

DOI: 10.21055/0370-1069-2024-3-103-110

УДК 616.98:578.8:614.4

А.В. Иванова, В.А. Сафронов

## Формирование объективной методической базы эпидемиологического прогнозирования заболеваемости геморрагической лихорадкой с почечным синдромом с использованием методов машинного обучения

ФКВН «Российский научно-исследовательский противочумный институт «Микроб», Саратов, Российская Федерация

Высокая медицинская и социальная значимость проблемы геморрагической лихорадки с почечным синдромом (ГЛПС) в России является значимым аргументом в пользу разработок качественно новых подходов к прогнозированию эпидемиологических осложнений. Наличие сложного характера взаимодействия факторов, определяющих интенсивность эпидемических проявлений, требует продолжения поиска наиболее достоверных прогностических критериев предэпидемической диагностики ГЛПС, способных обеспечить ту полноту информации, которая необходима в современных условиях для оптимизации управления эпидемическим процессом. **Целью** работы явилось формирование объективной методической базы прогнозирования эпидемиологической обстановки по ГЛПС за счет использования методов машинного обучения при моделировании влияния комбинаций абиотических факторов риска на фактическую заболеваемость ГЛПС. **Материалы и методы.** Материалы исследования составили данные о 10 788 случаях заболевания ГЛПС, зарегистрированных с 1982 по 2022 г. на территории Саратовской области. В качестве факторов, вероятно оказывающих влияние на эпидемический процесс ГЛПС, рассмотрены более 46 тыс. значений метеопказателей, полученных из архива базы данных метеонаблюдений за период 1981–2023 гг. метеостанции Саратов – Юго-Восток, представленных в открытом доступе Гидрометцентром России. Разработка нейросетевой модели прогнозирования выполнена на базе специализированного модуля платформы Loginom версии 7.1. **Результаты и обсуждение.** В работе представлены преимущества методов нейросетевого прогнозирования осложнения эпидемиологической обстановки по ГЛПС на основе анализа сложных, нелинейных зависимостей влияния абиотических факторов на заболеваемость населения. Разработан типовой сценарий для нейросетевого прогнозирования эпидемических осложнений по ГЛПС и апробирована прогностическая модель заболеваемости на территории Саратовской области. Показано, что применение нейросетевых алгоритмов позволяет получить прогноз возможного развития эпидемиологической обстановки по ГЛПС в будущем с вероятностью 98,8 %, что позволит обеспечить качественный переход от экспертного прогнозирования к независимому анализу эпидемиологических тенденций, существенно повышая информационные возможности и значимость прогнозирования при планировании и проведении профилактических работ учреждениями Роспотребнадзора.

**Ключевые слова:** геморрагическая лихорадка с почечным синдромом, эпидемиологический анализ, прогноз, экспертное прогнозирование, методы машинного обучения, нейросетевое прогнозирование.

Корреспондирующий автор: Иванова Александра Васильевна, e-mail: rusrap1@microbe.ru.

Для цитирования: Иванова А.В., Сафронов В.А. Формирование объективной методической базы эпидемиологического прогнозирования заболеваемости геморрагической лихорадкой с почечным синдромом с использованием методов машинного обучения. *Проблемы особо опасных инфекций.* 2024; 3:103–110. DOI: 10.21055/0370-1069-2024-3-103-110

Поступила 22.05.2024. Принята к публ. 07.06.2024.

A.V. Ivanova, V.A. Safronov

## Formation of a Credible Methodological Framework for Epidemiological Forecasting of the Incidence of Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome Using Machine Learning Techniques

