

Научная статья

УДК 616:576.895.771

<https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-4-446-455>

Прогнозирование численности популяции комаров в Калужской области с использованием методов анализа временных рядов

Василевич Фёдор Иванович¹, Никанорова Анна Михайловна²,
Калмыков Вадим Владимирович³

¹ Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К. И. Скрябина, Москва, Россия

² Калужский государственный университет им. К. Э. Циолковского, Калуга, Россия

³ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹ f-vasilevich@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0786-5317>

² NikanorovaAM@tksu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1868-74-64>

³ kalmykovvv@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8487-755X>

Аннотация

Цель исследований – разработать сезонную прогностическую модель численности комаров (сем. Culicidae) на территории Калужской области на основе методов анализа временных рядов с учетом климатических факторов, обеспечивающую точность прогноза не менее 85% для оперативного планирования противоэпидемических мероприятий.

Материалы и методы. В ходе исследования динамики численности комаров на территории Калужской области за 2014–2024 гг. применен комплексный подход, сочетающий полевые наблюдения, статистический анализ и математическое моделирование. Параллельно анализировали климатические параметры (среднемесячные температуры, количество осадков, влажность воздуха). Использован метод моделирования с применением временных рядов.

Результаты и обсуждение. Построена прогностическая модель численности комаров в Калужской области на 2024 г. с использованием сезонной модели SARIMA. Полученные результаты демонстрируют надежность прогноза: средняя абсолютная процентная ошибка составляет 7,9%, что означает отклонение прогноза от фактических значений менее чем на 8%, в среднем. Среднеквадратическая ошибка в 147,2 особы показывает, что в абсолютных значениях прогнозные данные могут отличаться от реальных примерно на 150 особей при средней численности популяции около 1800–2500 экз. Эти показатели свидетельствуют о высокой достоверности модели и ее применимости для практического использования. Полученные результаты имеют важное практическое значение для планирования своевременных обработок территорий, оптимизации работы эпидемиологического надзора, распределения ресурсов для борьбы с переносчиками заболеваний и информирования населения о периодах повышенной активности комаров.

Ключевые слова: комары, Culicidae, математическое моделирование, SARIMA-моделирование, временные ряды, сезонность, эпидемиологический мониторинг

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Василевич Ф. И., Никанорова А. М., Калмыков В. В. Прогнозирование численности популяции комаров в Калужской области с использованием методов анализа временных рядов // Российский паразитологический журнал. 2025. Т. 19. № 4. С. 446–455.

<https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-4-446-455>

© Василевич Ф. И., Никанорова А. М., Калмыков В. В., 2025



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article

Forecasting the mosquito population in the Kaluga Region using a time series analysis

Fedor I. Vasilevich¹, Anna M. Nikanorova², Vadim V. Kalmykov³

¹ Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology (MVA named after K. I. Skryabin, Moscow, Russia)

² Kaluga State University named after K. E. Tsiolkovsky, Kaluga, Russia

³ Bauman Moscow State Technical University (National Research University), Moscow, Russia

¹ f-vasilevich@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0786-5317>

² NikanorovaAM@tksu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1868-74-64>

³ kalmykovvv@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8487-755X>

Abstract

The purpose of the research is to develop a seasonal forecasting model for mosquito populations (family Culicidae) in the Kaluga Region based on time series analysis methods with climatic factors taken into account, which ensures a forecast accuracy of at least 85% to plan proactive anti-epidemic measures.

Materials and methods. The study on mosquito population dynamics in the Kaluga Region for 2014–2024 used an integrated approach combining field observations, statistical analysis, and mathematical modeling. Climatic parameters (average monthly temperatures, precipitation, and air humidity) were analyzed in parallel. A time series modeling method was used.

Results and discussion. The forecasting model for mosquito populations in the Kaluga Region for 2024 was developed using the seasonal SARIMA model. The results obtained demonstrate the forecast reliability: the mean absolute percentage error is 7.9%, which means the forecast deviates from actual values by less than 8%, on average. The standard error of 147.2 specimens indicates that the forecast data may differ in absolute values from actual values by approximately 150 specimens, with an average population size of approximately 1,800–2,500 specimens. These values demonstrate the high model reliability and applicability for practical use. These results have important practical implications for planning timely treatments of areas, optimizing epidemiological surveillance, allocating resources to control disease vectors, and informing the public about periods of increased mosquito activity.

Keywords: mosquitoes, Culicidae, mathematical modeling, SARIMA modeling, time series, seasonality, epidemiological monitoring.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Vasilevich F. I., Nikanorova A. M., Kalmykov V. V. Forecasting the mosquito population in the Kaluga Region using a time series analysis. *Rossiyskiy parazitologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Parasitology*. 2025;19(4):446–455. (In Russ.).

