

ЗАХАРОВА ОЛЬГА ИГОРЕВНА

**ЭПИЗООТОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И РАЗРАБОТКА
ПРОГНОСТИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИ
ИНФЕКЦИОННЫХ БОЛЕЗНЯХ ЖИВОТНЫХ**

4.2.3 Инфекционные болезни и иммунология животных

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата ветеринарных наук

Владимир 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ») и федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии» (ФГБНУ ФИЦВиМ).

**Научный
руководитель:**

Коренной Федор Игоревич,
кандидат географических наук

**Официальные
оппоненты:**

Козыренко Ольга Вячеславовна, доктор ветеринарных наук, профессор, профессор кафедры эпизоотологии им. Урбана В.П. ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургского государственного университета ветеринарной медицины» (ФГБОУ ВО СПбГУВМ), г. Санкт-Петербург;

Падило Лариса Павловна, кандидат биологических наук, доцент кафедры «Болезни животных и ветеринарно-санитарная экспертиза» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», г. Саратов

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина», г. Москва

Защита состоится в часов *мск* на заседании диссертационного совета 36.1.002.01 при ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ»), г. Владимир, мкрн. Юрьевец, ул. Гвардейская 6.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «ВНИИЗЖ» Полный текст диссертации, автореферата и отзыв научного руководителя размещены на официальном сайте ФГБУ «ВНИИЗЖ» www.artiah.ru

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук

Жбанова Татьяна Валентиновна

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время проблема новых и возвращающихся инфекций рассматривается как одна из глобальных угроз человечеству.

Применение инновационных методов, подходов и инструментов в ветеринарной эпизоотологии с целью создания универсальных алгоритмов прогнозирования вспышек болезней животных представляет собой передовое направление. Методы статистического анализа, основанные на моделировании, применяются для прогнозирования эпизоотической ситуации в краткосрочной и долгосрочной перспективе [Белименко В. В., 2018; Заболоцкая Т.В. и др., 2024; Макаров В.В. и др., 2019].

Всемирная организация здравоохранения отмечает рост числа случаев заболеваемости лептоспирозом как среди людей, так и животных, что вызывает обеспокоенность и признание болезни общей проблемой во всем мире.

В последние десятилетия наблюдается тенденция к увеличению частоты случаев инфицирования, что обусловлено как природными, так и антропогенными факторами [Корякина Л. П. и др., 2021; Пруцаков С.В. и др., 2019].

Основными источниками инфекции для человека являются грызуны (крысы и мыши), насекомоядные млекопитающие (землеройки и ежи), а также сельскохозяйственные (крупный рогатый скот, свиньи, овцы, козы, лошади) и домашние животные-компаньоны (собаки и кошки) [Ананьина Ю. В., 2017].

Выделяют несколько основных прямых путей передачи патогенных лептоспир здоровым животным. Прямой контакт с мочой заражённых животных является главным и наиболее частым способом передачи инфекции. Вертикальный путь, при котором лептоспиры передаются от матери к плоду через плаценту также представляет серьёзную опасность для внутриутробного развития потомства. Трансмиссивный путь менее распространён, он также имеет значение и осуществляется через укусы заражённых кровососущих насекомых.

Опосредованная передача лептоспир происходит через взаимодействие восприимчивых животных с контаминированными предметами или объектами окружающей среды. Вероятность инфицирования зависит от различных факторов, таких как биологические свойства возбудителя, климатические, социально-демографические, и другие [Василенко Н.Ф. с соавт., 2021; Sykes J.E. et al., 2022].

Особенности проявления и распространения лептоспироза среди животных Арктики представляет собой малоисследованную область, что обусловило выбор нашего направления по разработке прогностических моделей инфекции [Алферина Е.Н. с соавт., 2024; Рейс Ж., Зайцева Н.В., Спенсер П., 2022].

Африканская чума свиней (АЧС) – высококонтагиозное вирусное заболевание, наносящее огромный экономический ущерб свиноводству и продовольственной безопасности многих стран мира.

Наряду с отсутствием средств специфической профилактики, важным фактором распространения вспышек африканской чумы свиней является устойчивость возбудителя к физико-химическим воздействиям. Благодаря этому вирус может длительно сохранять жизнеспособность на объектах ветеринарно-

санитарного надзора, а также в секретах и экскретах инфицированных животных. Вовлечение в эпизоотический процесс кабанов может приводить к снижению патогенности и сохранению вируса в природе [Чернов А.Н. et al., 2023; Власов М.Е., 2021; Оганесян А.С. et al., 2024; Blome S. et al., 2023; Gervasi V. et al., 2021, 2022; Frant M. et al., 2022].

Бешенство – зоонозная болезнь животных и человека, является одной из самых серьёзных проблем в ветеринарии и медицине. Каждый год от этой болезни умирает свыше 50 000–60 000 человек в мире.

Бешенство с средней полосе России характеризуется циркуляцией вируса в дикой природе, особенно среди лисиц, енотовидных собак, песцов, волков, шакалов и других животных, представляющих резервуар инфекции [Полещук Е.М., Сидоров Г.Н., Савкина Е.С., 2023; Бельчихина А.В., Караулов А.К., 2016]. Прогнозирование числа случаев бешенства у диких и домашних животных помогает ветеринарным службам разработать соответствующие профилактические мероприятия, учитывая пространственно-временные особенности эпизоотического процесса [Шишков А.В., 2021; Парошин А.В. et al., 2018; Парошин А.В. et al., 2018].

Степень разработанности проблемы. Современные информационные технологии и математическое моделирование позволяют автоматизировать сбор, анализ и прогнозирование эпизоотической ситуации. Однако качество прогнозов напрямую зависит от полноты и достоверности данных [Чунин С.А., 2022; Щербаков А.В., 2024; Богданов А.И. с соавт., 2022].

В России и мире растёт спрос на краткосрочное и среднесрочное прогнозирование, адаптивные модели эпизоотического процесса. Внедряются программно-целевые системы для планирования мероприятий по профилактике и диагностике инфекционных болезней животных, электронные базы данных и автоматизация учёта эпизоотических очагов.

Также широко применяются разработки, включающие пространственные, статистические модели, а также методы машинного обучения для прогнозирования вспышек инфекционных болезней животных [Bartlow A.W. et al., 2019; Rees E.M. et al., 2021; Fountain-Jones N.M. et al., 2019]. Применяются различные методы регрессионного анализа, нейронные сети, случайные леса и другие алгоритмы [Kane M.J. et al., 2014; Andraud M. et al., 2021; Boklund A.E. et al., 2024].

В настоящее время имеются научные и практические достижения в технологиях автоматизации и анализе данных, внедряются современные технологии, но всё ещё сохраняется много нерешённых, фундаментальных и прикладных вопросов.

Анализ и прогноз крайне чувствительны к разнородности, фрагментарности и недостаточной объективности данных. Критична интеграция информации данных из разных источников (ветеринарных, лабораторных, географических), унификация их формата и стандартов. Существует ограниченная способность моделей к учёту большого числа биологических, социальных, климатических экономических и других факторов, влияющих на динамику эпизоотий, особенно в трансграничных случаях заноса инфекций. Для точности и адаптивности прогнозов требуется усовершенствование методов

валидации моделей.

Цель и задачи. Цель исследований - разработка прогностических пространственных моделей инфекционных болезней животных и проведение географического зонирования территорий в зависимости от выявленных факторов риска на примере лептоспироза, бешенства животных и африканской чумы свиней.

Для достижения цели были поставлены задачи:

1) Проанализировать различные типы прогностических моделей, используемые в прогнозировании вспышек инфекционных болезней животных и систематизировать методологические подходы;

2) Апробировать разработанные прогностические пространственные модели по инфекционным болезням животных с разными механизмами передачи инфекции:

2.1) Оценить влияние природно-климатических факторов на возникновение очагов лептоспироза животных в Республике Саха (Якутия) и провести ранжирование территории по уровню риска распространения инфекции в условиях меняющегося климата;

2.2) Выявить ключевые факторы, влияющие на распространение лептоспироза сельскохозяйственных животных в субъектах Арктического региона России, а также спрогнозировать расширение нозоареала болезни при изменении климатических условий;

2.3) Определить пространственно-временные закономерности распространения африканской чумы свиней в субъектах Российской Федерации в зависимости от факторов риска и разработать прогностические модели с учетом особенностей эпизоотического процесса среди домашних свиней и диких кабанов;

2.4) Оценить факторы, способствующие циркуляции вируса бешенства среди диких животных и провести ранжирование субъектов России по степени риска заболеваемости;

3. На основе разработанных пространственных прогностических моделей, сформировать единый алгоритм регрессионного моделирования вспышек инфекционных болезней животных.