Russian Research Anti-Plague Institute "Microbe", Saratov, Russian Federation

**Abstract.** The high medical and social significance of hemorrhagic fever with renal syndrome (HFRS) in Russia is a valid argument in favor of developing qualitatively new approaches to predicting epidemiological complications. The complex nature of interaction of factors determining the intensity of epidemic manifestations requires the continuation of the search for the most reliable prognostic criteria for pre-epidemic diagnosis of HFRS, providing the completeness of information that is necessary in modern conditions to optimize the epidemic process management. **The aim** of the work was to form an objective methodological basis for predicting the epidemiological situation on HFRS through the use of machine learning in modeling the effect of combinations of abiotic risk factors on the actual incidence of HFRS. **Materials and methods.** The study materials comprised the data on 10,788 cases of HFRS, registered in the Saratov Region between 1982 and 2022. More than 46 thousand values of meteorological indicators obtained from the archive of the database of meteorological observations for the period of 1981–2023 of the Saratov – South-East meteorological station, presented in the open access by the Hydrometeorological Center of Russia, are considered as factors likely to influence the epidemic process of HFRS. The development of a neural network forecasting model is based on a specialized module of the Loginom platform version 7.1. **Results and discussion.** The paper presents the advantages of neural network forecasting of complications of the epidemiological situation on HFRS based on the analysis of complex, nonlinear dependencies of the influence of abiotic factors on the morbidity among the population. A standard scenario for neural network forecasting of epidemic complications due to HFRS has been developed and a prognostic model of incidence in the Saratov Region has been tested. It is shown that the use of neural network algorithms allows to obtain

a forecast of the possible development of the epidemiological situation on HFRS in the future with a probability of 98.8 %, which will ensure a qualitative transition from expert forecasting to independent analysis of epidemiological trends, significantly increasing the information capacities and importance of forecasting when planning and conducting preventive measures by the efforts of Rospotrebnadzor institutions.

*Key words:* hemorrhagic fever with renal syndrome, epidemiological analysis, forecast, expert forecasting, machine learning methods, neural network forecasting.

*Conflict of interest:* The authors declare no conflict of interest.

*Funding:* The authors declare no additional financial support for this study.

*Corresponding author:* Aleksandra V. Ivanova, e-mail: rusrapi@microbe.ru.

*Citation:* Ivanova A.V., Safronov V.A. Formation of a Credible Methodological Framework for Epidemiological Forecasting of the Incidence of Hemorrhagic Fever with Renal Syndrome Using Machine Learning Techniques. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2024; 3:103–110. (In Russian). DOI: 10.21055/0370-1069-2024-3-103-110

*Received* 22.05.2024. *Accepted* 07.06.2024.

Ivanova A.V., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4849-3866>

Safronov V.A., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9563-2833>

Современный эпидемиологический надзор за геморрагической лихорадкой с почечным синдромом (ГЛПС) ориентирован на уменьшение информационной неопределенности при принятии управленческих решений [1]. Преимущество рационально организованного эпидемиологического надзора заключается в способности предвидения осложнений эпидемической ситуации для заблаговременной корректировки тактики лечебно-профилактической и противоэпидемической работы. Согласно ранее проведенным исследованиям [2] показано, что экономический ущерб, наносимый одним случаем ГЛПС в Российской Федерации, составляет от 95 тыс. до 140 тыс. рублей, в зависимости от возраста заболевших, а каждый летальный случай ГЛПС с учетом потерянных лет экономической активности и упущенной выгоды ВВП обходится государству в сумму до 38 млн рублей. Существенные потери в экономике являются значимым аргументом в пользу разработок качественно новых подходов к прогнозированию эпидемических осложнений ГЛПС, при которых прогноз заболеваемости рассматривается как основа для принятия управленческих решений, имеющих упреждающее действие.

Составление ежегодного эпидемиологического прогноза по ГЛПС в настоящее время выполняется преимущественно за счет методов экспертного прогнозирования, основанных на опыте, интуиции и знаниях конкретного эксперта для прогнозирования будущих событий. В арсенале экспертов имеются множество методик статистического анализа, таких как экстраполяция, регрессионный анализ, методы сглаживания данных и др. [3, 4], позволяющих прогнозировать по типу прямой или обратной зависимости действующих факторов, предполагая, что будущие события будут повторяться или иметь определенные закономерности, которые можно выявить и использовать для прогнозирования. Статистические методы позволяют учесть определенные закономерности, однако могут быть существенно ограничены в случаях, когда данные имеют высокую степень изменчивости или результат анализа подвержен влиянию внешних факторов. Достоверность статистического прогноза также зависит от непрерывно-

сти данных, что не всегда может быть достигнуто в реальных условиях. Подобные прогнозы могут быть ограничены субъективностью и возможными ошибками экспертов. Постоянная работа со сводными таблицами исходных данных требует от сотрудника предельной внимательности и больших трудозатрат. Трудоемкость процесса приводит к увеличению сроков формирования прогноза.