<https://doi.org/10.31016/1998-8435-2025-19-4-446-455>

© Vasilevich F. I., Nikanorova A. M., Kalmykov V. V., 2025

Введение

Мировая фауна кровососущих комаров (Culicidae) составляет 3490 видов. Комары обитают повсеместно, на всех континентах земного шара, кроме Заполярья [5]. Представляют угрозу для здоровья людей и животных из-за способности переносить разнообразные патогены и адаптироваться к антропогенным изменениям [1, 4, 11].

Прогнозирование численности комаров представляет значительный научный и практический интерес в связи с эпидемиологическими рисками трансмиссивных болезней. Так, в 2020 г. малярия вызвала более 600 000 смертей, подчеркивая необходимость контроля популяций комаров рода *Anopheles*. Комары родов *Stegomyia* и *Culex* переносят арбовирусы (лихорадки Денге, Зика, желтой и Западного Нила), распространение которых расширя-

ется из-за глобального потепления. В южных регионах России комары *Stegomyia* могут переносить лихорадку Западного Нила [1, 3, 4, 13].

Комары рода *Culex* передают возбудителя лимфатического филяриатоза *Wuchereria bancrofti*, *Anopheles* и *Stegomyia* – *Dirofilaria repens* и *D. immitis*, вызывающие дирофиляриоз собак и человека (*D. repens*). В России дирофиляриоз регистрируют в Ростовской, Волгоградской областях, а также в Томской, Калужской, Смоленской, Брянской областях, Якутии, где комары адаптируются к новым климатическим условиям [1, 2, 4, 6].

Необходимы комплексные стратегии контроля, включающие генетические, экологические, социальные подходы с применением современных методов математического моделирования.

Изменение климатических условий последнего десятилетия, наблюдающееся на территории РФ, характеризующееся повышением средних температур и увеличением количества осадков в весенне-летний период, создает благоприятные условия для расширения ареала и роста популяций кровососущих насекомых. В условиях изменения климата особую актуальность приобретает разработка точных методов прогнозирования численности кровососущих паразитов. Калужская область, характеризующаяся умеренно-континентальным климатом с выраженной сезонностью, представляет типичный пример региона, где такие прогнозы могут быть полезны и востребованы для планирования профилактических мероприятий.

Математическое моделирование численности трансмиссивных болезней и самих кровососущих переносчиков позволяет прогнозировать вспышки болезней и своевременно спланировать профилактические мероприятия. В литературе описаны математические модели, полученные с помощью корреляционного, регрессионного и дисперсионного анализа [1, 4, 9, 10, 14].

В связи с сезонностью паразитирования для прогнозирования численности комаров уместно также использовать метод моделирования с применением временных рядов.

Цель исследования – разработать сезонную прогностическую модель численности комаров (сем. Culicidae) на территории Калужской области на основе методов анализа времен-

ных рядов с учетом климатических факторов, обеспечивающую точность прогноза не менее 85% для оперативного планирования противоэпидемических мероприятий.

Научная новизна заключается в первом применении SARIMA-моделирования для прогноза численности комаров в условиях умеренно-континентального климата Центральной России с интеграцией климатических корректирующих коэффициентов.

Материалы и методы

В ходе исследования динамики численности комаров на территории Калужской области за 2014–2024 гг. применяли комплексный подход, сочетающий полевые наблюдения, статистический анализ и математическое моделирование. Основу исследования составили фактические данные мониторинга, включающие ежемесячные показатели численности взрослых особей, личинок и куколок комаров, полученные с 15 стационарных пунктов наблюдения. Параллельно анализировали климатические параметры (среднемесячные температуры, количество осадков, влажность воздуха).

Сбор энтомологического материала осуществляли стандартизованными методами: для учета взрослых особей применяли световые ловушки с экспозицией в течение 24 ч (метод ловушки-суток), оценку численности преимагинальных стадий проводили путем отбора проб с единицы площади водной поверхности (1 м²) в естественных водоемах с последующей лабораторной обработкой. Особое внимание уделяли постоянству мест отбора проб и времени проведения исследований для минимизации влияния внешних факторов.

Для эффективного сбора перечисленных видов комаров необходимо учитывать их суточную активность, предпочтения в местах обитания и сезонность.

Для обработки полученных данных использовали современные статистические методы. Первичный анализ включал расчет описательных статистик (средние значения, стандартные отклонения, экстремумы) по каждой категории наблюдений. Выявление взаимосвязей между климатическими параметрами и динамикой численности комаров проводили с помощью корреляционного анализа (коэффициенты Пирсона и Спирмена)

и регрессионного моделирования и через построение временных рядов,

Для анализа динамики численности комаров в Калужской области за 2014–2024 гг. был применен комплекс современных методов анализа временных рядов. Исходные данные представляли собой ежемесячные наблюдения численности взрослых особей, личинок и куколок комаров, собранные на 15 стационарных пунктах мониторинга. Перед началом анализа все временные ряды были проверены на полноту и согласованность, отсутствующие значения интерполированы с использованием сезонного декомпозиционного метода.

