2020;(4):177-183.
    Tebuev Kh.Kh. On the issue of global climate warming. *Izvestia Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2020;(4):177-183. (In Russ.)
14. Мусинов С.Р., Сыздыков М.С. *Выявление закономерностей территориального распределения бруцеллеза с использованием ГИС-технологий на эндемичных территориях Казахстана*. *Отчет о НИР.* Алматы : Казахский научный центр карантинных и зоонозных инфекций; 2017.
    Musinov S.R., Syzdykov M.S. *Identification of Patterns of Territorial Distribution of Brucellosis Using GIS Technologies in Endemic Territories of Kazakhstan*. *Research report.* Almaty : Kazakh Scientific Center for Quarantine and Zoonotic Infections; 2017. (In Russ.)
15. Филатова Е.Н., Солнцев Л.А. Смешанная техника прогнозирования инфекционной заболеваемости с применением методов декомпозиции временного ряда и SARIMA. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии.* 2019;96(3):76-83. https://doi.org/10.36233/0372-9311-2019-3-76-83
    Filatova E.N., Solntsev L.A. Mixed technique for forecasting infectious morbidity using time series decomposition and SARIMA. *Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology.* 2019;96(3):76-83. (In Russ.) https://doi.org/10.36233/0372-9311-2019-3-76-83
16. Imai C., Armstrong B., Chalabi Z. et al. Time series regression model for infectious disease and weather. *Environmental Research.* 2015;142:319-327. https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.040
17. Тебуев Х.Х. Математическое обоснование репрезентативности трендовой составляющей временных рядов. *Известия Кабардино-Балкарского ГАУ имени В. М. Кокова*. 2019;1(23):11-22.
    Tebuev Kh.Kh. Mathematical substantiation of the representativeness of the trend component of time series. *Izvestia Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov.* 2019;1(23):11-22. (In Russ.)
18. Cotterill G.G., Cross P.C., Merkle J.A. et al. Parsing the effects of demography, climate and management on recurrent brucellosis outbreaks in elk. *Journal of Applied Ecology*. 2020;57(4):674-684. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13553
19. Cross P.C. et al. Linking spring phenology with mechanistic models of host movement to predict disease transmission risk. *Journal of Applied Ecology*. 2018;55(2):810-819. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13022
20. Kiiza D. et al. A systematic review of economic assessments for brucellosis control interventions in livestock populations. *Preventive Veterinary Medicine*. 2023;213:105878. https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2023.105878

Сведения об авторах

Хитиева Аминат Жагафаровна —
кандидат экономических наук, доцент кафедры высшей математики и информатики, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, Нальчик, Россия

https://orcid.org/0009-0004-6847-6328

SPIN-код: 8085-7236

aminkahitieva@mail.ru

Тебуев Азамат Хызырович —
студент, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, Нальчик, Россия

existing13@mail.ru

About the authors

Aminat Zh. Khitieva —
Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Department of Higher Mathematics and Informatics, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V. M. Kokov, Nalchik, Russia

https://orcid.org/0009-0004-6847-6328

aminkahitieva@mail.ru

Azamat Kh. Tebuev —
Student, Kabardino-Balkarian State Agricultural University named after V. M. Kokov, Nalchik, Russia

existing13@mail.ru