Ключевыми параметрами достижения высокой точности прогноза являются адекватность и надежность используемых первичных данных с полным обеспечением качественной и количественной информации в необходимом для прогнозирования объеме [5].

В настоящее время эпидемиологические прогнозы по ГЛПС (краткосрочные и среднесрочные) строятся на оперативных и ретроспективных данных эпизоотологического обследования территории (оценка численности и инфицированности грызунов в конкретных локациях). Многолетние исследования подтверждают сильную положительную корреляционную связь между численностью эпидемиологически значимых грызунов и заболеваемостью населения на конкретных территориях [6, 7]. Численность инфицированных грызунов имеет еще более сильную корреляционную связь с заболеваемостью населения [8–10]. Фактически полевые зоологические работы и их результаты являются на сегодняшний день ключевым начальным этапом оперативного анализа в эпиднадзоре за ГЛПС. При этом экстраполяция результатов, полученных в нескольких точках обследования на всю исследуемую территорию, существенно снижает информативность формируемого прогноза и позволяет лишь ориентировочно понять складывающуюся картину на территории. Кроме того, имеющийся дефицит кадрового потенциала работников зоологического профиля приводит к снижению полноты получаемых при эпизоотологическом мониторинге данных [11]. В связи с тем, что обследованию подлежат выборочные локации, а не вся территория, данные такого эпизоотологического обследования весьма приблизительно позволяют спрогнозировать эпидемиологическую ситуацию по ГЛПС. Отмеченные особенности учета биотических

факторов свидетельствуют о том, что статистические зоологические данные (численность и инфицированность грызунов), используемые экспертами в качестве прогностических критериев осложнения эпидемиологической обстановки, хотя и остаются оперативным элементом оценки территории риска заражения ГЛПС в системе эпидемиологического надзора, однако сами по себе не способны обеспечить ту полноту информации, которая необходима в современных условиях для оптимизации управления эпидемическим процессом.

Вследствие вышесказанного поиск наиболее достоверных прогностических критериев предэпидемической диагностики ГЛПС является крайне актуальной задачей совершенствования эпидемиологического надзора на современном этапе. Для построения достоверных прогнозов заболеваемости ГЛПС необходим сплошной, независимый от внешних факторов, непрерывный ряд данных, доступных для анализа, регистрируемых постоянно на протяжении продолжительного временного периода (т.е. доступные данные для прогностической оценки в целом по исследуемой территории, а не на отдельных ее локациях).

Известно, что в основе эффективного прогнозирования должна быть заложена организация слежения за факторами, влияющими на эпидемиологическую обстановку еще до того, как она начала формироваться [12]. В условиях ограниченных возможностей использования зоологических данных в качестве прогностического критерия осложнения эпидемиологической ситуации ГЛПС и с учетом зоонозной природы болезни представляется, что искомый фактор, влияющий на заболеваемость ГЛПС, должен воздействовать на численность популяций носителей хантавирусов. Результаты научных исследований данной зависимости подтверждают существенное влияние определенных абиотических факторов на численность грызунов, оказывая на них как прямое (количество беременностей, размер помета, рождаемость и коэффициент выживаемости), так и опосредованное влияние (условия жизни и обеспеченность пищевыми ресурсами и др.) [13–16]. Природно-климатические факторы в значительной степени обуславливают выживаемость грызунов на природно-очаговых территориях и поддаются точному количественному учету.

Высокая социальная и медицинская значимость проблемы ГЛПС в Российской Федерации требует внедрения эффективных и современных методов анализа и прогнозирования, необходимых для принятия аргументированных решений, оперативного управления ситуацией и планирования профилактических мероприятий.