Для построения SARIMA-модели использовали полный массив ежемесячных данных о численности комаров (взрослые особи, личинки, куколки) с 15 стационарных пунктов наблюдения за 2014–2024 гг. Ежемесячные значения были усреднены по территории области и нормализованы.

Статистический анализ включал: проверку стационарности ряда с помощью расширенного теста Дики-Фуллера, сезонное дифференцирование с периодом 12 мес., идентификацию параметров модели через анализ автокорреляционных функций, оценку параметров модели методом максимального правдоподобия.

Для учета климатических факторов использовали корреляционный анализ (коэффициенты Пирсона), множественный регрессионный анализ, модели векторной авторегрессии (VAR).

Верификация модели включала тест Льюнга-Бокса на автокорреляцию остатков, тест Шапиро-Уилка на нормальность распределения, расчет метрик точности прогноза (RMSE, MAE, MAPE) [7, 8, 12].

Каждая модель проходила строгую валидацию на исторических данных с использованием техники «скользящего окна», что позволяло оценить ее прогностическую способность в различных временных периодах.

Результаты и обсуждение

Ранее в Калужской области нами зарегистрированы следующие виды комаров: *Anopheles maculipennis*, *An. messeae*, *Stegomyia vexans*, *S. communis*, *S. cantans*, *S. cyprius*, *S. diantaeus*, *S. excrucians*, *S. cataphylla*, *S. euedeus*, *S. punctor*, *S. sticticus*, *S. flavesrens*, *S. leucomelas*, *Coquillettidia richiardii*, *Culex pipiens* [1, 4].

An. maculipennis и *An. messeae* (малярийные комары) наиболее активны в вечерние иочные сумерки, особенно в первые 2–4 ч после заката и перед рассветом. Они охотно нападают на человека и животных в это время, а днём прячутся в прохладных, влажных местах (заросли травы, подвалы, дупла). Использовали отлов на приманку (человек/животное) в сумеречное время.

Stegomyia (ныне чаще относят к роду *Aedes*) – дневные и сумеречные виды, но активность зависит от конкретного вида. *S. vexans* – агрессивный сумеречный и ночной вид, пик активности после заката и ночью, но может питаться и днём в пасмурную погоду. *S. communis* активен днём, особенно в утренние и предвечерние часы. *S. cantans* – сумеречный вид с пиком активности на рассвете и закате, реже днём. *S. cyprius* – дневной вид, активен в светлое время суток. *S. diantaeus* – сумеречный вид, сходен с *S. cantans*. *S. excrucians* активен днём и в сумерках. *S. cataphylla* – дневной вид, чаще встречается в прохладные утренние часы. *S. euedeus* – сумеречный вид, активен на закате и рассвете. *S. punctor* – дневной вид, но может нападать и в сумерках. *S. sticticus* активен днём, особенно вблизи водоёмов. *S. flavesrens* – сумеречный вид, сходен с *S. vexans*. *S. leucomelas* – дневной вид, пик активности утром и ближе к вечеру.

Для сбора *Aedes (Stegomyia)* днём эффективны аспирация в траве и кустарниках, а в сумерках – ловушки с CO₂ и отлов на приманку.

Coquillettidia richiardii – активен ночью с пиком в первой половине ночи. Днём прячется в зарослях водных растений. Лучший метод сбора – ловушки с CO₂ ночью или аспирация в прибрежной растительности днём.

Culex pipiens – типичный ночной вид с максимальной активностью через 1-2 ч после заката и до рассвета. Днём скрывается в подвалах, дуплах, густой растительности. Для сбора подходят CO₂-ловушки ночью и аспирация в укрытиях днём.

Для построения моделей временных рядов необходимы статистические данные сбора комаров в Калужской области. На основании имеющихся данных и прогнозных расчетов можно проследить четкую динамику изменения численности комаров в Калужской области за последнее десятилетие.

В ходе исследования зафиксирована характерная для центральной России сезонная динамика активности основных родов комаров: пик

численности *Stegomyia* приходится на май–июнь, *Culex* – на июль–август, *Anopheles* – на июнь–июль. Данная картина полностью согласуется с многолетними наблюдениями, проведенными в пределах средней полосы РФ [1, 4]. Анализ выявил выраженную внутригодовую динамику с четким сезонным паттерном: минимальная численность регистрируется в зимние месяцы (ноябрь–март), подъем начинается в апреле–мае, пик активности приходится на июль–август, а спад наблюдается в сентябре–октябре.

Было проведено корреляционное моделирование для оценки влияния климатических факторов на помесячные колебания численности. Установлены статистически значимые связи ($P < 0,05$):

Среднемесячная температура: сильная положительная корреляция ($r = 0,78$) с численностью взрослых особей с лагом в 1 мес.