Научная новизна. Для анализа динамики распространения лептоспироза, бешенства и африканской чумы свиней в Российской Федерации (РФ) было выполнено прогностическое моделирование в модельных регионах страны.

Регрессионные модели позволили оценить влияние факторов на эпизоотическую ситуацию и провести зонирование территорий по выявленным детерминантам болезней животных.

Впервые для субъектов Арктического региона были определены предикторы возникновения и распространения вспышек лептоспироза сельскохозяйственных животных, а также с помощью модели максимальной энтропии (MaxEnt), была установлена степень пригодности территории республики Саха (Якутия) для новых очагов болезни в условиях текущего и прогнозируемого климата.

На основе обобщенной логистической регрессии были установлены пространственные особенности возникновения африканской чумы свиней (АЧС),

характеризующие взаимосвязь зарегистрированных вспышек болезни с рядом факторов, в частности, перемещением животных и свиноводческой продукции.

Разработана прогностическая модель вспышек АЧС среди диких кабанов с применением отрицательной биномиальной регрессии, в результате которой были выявлены факторы риска, в числе которых наличие вспышек среди домашних свиней была определяющей.

Изучена динамика распространения бешенства среди диких животных с применением регрессионной модели, и установлена взаимосвязь регистрации очагов болезни от природно-климатических, популяционных факторов, в том числе объемом вакцинации.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Результаты, полученные в ходе исследований по прогностическому моделированию лептоспироза, бешенства и африканской чумы свиней, помогли улучшить понимание об эпизоотической ситуации в Российской Федерации и провести ранжирование территорий субъектов Российской Федерации по степени риска распространения очагов болезни.

Разработанные прогностические модели позволили определить основные экологические, социальные, популяционные факторы, способствующие возникновению и распространению болезней в модельных субъектах Российской Федерации. Определены территории с повышенным риском возникновения вспышек, что имеет первостепенное значение для превентивных мер и контроля распространения инфекций. Полученные данные могут быть интегрированы в разработку стратегий мониторинга и интервенций, что способствует минимизации экономических и социальных последствий, связанных с эпизоотиями особо опасных болезней животных.

Разработаны, обсуждены и утверждены на Ученом совете ФГБНУ ФИЦВиМ две методических рекомендации: «Методические рекомендации по организации и проведению противоэпизоотических мероприятий для предупреждения распространения АЧС в дикой фауне» (Протокол № 17 от 25.04.2024 г.) и «Методические рекомендации по применению статистических моделей в прогнозировании вспышек инфекционных болезней животных» (Протокол № 41 от 18.10.2024 г.).

Методология и методы исследований. Методы прогнозирования включали статистическое моделирование (применение различных типов регрессионных моделей, как обобщенная логистическая регрессия, отрицательная биномиальная регрессия, регрессии классификационного типа), метод с применением максимальной энтропии (MaxEnt), статистический анализ).

Был проведен сбор и анализ данных из различных источников, включая официальные базы информации, результаты мониторинговых исследований на наличие антител против лептоспироза животных, а также вакцинированных диких и домашних животных против бешенства. Данные по численности популяции диких животных, как кабан, лисица, полученные по запросу из ветеринарных комитетов и министерств природных ресурсов были проанализированы с помощью статистических методов в программе R.

Исследования выполнены в Информационно-аналитическом центре (ИАЦ) ФГБУ «ВНИИЗЖ», и лаборатории эпизоотологии и биоинформатики ННИВИ-

филиале ФГБНУ ФИЦВиМ в период с 2022 по 2025 гг. по темам НИР: «Разработка научно-обоснованной системы контроля инфекционных болезней животных», «Научное обеспечение совершенствования национальной системы противодействия угрозам, связанным с нотифицируемыми болезнями животных», «Разработка комплексной системы контроля инфекционных болезней животных и совершенствование методов исследования остатков запрещенных и вредных веществ в организме животных, кормах и продуктах животного происхождения («Ветеринарное благополучие»)).

Положения, выносимые на защиту:

- Моделирование инфекционных болезней животных с помощью разработки пространственных регрессионных моделей составляет методологическую основу для прогнозирования и оценки стратегий борьбы с эпизоотиями;
- Пространственно-временные закономерности распространения лептоспироза животных продемонстрировали зависимость от ряда факторов риска, таких как природно-климатические, социально-экономические и демографические условия, что позволило провести разработку прогностических моделей и ранжировать субъекты Арктического региона по степени риска заболеваемости;
- Моделирование вспышек АЧС среди домашних свиней явилось основой для прогнозирования новых неблагополучных территорий, которые определяются районами с мелкотоварным ведением свиноводства, а также интенсивностью перемещения свиней и свиноводческой продукции;
- Интродукция и интенсивность распространения АЧС среди кабанов зависят не только от плотности популяции животных, но и ряда других факторов, определяющих биобезопасность при охоте;
- Прогностическая пространственная модель очагов бешенства среди диких животных может применяться для изучения степени взаимосвязи заболевания с природно-климатическими и популяционными факторами, а также подтверждения значимости проведения вакцинальных кампаний;
- На основе апробированных прогностических моделей разработан общий алгоритм моделирования, который может быть экстраполирован на регионы со сходными климатическими и социально-демографическими условиями для формирования стратегий борьбы с инфекционными болезнями животных. Выбор модели обусловлен комплексом эпизоотологических характеристик возбудителя, определяющих механизмы передачи патогена восприимчивому хозяину.

Личный вклад соискателя. Автором диссертационной работы был проведен аналитический обзор отечественной и зарубежной литературы по изучаемой теме, а также сбор первичного материала по вспышкам инфекционных болезней животных на примере лептоспироза, бешенства и африканской чумы свиней. Автор принимал непосредственное участие в статистической обработке, анализе данных и полученных результатов моделирования. На основании полученных результатов моделирования, автором сделаны выводы и даны практические рекомендации по оптимизации противоэпизоотических профилактических мероприятий в целях недопущения заноса и распространения инфекционных болезней животных на территории субъектов Российской

Федерации. Научные исследования были опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях, что подтверждает участие автора в выполнении диссертационной работы.

Степень достоверности и апробации результатов исследований. Достоверность результатов исследования подтверждается объёмом специальных исследований (эпизоотологические, валидационные, прогностические), проведенных по утвержденным методикам, а также статистической обработкой данных. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на заседаниях методической комиссии и Ученого совета ФГБУ «ВНИИЗЖ» (2022 - 2025 гг.); представлены на XXIV международном научно-практическом форуме "Аграрная наука - сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии" (г. Якутск, 2021 г.); на Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты ветеринарной медицины на границе веков», посвященной 100-летию СибНИВИ-ВНИИБТЖ (г. Омск, 2021 г.); на VI Международной научной конференции «Достижения молодых ученых – в ветеринарную практику», посвященной 60-летию аспирантуры ФГБУ «ВНИИЗЖ» (г. Владимир, 2022 г.); доложены на КПНИ «Диагностика и мониторинг особо опасных инфекций животных, КПФНИ «Разработка вакцины против африканской чумы свиней, в том числе для перорального применения для диких кабанов» и в работе Консорциума для реализации совместных проектов, направленных на научно-технологическое развитие страны, г. Покров, 2022-2024 г.

2 СОБСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Материалы методы исследований

Прогностическая модель заболеваемости лептоспирозом животных в Республике Саха (Якутия) с применением метода экологической ниши (MaxEnt). Проведено прогнозирование пригодности территории районов республики Саха (Якутия) к возникновению вспышек лептоспироза животных. Метод позволил смоделировать вероятность распространения заболеваемости в зависимости от абиотических и биотических факторов внешней среды. Анализ основан на данных о вспышках лептоспироза животных за период с 1995 по 2019 гг. В результате составлена карта пригодности республики Саха (Якутия) для возникновения вспышек лептоспироза.

Оценка прогностической модели проводилась с помощью площади под ROC-кривой (AUC). Для выявления наиболее значимых факторов риска применялся инструмент «складного ножа» или Jackknife, основанный на последовательном исключении переменных из модели. Проверка модели проводилась методом кросс-валидации с 10 репликациями и 5000 итерациями, что обеспечило надежность результатов.