Перспективным решением поставленной задачи, на наш взгляд, является разработка и внедрение в практику эпидемиологического надзора за ГЛПС методик анализа и прогнозирования заболеваемости на основе методов машинного обучения. Широкое

распространение болезни в разных климатических зонах и геоботанических условиях, наблюдаемая тенденция к росту уровня заболеваемости населения на фоне постоянной профилактической поддержки в природных очагах и расширение ареала циркуляции хантавирусов свидетельствуют о наличии сложного характера взаимодействия факторов, определяющих активность эпизоотического процесса и интенсивность эпидемических проявлений. Проблема анализа таких сложных, нелинейных зависимостей и опосредованно действующих компонентов может быть эффективно решена при использовании возможностей искусственных нейронных сетей, представляющих собой математические модели и их программные реализации. В последние годы наблюдается активное внедрение в практику здравоохранения нейросетевого прогнозирования развития конкретных заболеваний, осложнений, исходов, эффективности лечения [17–19], что представляет собой несомненный научный и практический интерес для эпидемиологии. Показанная на практике способность искусственных нейронных сетей создавать более достоверные модели, позволяющие получить качественный прогноз, превосходящий по точности и скорости получения результата классические статистические методы [20–22], определяет выбор данной методики для возможности прогнозирования заболеваемости ГЛПС.

Исходя из вышесказанного, **целью** работы явилось формирование объективной методической базы прогнозирования эпидемиологической обстановки по ГЛПС за счет использования методов машинного обучения при моделировании влияния комбинаций абиотических факторов риска на фактическую заболеваемость ГЛПС.

## Материалы и методы

Исследование проводилось на основе анализа заболеваемости ГЛПС на территории Саратовской области. Материалы исследования составили данные о 10 788 случаях заболевания ГЛПС, зарегистрированных с 1982 по 2022 г., полученные из форм отчетности № 1 «Сведения об инфекционных и паразитарных заболеваниях» и архивных статистических материалов. Каждый случай заболевания персонифицирован и имеет дату регистрации болезни.

Климатические характеристики получены из архива базы данных метеонаблюдений за период 1981–2023 гг. метеостанции Саратов – Юго-Восток, представленных в открытом доступе Гидрометцентром России [23]. В работе использовано более 46 тыс. значений метеопоказателей, приведенных за каждый день изучаемого периода. В исследование взяты следующие величины:

- максимальная, минимальная, среднесуточная температура (градусы Цельсия);
- атмосферное давление (миллиметры ртутного столба);
- скорость ветра (метры в секунду);

- количество осадков (миллиметры);
- высота снежного покрова (сантиметры);
- относительная влажность (%);
- направление ветра.

Разработка нейросетевой модели прогнозирования выполнена на базе специализированного модуля платформы Loginom версии 7.1.

### Результаты и обсуждение

Вся работа по отбору критериев прогностической оценки, обучению и тестированию нейронных сетей выполнена в три этапа.

На первом этапе исследования проведенный анализ заболеваемости ГЛПС в Саратовской области показал, что наряду со стабильно напряженной эпидемиологической обстановкой по ГЛПС (ежегодная регистрация болезни с 1964 г.) при сочетанном влиянии определенных факторов в отдельные годы происходят резкие подъемы заболеваемости. Общее число больных в годы эпидемических вспышек превышало в несколько раз не только средние многолетние показатели по области (в 11,5 раза – в 1986 г.; в 5,8 раза – в 2014 г.; в 14,18 раза – в 2019 г.), но и было выше заболеваемости в целом по Российской Федерации (в 17,17 раза – в 1986 г.; в 5,6 раза – в 2014 г.; в 11,5 раза – в 2019 г.) [24]. При этом среднее значение многолетнего интенсивного показателя по Саратовской области составляет 4,89 на 100 тыс. населения, что соответствует порядка 300 заболевшим в год. Данная величина использована в работе как базовый среднесуточный уровень заболевших.