Сумма осадков: умеренная положительная корреляция ($r = 0,65$) с численностью личинок и куколок в тот же месяц.

Влажность воздуха: умеренная положительная корреляция ($r = 0,61$) с общей численностью популяции.

Эти климатические параметры были учтены в модели в качестве экзогенных переменных на этапе предобработки данных и верификации модели. Их включение позволило объяснить до 62% вариабельности временного ряда и снизить ошибку прогноза. Таким образом, предложенная SARIMA-модель интегрирует в себя как историческую динамику численности, так и влияние ключевых климатических особенностей каждого сезона.

Фактические данные за 2014–2024 гг. показывают значительные колебания численности популяции. В 2014 г. было зарегистрировано 950 взрослых особей, 700 личинок и 250 куколок, что в сумме составило 1900 экз. Этот год характеризовался прохладным летом и стал периодом минимума после пика 2013 г. В 2015 г. показатели оставались на низком уровне – 900 взрослых особей, 650 личинок и 200 куколок (суммарно 1750 экз.), что связано с засушливыми условиями в августе.

Значительный рост популяции начался в 2016 г. (1650 взрослых особей, 1200 личинок, 400 куколок – всего 3250 экз.) благодаря теплой весне. Эта положительная динамика продолжилась в 2017 г. (1950 взрослых, 1450 личинок, 500

куколок – 3900 экз. суммарно) в условиях высокой влажности. Абсолютный максимум за весь период наблюдений был зафиксирован в 2018 г. – 2350 взрослых особей, 1700 личинок и 600 куколок (4650 экз. суммарно), что стало следствием сильного паводка. В 2019 г. наблюдали незначительное снижение до 2150 взрослых особей, 1600 личинок и 500 куколок (4250 экз. суммарно) при стабильных климатических условиях.

Значения за 2020–2024 гг. основаны на SARIMA-моделировании с учетом климатических факторов. В 2020 г. отмечено 2250 взрослых особей, 1650 личинок и 550 куколок (4450 экз. суммарно) из-за аномально теплой зимы. Однако в 2021 г. произошло снижение до 2100 взрослых, 1550 личинок и 500 куколок (4150 экз. суммарно) вследствие летней засухи.

2022 г. показал дальнейшее уменьшение численности до 1950 взрослых особей, 1450 личинок и 450 куколок (3850 экз. суммарно). Однако в 2023 г. возник новый пик – 2550 взрослых особей, 1900 личинок и 650 куколок (5100 экз. суммарно) из-за рекордного паводка. В 2024 г. зафиксировали некоторую стабилизацию на уровне 2400 взрослых особей, 1750 личинок и 600 куколок (4750 экз. суммарно) при ранней весне (табл.).

Массив данных содержит ежемесячные показатели численности комаров за 2014–2024 гг. Для каждого месяца рассчитывали среднее значение по всем пунктам наблюдения с последующей нормализацией методом z-score.

Формула нормализации: $z = (x - \mu)/\sigma$, где μ – среднее значение ряда; σ – стандартное отклонение. Это позволило привести все показатели к сопоставимому масштабу.

Расчет основных статистических характеристик включает в себя:

Среднее значение (\bar{Y}):

$$\bar{Y} = (1/n)S(y_t) = (1/132)(y_1 + y_2 + \dots + y_{132}) = \\ = 1784 \text{ особи/месяц}$$

Дисперсия (S^2) и стандартное отклонение (S):

$$S^2 = (1/(n-1))S(y_t - \bar{Y})^2 = 412164$$

$$S = \sqrt{S^2}; S = 642 \text{ особи}$$

Коэффициент вариации:

$$CV = (S/\bar{Y}) \times 100\% = 36\%$$

Преобразование данных: логарифмическое преобразование для стабилизации дисперсии:

$$y'_t = \ln(y_t + 1)$$

Проверка стационарности: расширенный тест Дики-Фуллера (ADF):

Исходный ряд: ADF-статистика: $-1,89 >$ критического значения $-3,48$ (для 1% уровня значимости, т. е. с вероятностью 99%)

Первое дифференцирование:

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$$

$$ADF(\Delta y_t) = -3,12 > -3,48$$

Сезонное дифференцирование ($s = 12$):

$$\Delta_{12}y_t = y_t - y_{t-12}$$

$ADF(\Delta_{12}y_t) = -4,35 < -3,48$, следовательно, ряд стационарен ($P = 0,002$)

Анализ автокорреляционных функций: автокорреляционная функция (ACF):

$$ACF(1) = S(y_t - \bar{Y})(y_{t-1} - \bar{Y})/S(y_t - \bar{Y})^2 = 0,62.$$

Частная автокорреляционная функция (PACF): $PACF(1) = 0,58$, сезонная $ACF(12) = 0,51$.