Моделирование выполнено для условий текущего и прогностического климатов. Сравнение пригодности для двух сценариев изменений климата осуществлено построением карты аномалий вспышек лептоспироза. Зонирование территорий республики выполнено на основе доли ячеек с риском выше 0,5 для каждого муниципального района, что позволяет оценить степень расширения нозоареала болезни при прогнозируемых климатических условиях.

Разработка прогностической пространственной модели на основе метода случайного леса (Random Forest) для оценки факторов риска, влияющих на заболеваемость лептоспирозом животных в Арктическом регионе России. Разработана прогностическая модель вспышек лептоспироза сельскохозяйственных животных в Арктическом регионе Российской Федерации. Смоделированы факторы окружающей среды, включая климатические переменные, построенные на основе многолетних данных метеорологических станций за период 1981–2015 гг. (текущий климат) и прогностического сценария RCP 8.5, отражающего экстремальный вариант выбросов парниковых газов, рассчитанного по модели NCM4. Учитывался коэффициент заболеваемости – G-rate, представляющий суммарное число случаев лептоспироза на единицу площади за один год.

Метод случайного леса применялся для выявления связи между коэффициентом заболеваемости и набором факторов риска. Для обучения модели было взято 1000 деревьев решений с четырьмя случайно выбранными переменными, что позволило эффективно исключить переобучение. Качество модели оценивалось с помощью коэффициента детерминации (R^2), валидации и общего прогноза заболеваемости по всему региону. Значимость вклада переменных оценивалась в процентах на основе коэффициентов Джини.

Отсутствие пространственной автокорреляции подтверждалось тестом Морана.

На основе моделирования была выполнена прогностическая оценка инцидентности лептоспироза в зависимости от текущих и прогнозируемых климатических условий. Визуализация динамики заболеваемости была осуществлена с помощью географических карт.

Выявление факторов риска возникновения очагов африканской чумы свиней в Самарской области с использованием обобщенной логистической регрессии, учитывающей перемещения свиней и свиноводческой продукции. Разработана регрессионная модель для выявления факторов риска возникновения вспышек АЧС среди домашних свиней в районах Самарской области.

Наиболее эффективная модель была подобрана методом пошагового исключения незначимых предикторов с помощью процедуры stepAIC в среде программирования R. Значимость переменных оценивалась с помощью критерия t-Стюдента. Качество соответствия модели определялось долей объясненной вариации (R^2) и коэффициентом Вальда. Тест Хосмера–Лемешоу был применен для оценки качества модели. Пространственное распределение как переменной отклика, так и остатков модели оценивалось с помощью теста на пространственную автокорреляцию.

Разработка пространственной модели выявления взаимосвязи между инцидентностью африканской чумы свиней и плотностью популяции кабанов, а также другими факторами риска в Нижегородской области. Для проверки гипотезы о том, что возникновение случаев АЧС среди кабанов связано с увеличением плотности популяции животных, был применен обобщенный логистический регрессионный анализ. Переменной результата было наличие или отсутствие вспышек болезни в популяции кабанов в районе. Определяющим

фактором была представлена плотность популяции кабана в районе за определенный временной период. Для оценки качества модели использовались такие статистические тесты, как Хосмера-Лемешова, Шапиро-Уилка на нормальность распределения остатков регрессии и локальный индекс Морана I.

Определение риска возникновения африканской чумы свиней среди кабанов в районах Нижегородской области с применением отрицательной биномиальной регрессионной модели. Оценка факторов риска АЧС диких кабанов была проведена с применением двух моделей: логистической регрессии, где переменной результата было наличие или отсутствие вспышек, и отрицательной биномиальной модели, для которой была обозначена инцидентность болезни. Подгонка моделей проводилась с помощью пошагового исключения независимых переменных для достижения наименьшего значения информационного критерия Акаике (AIC). Значимость переменных в модели оценивалась с помощью критерия t-теста Стьюдента. Качество моделей оценивалось с помощью скорректированного коэффициента детерминации (R^2), представляющего собой долю вариации, учитываемую моделью.

Моделирование инцидентности бешенства среди дикой популяции животных от факторов риска в районах Нижегородской области. В данной работе с использованием отрицательной биномиальной регрессионной модели исследовалась значимость вакцинации и других факторов, играющих важную роль в профилактике распространения бешенства среди различных видов животных – диких, домашних (собак и кошек), сельскохозяйственных и суммарно все виды животных. Модель учитывала сверхдисперсию в данных по зарегистрированным очагам болезни в разрезе районов за исследуемый период. Качество модели оценивалось коэффициентом детерминации. Пространственная кластеризация данных и остатков модели анализировались с помощью коэффициента Морана I. Результаты позволили выявить факторы риска и построить прогностическую карту вспышек бешенства, что может способствовать целенаправленной профилактике заболевания.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Эпизоотологический мониторинг инфекционных болезней животных на примере лептоспироза, бешенства и африканской чумы свиней и создание базы данных для прогностического моделирования

В результате мониторинговых исследований инфекционных болезней животных – лептоспироза сельскохозяйственных животных, бешенства и африканской чумы свиней (АЧС) – была составлена база данных, включающая сведения о зарегистрированных очагах и факторах риска. Данная база содержала информацию о локации, дате регистрации очагов, виде животных, штамме возбудителя, а также переменных, представляющих информацию о климатических условиях, социальных, популяционных характеристиках диких и домашних животных, а также мерах профилактики, включая вакцинацию и диагностические обработки.

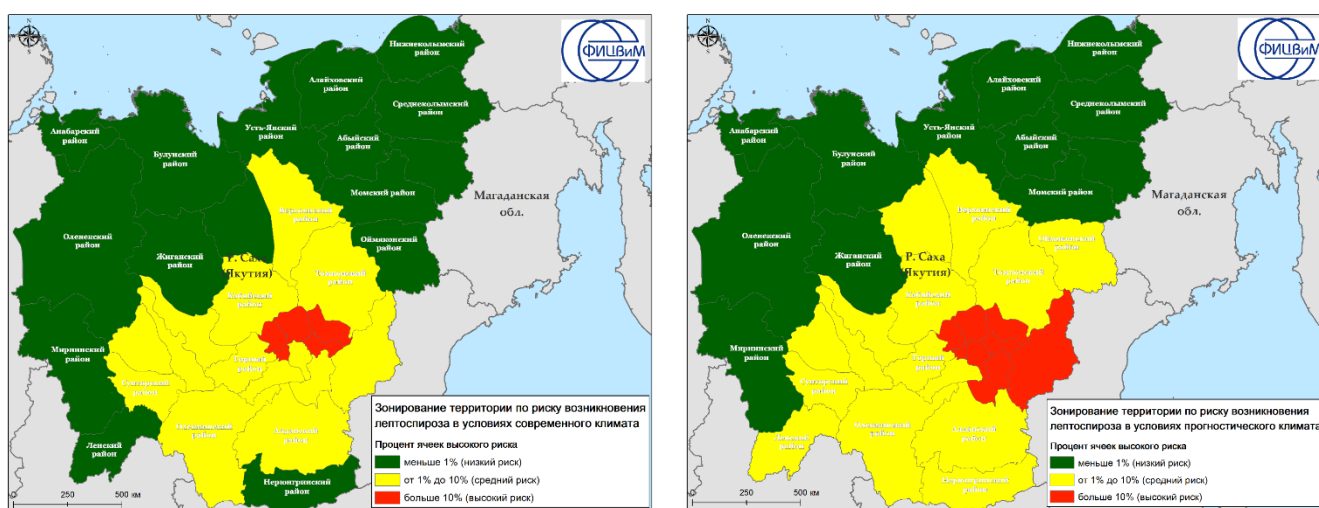
Для дальнейшего анализа и разработки прогностических моделей была осуществлена интеграция базы данных с информацией из государственных региональных ветеринарных отчетов (Россельхознадзор, ВОЗЖ) и применение

автоматизированной обработки с использованием кода программы Python. Также была осуществлена привязка вспышек болезней животных к географическим территориям с использованием ГИС инструментов (QGIS, ArcGIS) для дальнейшего моделирования.