Статистическая обработка ретроспективных данных показала, что активная регистрация заболевших в области начинается с мая, а пик заболеваемости приходится на октябрь-декабрь, обуславливая осенне-зимнюю сезонность ГЛПС, характерную для области. Учитывая продолжительный инкубационный период болезни, можно предположить, что случаи, регистрируемые в начале года (январь-февраль), являются результатом заражения ГЛПС в прошлом году или спорадической заболеваемостью, связанной с миграцией инфицированных грызунов в теплые постройки человека, а не активацией природного очага. Учитывая вышесказанное, в данной работе за период прогнозирования осложнения эпидемиологической обстановки по ГЛПС принят значимый в эпидемиологическом отношении промежуток времени с мая предыдущего года по май текущего.

В качестве факторов, предположительно оказывающих влияние на заболеваемость ГЛПС в зависимости от сезона года, нами рассмотрены 34 абиотических показателя с установленной климатической нормой, характерной для Саратовской области по литературным данным [25]. Пример рассмотренных в работе показателей приведен в табл. 1.

Для подтверждения наличия влияния всех принятых в анализ абиотических (климатических) факторов на заболеваемость ГЛПС проведен корреля-

ционный анализ. По коэффициенту Пирсона  $r \geq 0,62$  (сильная связь) для дальнейшего моделирования отобраны только восемь климатических показателей (табл. 2).

Уровень значимости выбранных показателей подтвержден выполненным анализом методом конечных классов [5, 26], по результатам которого у каждого из восьми выбранных показателей уровень значимости соответствовал самому высокому рангу (более 0,3).

Таким образом, в ходе первого этапа исследования сформирована обучающая выборка для фор-

Таблица 1 / Table 1

**Примеры климатических характеристик, рассмотренных в работе**  
**Examples of climatic characteristics discussed in the work**

№ No.	Факт (Саратовская область) / Event (Saratov Region)
ЗИМА (20 ноября – 20 марта) / WINTER (November 20 – March 20)	
1	Устойчивый снежный покров: норма 20 ноября – 10 декабря Stable snow cover: standard time – November 20 – December 10
2	Высота снежного покрова: норма 30–40 см Snow depth: standard indicator is 30–40 cm
3	Продолжительность устойчивого снежного покрова: норма 132 дня Period of stable snow cover: standard period is 132 days
4	Резкий суточный перепад зимних температур – 10 °C и более: норма 3 дня Extreme daily winter temperature variations – 10 °C or more: the norm is 3 days
5	Число дней с оттепелью: норма 11 дней Number of days of warm spells (thawing weather): standard value is 11 days
...	
ВЕСНА (21 марта – 30 апреля) / SPRING (March 21 – April 30)	
1	Продолжительность снеготаяния: норма 13–20 дней Duration of snowmelt: standard period is 13–20 days
2	Среднее количество осадков: норма 60 мм Average level of precipitation: the norm is 60 mm
3	Период перехода от 0 до 10 °C: норма 25 дней Temperature shift from 0 to 10 °C: standard timeline is 25 days
...	
ЛЕТО (1 мая – 20 сентября) / SUMMER (May 1 – September 20)	
1	Количество дней с температурой 30 °C: норма 25 дней Number of days when temperature reaches 30 °C: standard indicator is 25 days
2	Количество дней с температурой выше 10 °C: норма 120–150 дней Number of days when temperature is above 10 °C: standard indicator is 120–150 days
3	Среднее количество осадков: норма 200 мм Average level of precipitation: the norm is 200 mm
...	
ОСЕНЬ (20 сентября – 20 ноября) / AUTUMN (September 20 – November 20)	
1	Период перехода температуры от 10 до 5 °C: норма 20–25 дней Temperature shift from 10 to 5 °C: standard timeline is 20–25 days
...	