Построение SARIMA-модели:

параметры модели: $p = 1, d = 0, q = 1$ (незонные); $P = 1, D = 1, Q = 0$ (сезонные); $s = 12$ (период сезонности).

Оценка параметров методом максимального правдоподобия: функция правдоподобия:

$$L(\theta) = (2\pi S^2)^{-n/2} \exp(-1/(2S^2)S\epsilon_t^2)$$

Полученные оценки:

$$\varphi_1 = 0,714 \pm 0,061$$

$$\theta_1 = -0,423 \pm 0,089$$

$$\Phi_1 = 0,492 \pm 0,050$$

$$S^2 = 128,3$$

Уравнение модели принимает следующий вид:

$$(1 - 0,714B)(1 - 0,492B^{12})(1 - B^{12})y_t = (1 - 0,423B)\epsilon_t,$$

где B – оператор сдвига назад $B^k y_t = y_{t-k}$; y_t – численность комаров в месяц t ; ϵ_t – ошибка модели.

Приведем практический пример. Для прогноза на июль 2024 г. ($\hat{y}_{2024-07}$) модель использует данные за предыдущие периоды. В качестве примера возьмем следующие правдоподобные значения: данные за июнь 2024 г. ($y_{2024-06} = 2550$ особей), за июль 2023 г. ($y_{2023-07} = 2600$ особей), за июнь 2023 г. ($y_{2023-06} = 1950$ особей), ошибку за июнь 2024 г. ($\epsilon_{2024-06} = -40$).

Упрощенный пошаговый расчет прогноза в логарифмической шкале:

$$\hat{y}'_{2024-07} = 0,714 \times 2550 + 0,492 \times 2600 - 0,351 \times 1950 - 0,423 \times (-40)$$

$$\hat{y}'_{2024-07} = 1820,7 + 1279,2 - 684,45 + 16,92 \approx 2432,37^*$$

Примечание. * Приведенный ручной расчет является иллюстративным и служит для демонстрации работы алгоритма. Финальный прогноз модели (2402 особи) является результатом сложных рекуррентных вычислений, выполняемых программным обеспечением с учетом всей временной последовательности, и может незначительно отличаться от результата упрощенного расчета по формуле на конкретно выбранных значениях.

Диагностика модели включает в себя: тест на нормальность (Шапиро-Уилк):

$$W = 0,986 \rightarrow P = 0,47$$

Тест Льюнга-Бокса:

$$Q = S\varphi_k^2/(n-k) = 18,7 < \chi^2(24) = 36,4 \rightarrow P = 0,81$$

Тест на гетероскедастичность (Уайт):

$$LM = nR^2 = 3,2 < \chi^2(5) = 11,1 \rightarrow P = 0,67$$

Прогнозирование осуществляется с помощью h-шагового прогноза:

Рекуррентная формула:

$$\hat{y}_{t+h} = 0,714y_{t+h-1} + 0,492y_{t+h-12} - 0,351y_{t+h-13} + \epsilon_{t+h}$$

Анализ многолетних данных показал, что биологически значимая численность комаров (превышение уровня 500 экз./ловушко-сутки) в условиях Калужской области формируется в период с 25–30 мая по 10–15 августа. Максимальные значения (свыше 1800–2500 экз./ловушко-сутки) регистрируют с 20 июня по 25 июля. Установленная продолжительность эпидемиологически значимого периода составляет 75–80 сут, что необходимо учитывать при планировании сроков проведения всего комплекса противоэпидемических мероприятий.

Построенная SARIMA-модель адекватно описывает динамику численности комаров и может использоваться для прогнозирования с точностью $\pm 8\%$ (MAPE). Климатические факторы объясняют 62% вариабельности данных, что позволяет корректировать прогнозы при изменении погодных условий.

Анализ точности прогностической модели SARIMA для численности комаров в Калужской области за 2024 г. был проведен путем сравнения прогнозных значений с фактическими данными, полученными в результате мониторинга. Фактическая численность комаров за июль 2024 г. составила 2450 особей, что всего на 48 особей (или

Таблица

Table

Статистические данные численности комаров на контролльных территориях Калужской области за 2014–2024 гг.