3.2 Прогнозирование риска возникновения вспышек лептоспироза животных с помощью модели экологической ниши (MaxEnt) в республике Саха (Якутия) Российской Федерации

Моделирование показало хорошую предсказательную способность модели экологической ниши (MaxEnt), площадь под ROC кривой составила 0,930. Ключевыми факторами риска лептоспироза в республике Саха (Якутия) представлены следующими: Bio_8 - средняя температура самого влажного квартала, alt - высота над уровнем моря, land cover - земельный покров, cattle density - плотность поголовья крупного рогатого скота, soils – тип почвы, soils pH - кислотность почвы. Данные предикторы имели большое значение для географического распределения вспышек лептоспироза сельскохозяйственных животных, при этом важность перестановок составила: 10,26 %, 36,33 %, 10,82 %, 5,03 %, 2,06 и 4,15 по модели MaxEnt соответственно. Из социально экономических переменных в формировании зон риска вспышек лептоспироза животных на территории республики Саха (Якутия) основная роль принадлежала фактору плотности поголовья крупного рогатого скота, вклад в модель которого составил 7,71 %.

Ранжирование территории республики Саха (Якутия) по уровню риска возникновения очагов лептоспироза в зависимости от климатических и социально-экономических факторов определило районы с высоким риском интродукции вспышек, где необходимы усиленные меры по эпизоотологическому надзору и профилактике (рисунок 1).



(a)

(б)

Рисунок 1. Ранжирование территории республики Саха (Якутия) по степени риска лептоспироза животных для условий современного (a) и прогностического (б) климатов

К таким районам (улусам) были отнесены: Намский, Усть-Алданский, Алексеевский, Чурапчинский районы и городской округ Якутск. Для прогностического климата в зону высокого риска кроме указанных выше районов включены Медино-Кангаласский, Амгинский и Усть-Майский районы.

3.3 Прогнозирование заболеваемости лептоспирозом сельскохозяйственных животных с помощью модели случайного леса (Random Forest) на территории Арктического региона Российской Федерации

По результатам проведенных исследований в разработке прогностических моделей лептоспироза животных в Арктическом регионе, наиболее значимыми факторами риска, определяющими распределение плотности вспышек лептоспироза, были определены такие предикторы, как плотность сельскохозяйственных животных, доля пахотных земель к общей площади района, плотность населения, доля инвестиций в сельское хозяйство на единицу площади района.

Относительная значимость переменных, основанная на результатах моделирования, представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Относительная важность переменных, основанная на результатах моделирования лептоспироза животных в зависимости от факторов риска

Переменные	Процент значимости переменной, %
Плотность сельскохозяйственных животных, гол/1 км ²	24,57
Доля пахотных земель в общей площади района	24,39
Плотность населения, чел/км ²	24,09
Объем бюджетных инвестиций в сельское хозяйство на единицу площади района	10,72
Среднее число дней в году с температурой воздуха выше 0°C, дней	6,62
Среднегодовая амплитуда суточной температуры, °C	5,02
Средняя годовая температура воздуха, °C	5,00
Доля болот в общей площади района	4,95
Высота над уровнем моря, м	4,77
Годовая сумма осадков, мм	4,50
Годовая сумма осадков за период с температурой воздуха выше 0°C	4,38
Доля сельского населения	4,26
pH почвы	4,25
Доля водных объектов в общей площади района	3,94
Годовая сумма осадков за период с температурой воздуха ниже 0°C,	3,12
Объем бюджетных инвестиций в сельское хозяйство на душу населения	2,93

Было проведено обучение модели плотности очагов лептоспироза (G-rate). Результаты представили высокую степень соответствия обучающим данным

($R^2=0,94\pm0,03$; $p\leq0,001$) и умеренное соответствие тестируемым данным ($R^2=0,53\pm0,10$; $p\leq0,001$). Отмечена высокая значимость социально-экономических факторов (плотность населения, доля пахотных земель, плотность сельскохозяйственных животных и инвестиции в сельское хозяйство на единицу площади) для наблюдаемого распределения случаев лептоспироза, при этом значение климатических и ландшафтных факторов было ниже. Распределение остатков регрессии в пространственной автокорреляции не показал тенденции к кластеризации (коэффициент Морана составил - 0,003).

Экстраполяция распределения плотности случаев лептоспироза, рассчитанная для всей исследуемой области с учётом характеристик современного климата, позволила создать карту риска динамики плотности случаев болезни, которая представлена на рисунке 2.

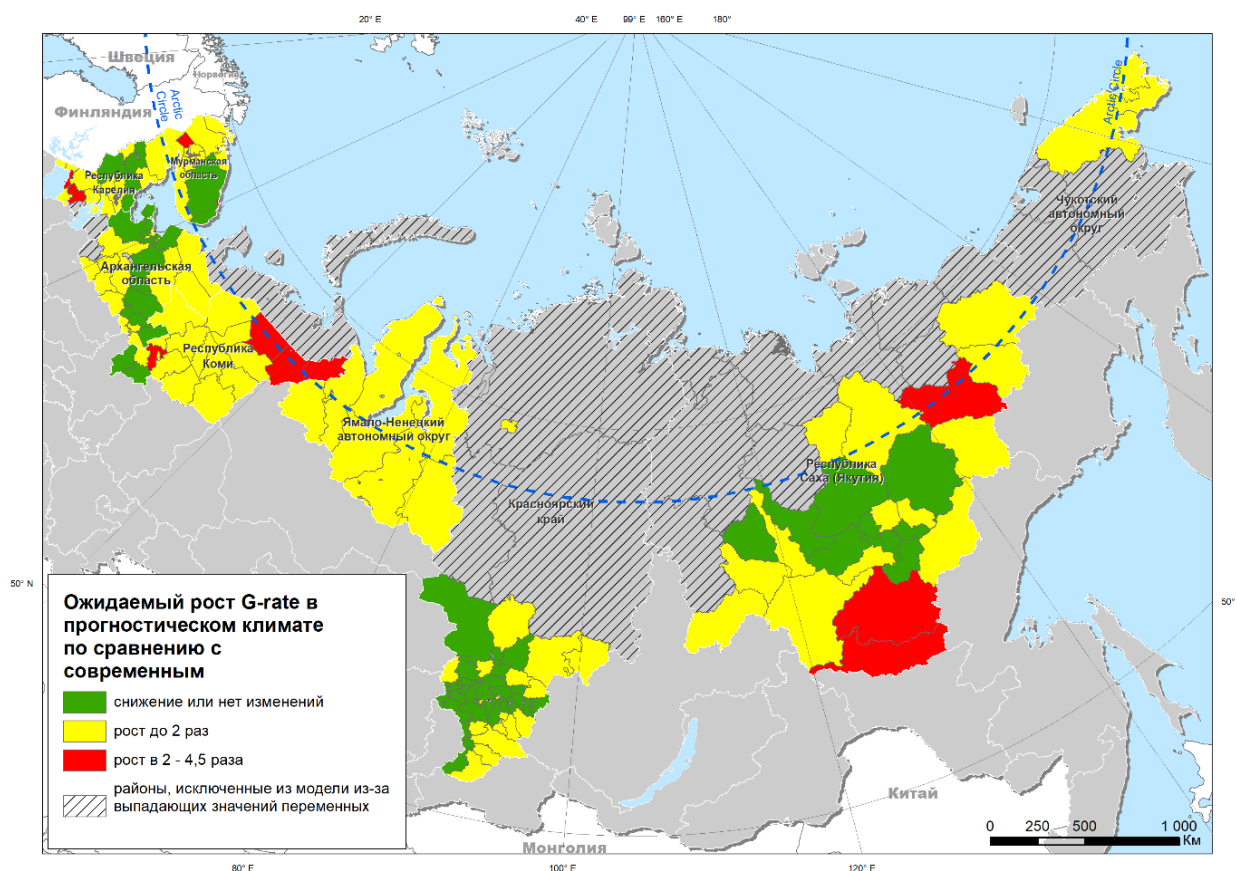


Рисунок 2. Ожидаемое изменение плотности случаев лептоспироза в прогнозируемых климатических условиях по сравнению с современным климатом

3.4 Разработка прогностической модели распространения вспышек АЧС среди домашних свиней в районах Самарской области методом обобщенной логистической регрессии

Основные факторы, определяющие возникновение вспышек АЧС у домашних свиней, включали объем ввоза свиней и продуктов из свинины из ранее неблагополучных по болезни субъектов, общую численность поголовья свиней, плотность мелких фермерских хозяйств и общие границы с неблагополучными регионами.