Таблица 2 / Table 2

Результаты корреляционного анализа для абиотических показателей, имеющих сильную связь с заболеваемостью населения

Results of correlation analysis of abiotic indicators that have a strong connection with population morbidity

№ No.	Показатель коэффициента Пирсона Pearson's coefficient value	Действующий фактор в зависимости от сезона года Operative factor depending on the season of the year
1	0,695564407	Лето   Максимальное количество осадков Summer   Maximum precipitation
2	0,694629056	Зима   Высота снежного покрова, февраль Winter   Snow depth, February
3	0,63781759	Зима   Средняя высота снежного покрова
4	0,688498758	Зима   Максимальная высота снежного покрова Winter   Average snow depth
5	0,621612414	Зима   Максимальное количество осадков Winter   Maximum precipitation
6	0,697603402	Зима   Суммарное количество осадков Winter   Total precipitation
7	0,771542054	Весна   Максимальная температура воздуха Spring   Maximum air temperature
8	-0,639195045	Зима   Количество дней оттепели Winter   Number of days of thawing weather

мирования нейросетевой модели прогнозирования. В выборку вошли данные по заболевшим ГЛПС в Саратовской области за период с 1982 по 2021 г., распределенные по месяцам регистрации случаев болезни, и восемь абиотических показателей, имеющих статистически достоверное влияние на заболеваемость. В качестве пороговой величины, определяющей эпидемическое осложнение по ГЛПС в области, определено значение в 300 заболевших. За период прогнозирования принят не календарный год, а наиболее значимый в эпидемиологическом отношении промежуток времени – с мая предыдущего по май текущего года. Все исходные данные распределены на контрольную и тестовую выборки, необходимые для управления процессом обучения. Сформированы категории прогноза – результат прогностической

оценки будет характеризовать динамику ожидаемой заболеваемости по трем уровням: ожидаемая заболеваемость на уровне среднесезонных показателей; ожидаемая заболеваемость на уровне выше или ниже среднесезонной, выраженная в процентах. Данные о заболеваемости в 2022 г. на сеть не подавались и были зарезервированы для проверки эффективности созданной нейросетевой модели и качества ее прогноза.

На втором этапе происходило «обучение» нейронной сети. В ходе обучения проанализированы 13 142 комбинации влияния восьми выбранных климатических факторов на заболеваемость ГЛПС в области. Полученные данные использованы для построения и обучения 88 нейросетевых моделей. По результатам оценки качества для каждой из полученных моделей рассчитана среднеквадратическая ошибка – критерием успешного обучения являлось последовательное уменьшение ошибки на обучаемом множестве. В работу взята наиболее простая модель с наименьшим количеством ошибок (модель № 28), отношение стандартного отклонения которой равнялось нулю.

Алгоритм анализа, используемый моделью, схематично представлен на рисунке. При вводе в модель фактических данных восьми выбранных ранее параметров за анализируемый период (с мая предыдущего года по май текущего) «обученная» нейронная сеть самостоятельно осуществляет комбинирование всех возможных сочетаний действия факторов и определяет возможный результат прогнозирования.

Преимущество методики заключается в реализации возможности ручной настройки параметров, позволяющей задавать интересующие параметры задолго до наступления эпидемического сезона в условиях отсутствия фактических данных. С помощью инструмента визуализации прогноза посредством построения так называемого «куба возможных решений» можно искусственно вводить интересующие параметры климатических данных и прогнозировать заболеваемость на ближайшую перспективу, ориентируясь на среднегодовые значения выбранных показателей, которые нейросеть рассчитает самостоя-