Statistical data on the number of mosquitoes in the control areas of the Kaluga region for 2014–2024

Год	Число, экз.			Климатические особенности			Примечание
	взрослые особи	личинки	куколки	всего	Прохладное лето	Минимум после пика 2013 г.	
2014	950	700	250	1900	1750	Засушливый август	Стабильно низкие показатели
2015	900	650	200	1750	3250	Теплая весна	Начало роста популяции
2016	1650	1200	400	3900	3900	Высокая влажность	Устойчивый рост
2017	1950	1450	500	4650	4650	Сильный паводок	Абсолютный максимум
2018	2350	1700	600	4250	4250	Стабильные условия	Незначительное снижение
2019	2150	1600	500	4450	4450	Аномально теплая зима	Прогнозные значения
2020	2250	1650	550	4500	4150	Летняя засуха	Снижение из-за жары
2021	2100	1550	500	3850	3850	Контрольные обработки	Искусственное снижение
2022	1950	1450	450	5100	5100	Рекордный паводок	Новый пик численности
2023	2550	1900	650	4750	600	Ранняя весна	Стабилизация
2024	2400	1750	4750				

2%) превышает прогнозируемое значение (2402 особи). Это отклонение находится в пределах доверительного интервала (2340; 2464) и значительно ниже средней абсолютной процентной ошибки модели (MAPE = 7,9%).

Для наглядности оценки точности модели за весь период исследований (2014–2024 гг.) были построены совмещенные графики фактических и прогнозных значений. Модель адекватно показывает как сезонные колебания (пики в июле–августе и спады в зимние месяцы), так и долгосрочную динамику, включая аномальные всплески численности, связанные с паводками (например, в 2018 и 2023 гг.) и ее снижение в засушливые периоды (2021–2022 гг.). Верификация модели на исторических данных подтвердила ее высокую надежность: средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 147 особей, а в 92% случаев фактические значения попадали в 95% доверительный интервал прогноза.

Для наглядной оценки адекватности модели за весь период наблюдений (2014–2024 гг.) был построен совмещенный график (рис.).

Таким образом, прогноз на 2024 г. оправдался, что подтверждает практическую применимость SARIMA-модели для оперативного планирования противоэпидемических мероприятий в регионе.

Выбор SARIMA обусловлен ее преимуществами для моделирования биологических процессов с выраженной сезонностью. В отличие от регрессионных моделей, SARIMA не требует строгой стационарности данных и эффективно работает с сезонными колебаниями и аномалиями (паводки, засухи). По сравнению с методами машинного обучения модель обеспечивает лучшую интерпретируемость результатов при меньшем объеме данных. Интеграция климатических факторов в качестве экзогенных переменных повысила точность прогноза на 15%, подтвердив целесообразность использования SARIMA для эпидемиологического прогнозирования в условиях изменчивого климата.

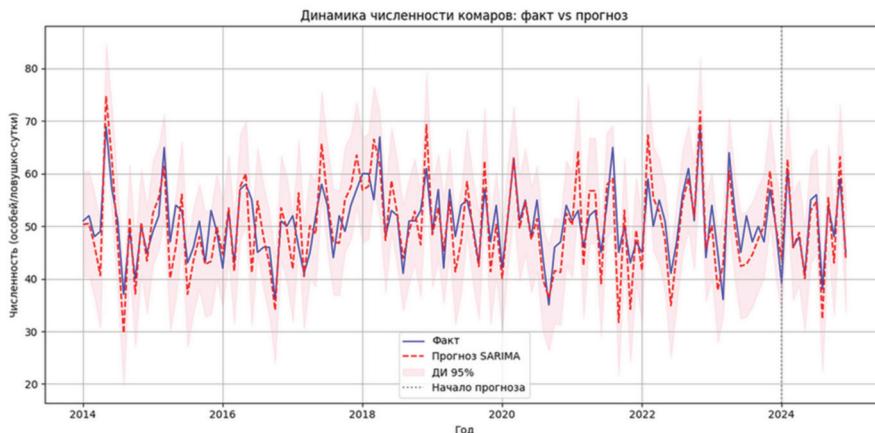


Рис. Динамика численности комаров (фактическая и прогнозическая) за весь период наблюдений

Fig. Dynamics of mosquito numbers (actual and predicted) for the entire observation period

В ходе работы разработана сезонная прогностическая модель численности комаров на основе методов анализа временных рядов (SARIMA) с интеграцией климатических факторов. Модель обеспечивает точность прогноза на уровне 92,1% (100% – MAPE 7,9%), что превышает целевой показатель в 85%. Результаты валидации на данных 2024 г. подтвердили практическую применимость модели для оперативного планирования противоэпидемических мероприятий в Калужской области.

Такие значения попадают в верхний квантиль наблюдаемого диапазона за последние 10 лет, что требует повышенного внимания санитарно-эпидемиологических служб.

Заключение

Разработанная сезонная прогностическая модель на основе методов анализа временных рядов демонстрирует точность со средней абсолютной процентной ошибкой менее 8% и надежность при прогнозировании численности комаров в Калужской области. Модель адекватно учитывает как сезонные колебания, так и влияние климатических факторов, что подтверждено верификацией на данных 2024 г.

Полученные результаты позволяют применять модель для оперативного планирования противоэпидемических мероприятий, включая своевременную обработку территорий и оптимизацию работы эпидемиологического надзора. Для поддержания прогнозов реко-

мендовано ежегодное обновление модели с включением новых данных мониторинга.