В таблице 2 представлены показатели метрик регрессионной модели.

Прогностическая модель, разработанная с целью определения факторов риска заболеваемости АЧС в районах Самарской области, была разработана при помощи обобщенной логистической регрессии и имела самый низкий AIC – 1432, статистически значимый критерий Вальда - 3,456 ($p \leq 0,0001$) и приемлемую долю объясненной вариации (R^2 составил 0,67). Индекс Хосмера-Лемешоу составил 6,11 с уровнем достоверности $p \leq 0,63$, что предполагает общую значимость модели.

Таблица 2 – Результаты логистической регрессионной модели вероятности возникновения вспышек АЧС среди домашних свиней в Самарской области

Переменные	Коэффициент регрессии	Отношение шансов	95% доверительный интервал	р-значение
Количество живых свиней, перемещенных из неблагополучных по АЧС регионов	5,917	371,52	1,58 – 87290,57	0,03
Объем экспорта продукции свиноводства из неблагополучных по АЧС, регионов	4E-6	1,001	1,000 – 1,002	0,06
Общая численность поголовья свиней	0,002	1,002	0,999 – 1,004	0,09
Плотность личных подсобных хозяйств	1,078	2,941	0,817 – 10,585	0,09
Наличие общих границ с неблагополучными по АЧС, регионами страны	4,49	89,18	0,07 – 11208,64	0,21

Коэффициент автокорреляции переменной ответа соответствовал z-баллу, равному 0,06, при $p=0,94$. Для остатков регрессии индекс Морана равен -0,13, при z-оценке, равной -0,73 ($p=0,46$). Следовательно, автокорреляции не было обнаружено (рисунок 3, справа). Это говорит о том, что в распределении данных не существовало пространственных зависимостей, которые не могли бы быть объяснены моделью.

Прогнозируемая вероятность возникновения вспышек АЧС среди домашних свиней в районах Самарской области отмечалась в большей степени по территориям с развитой дорожной сетью, что предполагает интенсивные поставки живых животных и продукции из других районов области и других областей России, имеющих неблагополучие по данной болезни (рисунок 3 слева).

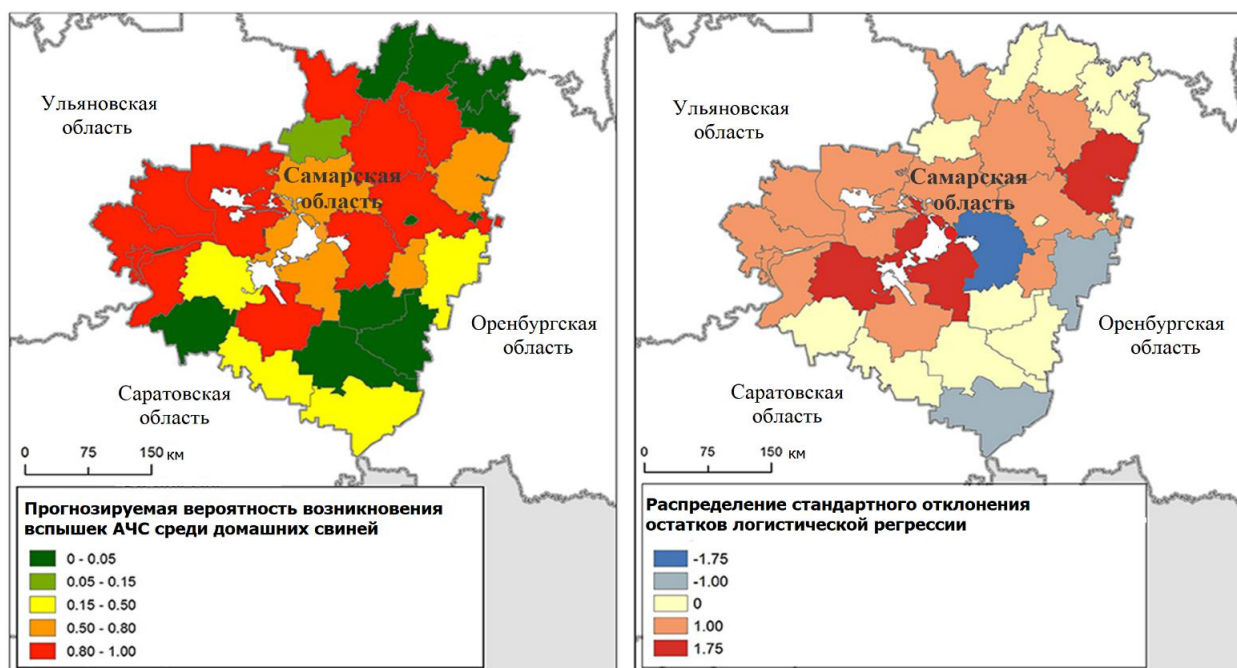


Рисунок 3. Прогнозируемая вероятность возникновения вспышек африканской чумы свиней (АЧС) в районах Самарской области (слева) и распределение стандартного отклонения регрессионных остатков (справа), полученное с помощью обобщенной логистической регрессии

В результате было выдвинуто предположение, что регистрирующиеся вспышки африканской чумы свиней среди домашних животных в районах Самарской области могут быть связаны с деятельностью человека, влияющей на сельское хозяйство, торговлю и экономику, а также с посещением людьми мест обитания диких кабанов. Однако результаты пространственно-временного анализа нужно рассматривать с осторожностью, так как они зависят от качества отчетности. Вероятно, случаи АЧС среди кабанов занижаются. Обычно находят не более 10% туш погибших животных.

3.5 Прогностическая модель для оценки распространения африканской чумы свиней в Нижегородской области с учётом факторов риска

В таблице 3 представлены результаты регрессионного анализа, направленного на изучение взаимосвязи случаев африканской чумы свиней (АЧС) в популяциях диких кабанов от факторов, способствующих распространению инфекции. Метод позволил не только адекватно оценить изменчивость данных, но и количественно оценить значимость факторов на частоту и распределение очагов АЧС.

Значимыми предикторами, определяющими распространение вспышек АЧС у кабанов, явились доля водоёмов, количество охотничьих хозяйств и наличие вспышек среди домашних свиней. Регрессионные остатки модели показали случайное распределение, что свидетельствует о хорошем соответствии модели (рисунок 4 справа).

Отрицательная биномиальная регрессионная модель предсказала различное количество вспышек в популяции дикого кабана в Нижегородской области (рисунок 4 слева).

Таблица 3 - Статистические метрики отрицательной биномиальной регрессионной модели зависимости инцидентности вспышек АЧС среди диких кабанов в Нижегородской области от факторов риска

Переменные	Регрессионный коэффициент	Стандартная ошибка	p - значение
Процент водоемов (%)	-0,231	0,099	0,019
Количество охотничьих хозяйств	0,266	0,075	0,0003
Вспышки АЧС среди домашних свиней	0,520	0,274	0,057