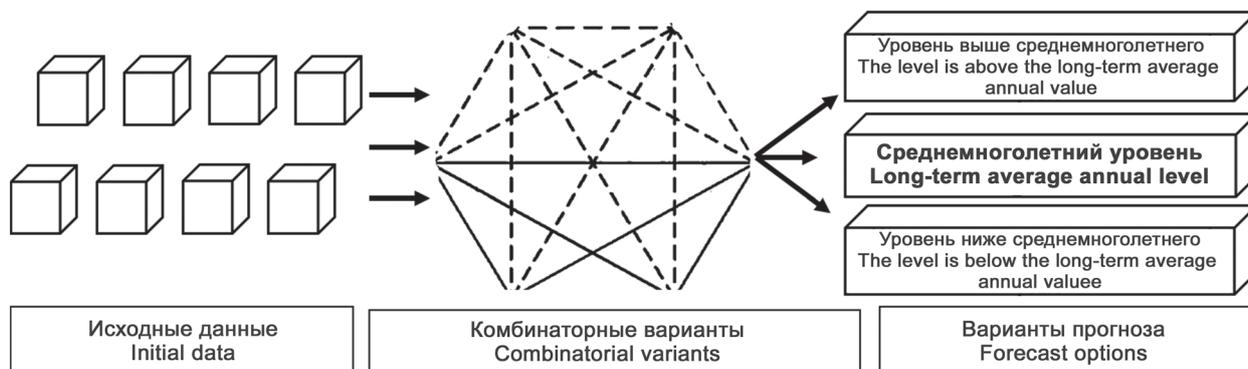


Схема алгоритма прогностической оценки

Schematic algorithm of the prognostic assessment

тельно. Например, какой вариант прогноза возможен, если в текущем году количество дней с температурой выше 10 °С будет выше среднееголетних значений, высота снежного покрова в феврале останется на уровне среднееголетних значений, а количество осадков весной значительно превысит многолетнюю норму. При этом необходимо отметить, что при использовании фактических данных выбранных для создания нейронной сети параметров точность прогноза повышается.

На третьем этапе выполнено тестирование полученной модели путем сравнения прогнозируемых значений с набором известных данных, которые ранее на сеть не подавались. Достоверность прогнозирования заболеваемости ГЛПС по разработанной модели проверена по методике оценки точности нейросетевых моделей [27, 28]. В нашем исследовании по ретроспективным данным правильное прогнозирование развития осложнения эпидемиологической обстановки по ГЛПС в Саратовской области получено в 98,8 % случаях. При использовании тестовых данных по заболеваемости ГЛПС в Саратовской области в 2023 г., не подаваемых на сеть в режиме обучения, получен достоверный результат прогнозирования: ожидаемая заболеваемость на уровне ниже среднееголетней (фактическая – 83 случая заболевания). При этом, согласно экспертному прогнозу на 2023 г., сформированному на основании комплексной экспертной оценки эпидемиологической ситуации предыдущего года и фактических эпизоотологических данных осуществленного мониторинга, Саратовская область была отнесена к территориям с высоким прогностическим риском осложнения эпидемиологической ситуации по ГЛПС в 2023 г. [29].

Необходимо отметить, что рассматриваемая модель специфична только для территории Саратовской области. Для использования представленного подхода к прогнозированию ГЛПС в других регионах России, в связи с широким разнообразием климатических, ландшафтных, геоботанических и других особенностей территории, формирующих структуру и обуславливающих активность природного очага ГЛПС, необходимо полностью «переобучить» нейронную сеть с помощью данных, характерных для исследуемых территорий. Предложенный нами методический подход к прогнозированию эпидемиологической обстановки по ГЛПС подразумевает не создание единой универсальной модели прогнозирования, а построение неизменного сценария исследования с возможностью в считанные минуты «переобучить» нейронную сеть под региональную специфику.

Таким образом, внедрение в практику методического подхода к прогнозированию ГЛПС на базе методов нейросетевого прогнозирования позволит обеспечить качественный переход от экспертного прогнозирования к независимому анализу эпидемиологических тенденций, основанному на сплошном, непрерывном ряде достоверных фактических данных. В связи с этим ежегодные прогнозы эпи-

демиологической обстановки в природных очагах ГЛПС Российской Федерации приобретут фактическую аналитическую базу, что несомненно повысит их информационные возможности и значимость при планировании и проведении профилактических работ учреждениями Роспотребнадзора.

**Конфликт интересов.** Авторы подтверждают отсутствие конфликта финансовых/нефинансовых интересов, связанных с написанием статьи.