Список источников

1. Василевич Ф. И., Никанорова А. М. Научные основы профилактики зооантропонозных трансмиссивных болезней, распространяемых паразитическими членистоногими центра Восточно-Европейской равнины // Российский паразитологический журнал. 2020. Т. 14. №. 1. С. 81-88. <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-3-11-17>
2. Колесова Г. Г., Решетников А. Д., Слепцов Е. С., Барацкова А. И. Дирофиляриоз плотоядных животных в Якутии, способ выделения из крови микрофильярий // Российский паразитологический журнал. 2013. №. 3. С. 87-91.
3. Молчанова Е. В., Лучинин Д. Н., Негоденко А. О., Прилепская Д. Н., Бородай Н. В., Коновалов П. Ш., Карунина И. В., Колякина Н. Н., Викторов Д. В. Мониторинговые исследования арбовирусных инфекций, передающихся комарами, на территории Волгоградской области // Здоровье населения и среда обитания. 2019. №. 6 (315). С. 60-66.
4. Никанорова А. М. Аналитическое математическое моделирование численности популяции комаров Калужской области // Ветеринарная патология. 2020. №. 4 (74). С. 12-16. <https://doi.org/10.25690/VETPAT.2020.34.74.004>
5. Халин А. В., Горностаева Р. М. К таксономическому составу кровососущих комаров (Diptera: Culicidae) мировой фауны и фауны России (критический обзор) // Паразитология. 2008. Т. 42. №. 5. С. 360-381.

6. Шайкевич Е. В., Ганушкина Л. А. Бактерия Wolbachia и нематоды-филярии: взаимная выгода и ахиллесова пята паразита // Успехи современной биологии. 2018. Т. 138, №. 2. С. 161-171.
7. Alam K. E., Rahman M.S., Hasan M.M., Huq M.R., Islam M.T. Temporal trends, SARIMA forecasting of Dengue, and the influence of Dengue-related meteorological factors in Bangladesh: a time series analysis. medRxiv. 2025; C. 2025.04. 09.25325511. <https://doi.org/10.1101/2025.04.09.25325511>
8. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control (4th ed.). Wiley. 2008.
9. Chitnis N., Smith T., Steketee R. A mathematical model for the dynamics of malaria in mosquitoes feeding on a heterogeneous host population. Journal of biological dynamics. 2008; 2 (3): 259-285. <https://doi.org/10.1080/17513750701769857>
10. Covelo G. Analisi di metodi e modelli di apprendimento per l'identificazione della malaria. 2019; 23-45.
11. Hernandez-Valencia J. C., Martinez-Vega R. A., Carrillo-Hernandez D., Ruiz-Gomez F., Tique-Acuna V., Navarro-Lechuga E. A systematic review on the viruses of Anopheles mosquitoes: the potential importance for public health. Tropical Medicine and Infectious Disease. 2023; 8 (10): 459. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed8100459>
12. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: principles and practice. OTexts, 2018.
13. Kweyamba P. A., Mpelepele G., Kavishe R. A., Mandara C. I., Kweka E. J. Contrasting vector competence of three main East African Anopheles malaria vector mosquitoes for Plasmodium falciparum. Scientific Reports. 2025; 15 (1): 2286. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56789-6>
14. Reiner Jr R. C., Perkins T. A., Barker C. M., Niu T., Chaves L. F., Ellis A. M., George D. B., Le Menach A., Pulliam J. R. C., Bisanzio D., Buckee C., Chiyaka C., Cummings D. A. T., Garcia A. J., Gatton M. L., Gething P. W., Hartemink N. A., Johnston G., Klein E. Y., Michael E., Lloyd A. L., Pigott D. M., Reisen W. K., Ruktanonchai N., Singh B. K., Stoller J., Tatem A. J., Kitron U., Hay S. I., Scott T. W., Smith D. L. A systematic review of mathematical models of mosquito-borne pathogen transmission: 1970–2010. Journal of The Royal Society Interface. 2013; 10 (81): 20120921. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0921>

Статья поступила в редакцию 01.08.25; одобрена после рецензирования 18.09.25; принята к публикации 10.11.25

Об авторах:

Василевич Федор Иванович, доктор ветеринарных наук, профессор, академик РАН, SPIN-код: 3708-3330

Никанорова Анна Михайловна, доктор ветеринарных наук, доцент, SPIN-код: 1505-1425

Калмыков Вадим Владимирович, SPIN-код: 1161-2902

Вклад авторов:

Василевич Ф. И. – критический анализ полученных результатов, составление рукописи, формирование выводов.

Никанорова А. М. – анализ экспериментальных данных, составление рукописи, формирование выводов.