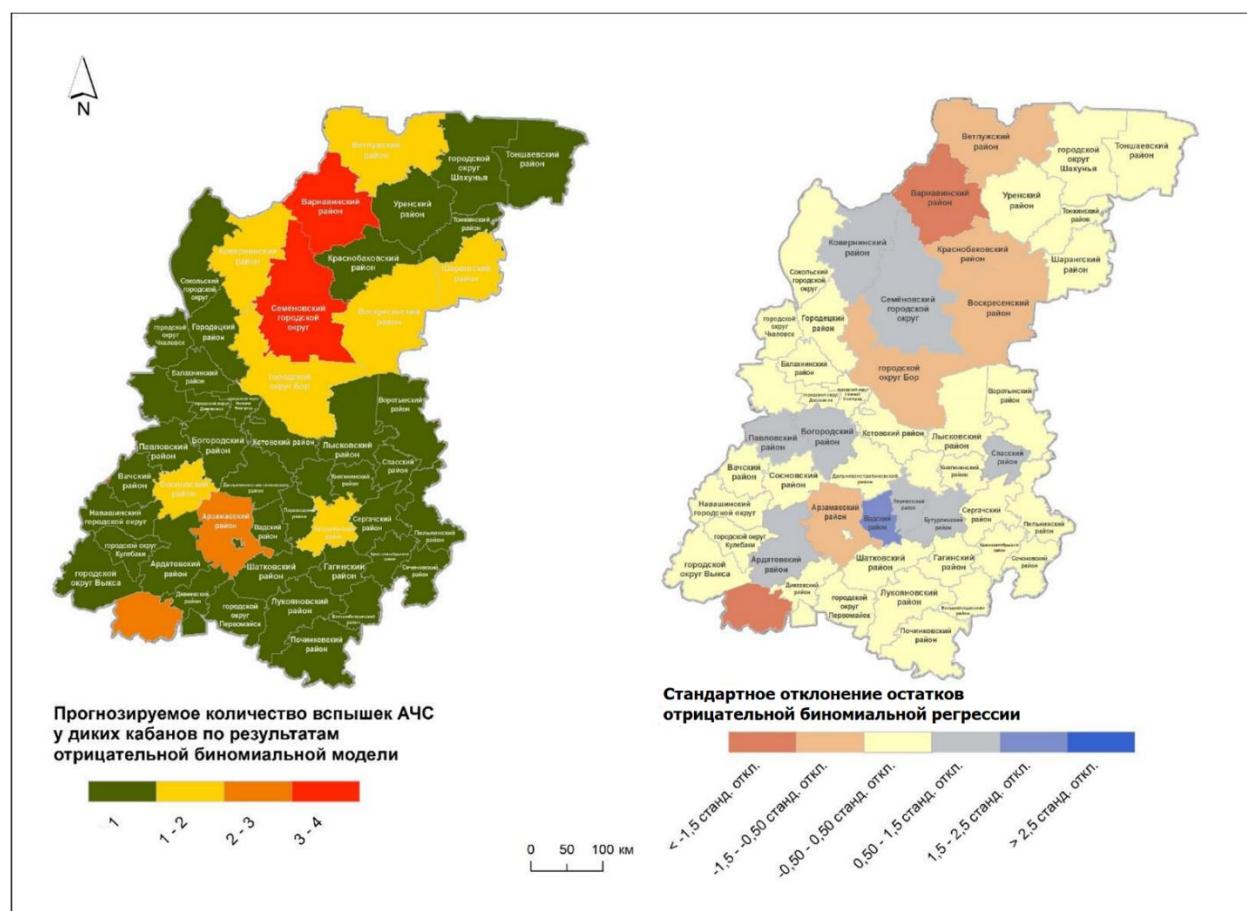


Рисунок 4. Прогнозируемая вероятность возникновения вспышек АЧС у диких кабанов (слева) и распределение остатков модели в Нижегородской области (справа)

В таблице 4 представлены результаты регрессионного анализа взаимосвязи случаев АЧС в популяциях домашних свиней с факторами распространения инфекции.

Таблица 4 - Статистические метрики логистической регрессионной модели зависимости возникновения АЧС среди домашних свиней от факторов риска в районах Нижегородской области, 2011–2022 гг.

Переменные	Регрессионный коэффициент	Стандартная ошибка	p - значение
Количество личных подсобных хозяйств	1,397	1,003–2,500	0,025
Общая протяженность дорог, м	0,997	0,991–1,001	0,053

По результатам логистической регрессионной модели была составлена карта прогноза вспышек АЧС среди домашних свиней (рисунок 5, слева). Остатки модели были распределены без случайной кластеризации (рисунок 5, справа). Наибольшая вероятность возникновения очагов ожидается в Павловском, Вачском, Навашином и Сосновском районах, а также в Воротынском районе, где наблюдается наибольшее количество мелких фермерских хозяйств, занимающихся разведением и содержанием домашних свиней.

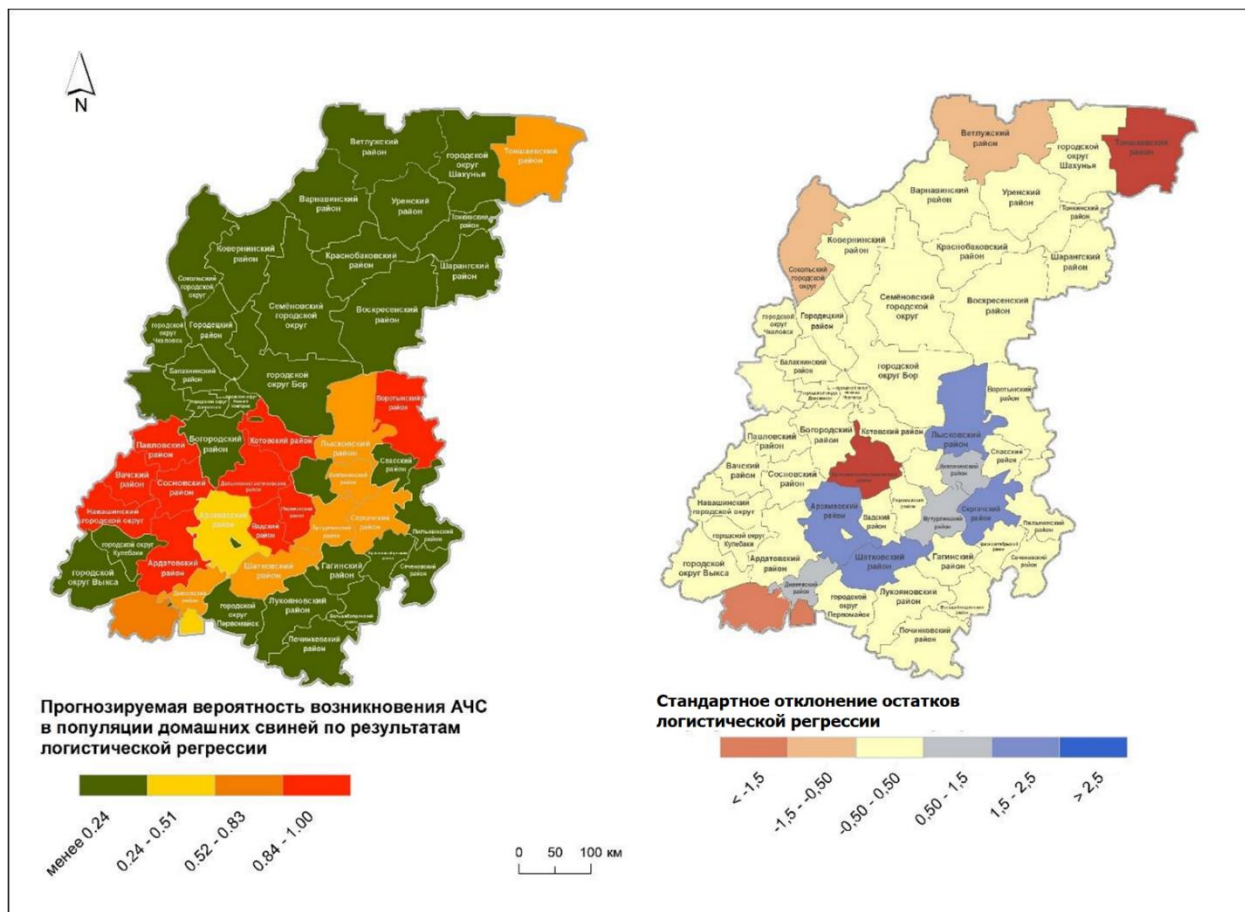


Рисунок 5. Прогнозируемая инцидентность вспышек АЧС среди диких кабанов (слева) и распределение остатков отрицательной биномиальной модели в Нижегородской области (справа) в Нижегородской области

Результаты кросскорреляционного анализа временных рядов между ежемесячной последовательностью вспышек АЧС у домашних свиней и диких кабанов и поставками свиноводческой продукции представлены на рисунке 6. В

результате анализа была установлена корреляция между поставками продукции и регистрацией вспышек средней силы. Для домашних свиней максимальная автокорреляционная функция (ACF) соответствовала коэффициенту корреляции 0,32, при этом пик поставок продукции опережал пик регистрирующихся вспышек АЧС на 0–2 месяца (рисунок 6 а). Аналогичная, хотя и статистически незначимая, корреляция наблюдалась для дикой популяции (рисунок 6 б).

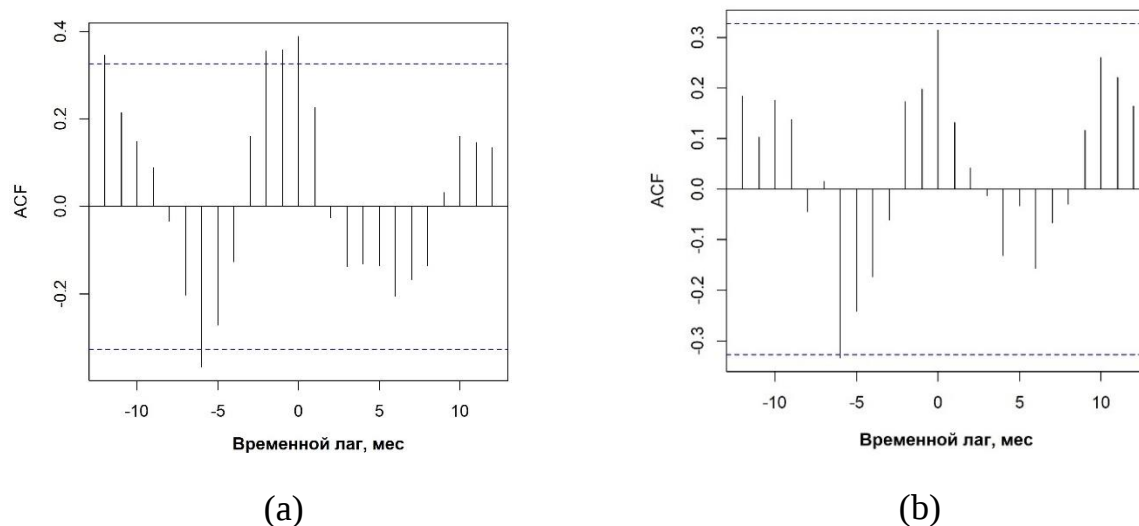


Рисунок 6. Графики автокорреляционной функции (ACF) между импортом продукции из свинины и: вспышками АЧС среди популяции домашних свиней (а), вспышками АЧС среди кабанов (б)

3.6 Оценка факторов риска бешенства, включая вакцинацию диких животных, выявленных в результате пространственного моделирования очагов болезни в Нижегородской области

Вакцинация диких животных является значимым фактором, снижающим число вспышек бешенства в Нижегородской области, что подтверждается отрицательным регрессионным коэффициентом. Кроме того, в модель включен еще один фактор, значимый в эпизоотологии бешенства животных, а именно плотность лисиц (таблица 5).

Таблица 5 – Статистические метрики регрессионной модели выявления факторов риска бешенства в популяции диких животных

Переменные	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	р-значение
Плотность популяции лисиц, особей/км ²	1,193	0,289	0,000
Доля лесов, %	0,547	0,012	0,000
Объем вакцинации диких животных, гол.	-1,798	0,559	0,001

По результатам регрессионной модели распространения случаев бешенства среди животных-компаньонов в Нижегородской области, были выявлены такие факторы как плотность популяции лисиц и объем вакцинации

как диких, так и домашних животных.

Результаты регрессионной модели для инфицированных бешенством животных-компаньонов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Статистические метрики регрессионной модели выявления факторов риска бешенства в популяции домашних животных-компаньонов

Переменные	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	p-значение
Плотность популяции лисиц, особей/км ²	0,184	0,034	0,184
Объем вакцинации домашних животных, доз	-1,03	0,43	-1,03
Объем вакцинации диких животных, доз	-1,08	-0,234	-1,08

Наиболее значимыми предикторами бешенства среди всех видов животных в районах Нижегородской области были определены общая численность популяции лисиц в районе, количество вакцинированных диких животных, доля сельского населения и общее количество населенных пунктов (таблица 7).

Таблица 7 – Статистические метрики регрессионной модели выявления факторов риска бешенства в популяции всех видов животных

Переменные	Коэффициент регрессии	Стандартная ошибка	p-значение
Плотность лисиц, особей/км ²	1,083	0,144	0,005
Плотность населения, чел/км ²	1,278	0,031	0,000
Количество сельских поселений	0,026	0,008	0,002
Доля лесов, %	0,047	0,013	0,014
Объем вакцинации диких животных, доз.	0,014	0,006	0,039

Карты прогнозируемого числа случаев бешенства среди всех видов животных и распределение остатков регрессии представлены на рисунке 7. К районам повышенного риска возникновения бешенства были отнесены Павловский, Лысковский, Воротынский, Кстовский, Бутурлинский, Сергачский, Гагинский, Кулебакский, Ардатовский, Лукояновский и Починковский. Эта зона повышенного риска расположена преимущественно в южной части Нижегородской области, территории основного ареала обитания рыжих лисиц.

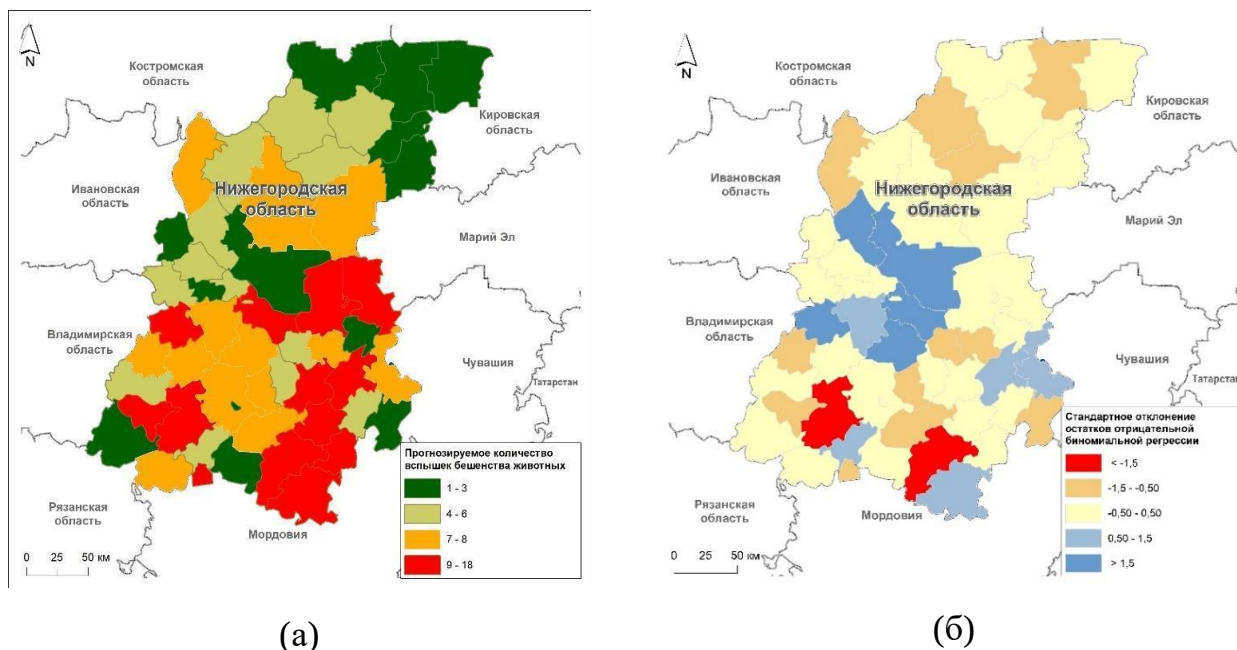


Рисунок 7. Прогнозируемая вероятность возникновения вспышек бешенства среди диких животных (а) и распределение регрессионных остатков модели (б) в Нижегородской области России

3.7 Алгоритм разработки прогностических пространственных моделей на основе регрессионного анализа вспышек инфекционных болезней животных на примере лептоспироза, бешенства животных и африканской чумы свиней на территории субъектов Российской Федерации

Моделирование вспышек лептоспироза, бешенства животных и африканской чумы свиней среди домашних свиней и диких кабанов позволило сформировать общий алгоритм прогнозирования вспышек других природно-очаговых и трансграничных болезней животных, который включает следующие этапы:

1. Выбор модельных территорий на основе ретроспективного анализа вспышек. Критериями отбора могут являться вспышки, зарегистрированные за период не менее пяти лет, охватывающие различные природно-климатические зоны. Фактор доступности данных представляет важное значение в построении моделей. Для анализа использовались данные ветеринарной отчетности, сводные материалы природоохранных ведомств, данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и векторные геоинформационные слои.
2. Отбор предикторов, определяющих вероятность возникновения вспышек лептоспироза животных, бешенства и АЧС на модельных территориях Российской Федерации на основе систематического анализа литературных источников.
3. Выбор типа регрессионной модели распространения инфекционных болезней животных осуществлялся на основе анализа распределения и свойств зависимой переменной.
4. Предварительная обработка и подготовка данных для последующего регрессионного анализа.