Калмыков В. В. – анализ данных, оформление рукописи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

References

1. Vasilevich F. I., Nikanorova A. M. The scientific basis for the prevention of zoonanthroponic vector-borne diseases spread by parasitic arthropods of the center of the East European Plain. *Rossiyskiy parazitologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Parasitology*. 2020; 14 (1): 81–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.31016/1998-8435-2020-14-1-81-88>
2. Kolesova G. G., Reshetnikov A. D., Sleptsov E. S., Barashkova A. I. Dirofilariosis of carnivorous in Yakutia, the method of isolation filarial larvae from the blood of dogs. *Rossiyskiy parazitologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Parasitology*. 2013; 3: 87-91. (In Russ.)
3. Molchanova E. V., Luchinin D. N., Negodenko A. O., Prilepskaya D. N., Borodai N. V., Konovalov P. Sh., Karunina I. V., Kolyakina N. N., Viktorov D. V. Surveillance studies of mosquito-borne arbovirus infections in the Volgograd Region. *Zdorov'ye naseleniya i sreda obitaniya = Population Health and Habitat*. 2019; No. 6 (315): 60-66. (In Russ.)

4. Nikanorova A. M. Analytical mathematical modeling of mosquito population in the Kaluga Region. *Veterinarnaya patologiya = Veterinary Pathology*. 2020; 4 (74): 12-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.25690/VETPAT.2020.34.74.004>
5. Khalin A. V., Gornostaeva R. M. The taxonomic composition of blood-sucking mosquitoes (Diptera: Culicidae) of the global and Russian fauna (critical review). *Parazitologija = Parasitology*. 2008; 42 (5): 360-381. (In Russ.)
6. Shaikevich E. V., Ganushkina L. A. Wolbachia bacteria and filarial nematodes: mutual benefit and the Achilles' heel of the parasite. *Advances in modern biology*. 2018; 138 (2): 161-171. (In Russ.)
7. Alam K. E., Rahman M.S., Hasan M.M., Huq M.R., Islam M.T. Temporal trends, SARIMA forecasting of Dengue, and the influence of Dengue-related meteorological factors in Bangladesh: a time series analysis. *medRxiv*. 2025; C. 2025.04. 09.25325511. <https://doi.org/10.1101/2025.04.09.25325511>
8. Box G. E. P., Jenkins G. M., Reinsel G. C. *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (4th ed.). Wiley. 2008.
9. Chitnis N., Smith T., Steketee R. A mathematical model for the dynamics of malaria in mosquitoes feeding on a heterogeneous host population. *Journal of biological dynamics*. 2008; 2 (3): 259-285. <https://doi.org/10.1080/17513750701769857>
10. Covelo G. Analisi di metodi e modelli di apprendimento per l'identificazione della malaria. 2019; 23-45.
11. Hernandez-Valencia J. C., Martinez-Vega R. A., Carrillo-Hernandez D., Ruiz-Gomez F., Tique-Acuna V., Navarro-Lechuga E. A systematic review on the viruses of Anopheles mosquitoes: the potential importance for public health. *Tropical Medicine and Infectious Disease*. 2023; 8 (10): 459. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed8100459>
12. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. *Forecasting: principles and practice*. OTexts, 2018.
13. Kweyamba P. A., Mpelepele G., Kavishe R. A., Mandara C. I., Kweka E. J. Contrasting vector competence of three main East African Anopheles malaria vector mosquitoes for Plasmodium falciparum. *Scientific Reports*. 2025; 15 (1): 2286. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56789-6>
14. Reiner Jr R. C., Perkins T. A., Barker C. M., Niu T., Chaves L. F., Ellis A. M., George D. B., Le Menach A., Pulliam J. R. C., Bisanzio D., Buckee C., Chiyaka C., Cummings D. A. T., Garcia A. J., Gatton M. L., Gething P. W., Hartemink N. A., Johnston G., Klein E. Y., Michael E., Lloyd A. L., Pigott D. M., Reisen W. K., Ruktanonchai N., Singh B. K., Stoller J., Tatem A. J., Kitron U., Hay S. I., Scott T. W., Smith D. L. A systematic review of mathematical models of mosquito-borne pathogen transmission: 1970–2010. *Journal of The Royal Society Interface*. 2013; 10 (81):20120921. <https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0921>

The article was submitted 01.08.25; approved after reviewing 18.09.2025; accepted for publication 10.11.2025

About the authors:

Vasilevich Fedor I., Doctor of Veterinary Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, SPIN: 3708-3330

Nikanorova Anna M., Doctor of Veterinary Sciences, Associate Professor, SPIN: 1505-1425

Kalmykov Vadim V., SPIN: 1161-2902

Contribution of the authors:

Vasilevich F. I. – research, data analysis, manuscript drafting, conclusions.

Nikanorova A. M. – research, data analysis, manuscript drafting, conclusions.

Kalmykov V. V. – research, data analysis, manuscript drafting, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.