5. Проведение регрессионного анализа различными методами (MaxEnt, Random Forest, обобщенной линейной логистической регрессии (GLLR) и отрицательной биномиальной регрессии). Оценка регрессионных коэффициентов, обучение и валидация моделей.
6. Количественное определение факторов риска возникновения и распространения: лептоспироза животных на территории Арктики, АЧС в популяциях дикого кабана и домашних свиней, бешенства животных на территории Самарской и Нижегородской областей.
7. Ранжирование территорий по уровню эпизоотического риска на основе результатов регрессионного моделирования и анализа регрессионных остатков. Составление итоговых прогностических карт пространственного распределения риска для каждой болезни методом геоинформационного картографирования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

4.1 Итоги исследований

1. Разработан и апробирован на примере лептоспироза, АЧС и бешенства универсальный методологический подход, основанный на построении пространственных регрессионных моделей. Данный подход подтвердил свою эффективность как современная инструментальная основа для перехода от ретроспективного анализа к проактивному прогнозированию эпизоотической ситуации и сравнительной оценке стратегий борьбы.
2. Впервые для Арктического региона России с применением машинного обучения (Random Forest, Maxent) установлено, что социально-экономические и демографические факторы играют доминирующую роль в распространении лептоспироза по сравнению с климатическими (количество осадков, среднегодовая температура). На основе пространственной регрессионной модели проведено ранжирование субъектов региона по степени эпизоотического риска.
3. Показано, что распространение АЧС среди домашних свиней детерминировано преимущественно антропогенными факторами: структурой свиноводства (мелкотоварный сектор) и интенсивностью хозяйственных связей, обуславливающих перемещение животных и продукции. Разработанные прогностические модели для территорий Самарской и Нижегородской областей подтвердили свою эффективность для прогнозирования риска интродукции инфекции.
4. Использование прогностических моделей вспышек АЧС в популяции кабанов позволяет сделать утверждение, что риск заноса и распространения вируса АЧС на территории Нижегородской области зависит не только от плотности восприимчивого поголовья животных, а также от антропогенных факторов, связанных с ведением охотничьего хозяйства и низким уровнем биобезопасности.
5. Установлено, что экологические и популяционные факторы, определяют распространение вспышек бешенства животных на территории Российской Федерации. Моделирование количественно обосновало высокую

эффективность программ вакцинации диких животных как ключевого инструмента контроля, что является основой для оптимизации превентивных мероприятий.

6. Выбор прогностической пространственной модели проводится на основе комплексного анализа эпизоотологических характеристик и механизмов передачи возбудителей болезней животных. Обоснованный выбор модели определяется необходимостью учитывать разнообразие факторов, влияющих на распространение инфекций среди популяций животных.

4.2 Практические предложения

Разработаны и внедрены в практику региональных ветеринарных ведомств и учебный процесс сельскохозяйственных ВУЗов по подготовке ветеринарных специалистов: «Методические рекомендации по организации и проведению противоэпизоотических мероприятий для предупреждения распространения АЧС в дикой фауне (протокол № 17 от 25.04.2024 г.); «Методические рекомендации по применению статистических моделей в прогнозировании вспышек инфекционных болезней животных (протокол № 41 от 18.10.2024 г.)».

Получена карта обратной связи с Институтом ветеринарной медицины и биоинженерии Верхневолжского государственного агробиотехнологического университета (Протокол №6 от 01 августа 2025 г.) и Нижегородским государственным агротехнологическим университетом имени Л.Я. Флорентьева (Протокол №6 от 01 августа 2025 г.) о том, что материалы диссертационной работы приняты к использованию в учебном процессе и научно-исследовательской работе на кафедрах вуза.

4.3 Перспективы дальнейшей разработки темы

Прогностическое моделирование вспышек инфекционных болезней животных с применением регрессионных моделей открывает новые горизонты для ветеринарной науки, контроля заболеваний и управления рисками. Применение современных технологий и подходов позволит повысить эффективность и точность прогнозов, что в конечном итоге приведет к улучшению здоровья животных и безопасности пищевых продуктов.

Разработка моделей, адаптированных к разным типам животноводства, повысит точность прогнозов и рекомендаций. Применение регрессионных моделей открывает возможность сделать анализ динамики распространения других болезней животных, таких как бруцеллез, заразный узелковый дерматит, ящур и др., что позволит изучить и обобщить подходы в моделировании.

На основе результатов регрессионного моделирования разработаны практические рекомендации по профилактике и контролю вспышек инфекционных болезней для сельхозпроизводителей и ветеринарных служб. Прогнозные модели позволяют оценить эффективность различных сценариев вмешательств, что способствует формированию научно обоснованной ветеринарной политики и стратегий управления заболеваниями.

5. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Environmental Risk of Leptospirosis in Animals: The Case of the Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation / **O. I. Zakharova**, F. I. Korennoy,

N. N. Toropova, O.A. Burova, A.A. Blokhin // Pathogens. – 2020. – Vol. 9. – № 6. – P. 504.

2. Ecological and Socio-Economic Determinants of Livestock Animal Leptospirosis in the Russian Arctic / **O. I. Zakharova**, F. I. Korennoy, I. V. Iashin, N.N. Toropova, A.E. Gogin, D.V. Kolbasov, G.V. Surkova, S.M. Malkhazova, A.A. Blokhin // Frontiers in Veterinary Science. – 2021. – Vol. 8. – P. 658675.

3. Risk Factors of African Swine Fever in Domestic Pigs of the Samara Region, Russian Federation / A. A. Glazunova, F. I. Korennoy, T. A. Sevskikh, D.A. Lunina, **O.I. Zakharova**, A.A. Blokhin, A.K. Karaulov, A.E. Gogin // Frontiers in Veterinary Science. – 2021. – Vol. 0. – P. 981.

4. Плотность популяции дикого кабана и распространение африканской чумы свиней в Российской Федерации / **О.И. Захарова**, А.А. Блохин, Н.Н. Торопова, О.А. Бурова, И.В. Яшин, Ф.И. Коренной // Ветеринария сегодня. - 2022. - № 2. – С. 104-113.

5. Investigation of Risk Factors Associated with the African Swine Fever Outbreaks in the Nizhny Novgorod Region of Russia , 2011 – 2022 / **O. I. Zakharova**, A. A. Blokhin, I. V Yashin, O.A. Burova, D.V. Kolbasov, F.I. Korennoy // Transbound. Emerg. Dis. – 2023. – Vol. 2023. – P. 14.

6. Активный и пассивный мониторинг африканской чумы свиней в популяции дикого кабана в Российской Федерации / **О. И. Захарова**, О. А. Бурова, И. В. Яшин, А. А. Блохин // Вестник Красгау. – 2023. – № 7. – P. 140-145.

7. **Zakharova, O. I.** Patterns of animal rabies in the Nizhny Novgorod region of Russia (2012–2022): the analysis of risk factors / O. I. Zakharova, E. A. Liskova // Frontiers in Veterinary Science. – 2024. – Vol. 11.

8. Факторы риска распространения африканской чумы свиней среди диких кабанов в Российской Федерации Risk factors for African swine fever spread in wild boar in the Russian Federation / **О. И. Захарова**, А. А. Блохин, О. А. Бурова, // Ветеринария сегодня. – 2024. – Vol. 13. – № 1. – P. 64-72.

9. **Zakharova, O. I.** Risk Factors for African Swine Fever in Wild Boar in Russia: Application of Regression for Classification Algorithms / O. I. Zakharova, E. A. Liskova // Animals. – 2025. – Vol. 15. – № 4. – P. 510.

10. Animal rabies in the Nizhny Novgorod region of Russia (2012–2024): Descriptive and predictive epidemiological analysis / **O. I. Zakharova**, E. A. Liskova, I. V. Razheva, N.A Gladkova, O.A Burova, I.V Yashin, A.A Blokhin, F.I Korennoy // Preventive Veterinary Medicine. – 2025. – Vol. 240. – № April. – P. 106531.

11. Testing a Susceptible Population Density Among Other Explanatory Factors of African Swine Fever Spread in Wild Boar Using the Russian Federation Data, 2007–2023 / **O. I. Zakharova**, E. A. Liskova, N. A. Gladkova, I. V. Razheva, I.V. Iashin, A.A. Blokhin, D.V. Kolbasov, F.I. Korennoy // Transboundary and Emerging Diseases. – 2025. – Vol. 2025. – № 1.