**Финансирование.** Авторы заявляют об отсутствии дополнительного финансирования при проведении данного исследования.

### Список литературы

1. Онищенко Г.Г., Ежлова Е.Б. Эпидемиологический надзор и профилактика геморрагической лихорадки с почечным синдромом в РФ. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии*. 2013; 4:23–32.
2. Иванова А.В., Сафронов В.А., Зубова А.А., Попов Н.В., Кожанова О.И., Матвеева Н.И., Вяткин И.Н., Щербакова С.А., Кутырев В.В. Методические подходы к оценке экономического ущерба, связанного с заболеваемостью геморрагической лихорадкой с почечным синдромом в Российской Федерации. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2023; 1:96–104. DOI: 10.21055/0370-1069-2023-1-96-104.
3. Чистик О.Ф. Статистический подход к исследованию заболеваемости населения России. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2018; 7:4–11.
4. Чистик О.Ф. Статистический анализ заболеваемости и смертности. *Вестник Самарского государственного экономического университета*. 2019; 9:65–72. DOI: 10.46554/1993-0453-2019-9-179-65-72.
5. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям: Учеб. пособие. 2-е изд., испр. СПб.: Питер, 2013. 704 с.: ил.
6. Бернштейн А.Д., Апекина Н.С., Копылова Л.Ф., Хворенков А.В., Мясников Ю.А., Михайлова Т.В., Гавриловская И.Н. Особенности проявления лесных очагов геморрагической лихорадки с почечным синдромом, расположенных в оптимуме ареала рыжей полевки. *РЭТ-инфо*. 2000; 3:11–17.
7. Жигальский О.А., Кшняев И.А. Популяционные циклы европейской рыжей полевки в оптимуме ареала. *Экология*. 2000; 5:376–83.
8. Берштейн А.Д., Гавриловская И.Н., Апекина Н.С., Дзагурова Т.К., Ткаченко Е.А. Особенности природного очаговости хантавирусных зоонозов. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2010; (2):5–13.
9. Коренберг Э.И. Природная очаговость инфекций: современные проблемы и перспективы исследований. *Зоологический журнал*. 2010; 89(1):5–17.
10. Кушнарева Т.В. Эпизоотологический потенциал мышевидных грызунов в природных очагах хантавирусной инфекции и его эпидемиологическое значение. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2008; 2:50–2.
11. Транквиловский Д.В. Современное состояние организации зоолого-эпидемиологического, эпизоотологического мониторинга в России. *Пест-менеджмент*. 2022; 3:16–9. DOI: 10.25732/PM.2022.123.3.003.
12. Беляков В.Д. Управляемые инфекции и саморегуляция паразитарных систем. *Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии*. 1986; 63(11):8–12.
13. Прислегина Д.А., Дубянский В.М., Платонов А.Е., Малецкая О.В. Влияние природно-климатических факторов на эпидемиологическую ситуацию по природно-очаговым инфекциям. *Инфекция и иммунитет*. 2021; 11(5):820–36. DOI: 10.15789/2220-7619-ЕОТ-1631.
14. Лифиренко Н.Г., Костина Н.В. К оценке возможного влияния климата на эпидемический процесс. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2008; 10(2):333–9.
15. Малецкая О.В., Таран Т.В., Прислегина Д.А., Платонов А.Е., Дубянский В.М., Вольнкина А.С., Василенко Н.Ф., Тохов Ю.Н., Цапко Н.В. Природно-очаговые вирусные лихорадки на юге европейской части России. Геморрагическая лихорадка с почечным синдромом. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2019; 4:79–84. DOI: 10.21055/0370-1069-2019-4-79-84.
16. Платонов А.Е. Влияние погодных условий на эпидемиологию трансмиссивных инфекций (на примере лихорадки Западного Нила в России). *Вестник Российской академии медицинских наук*. 2006; 2:25–9.

17. Прохоренко И.О. Метод нейросетевого моделирования и его использование для прогнозирования развития соматической патологии у лиц старших возрастных групп. *Современные проблемы науки и образования*. 2013; 1:70.

18. Хасанов А.Г., Шайбаков Д.Г., Жернаков С.В., Меньшиков А.М., Бадретдинова Ф.Ф., Суфияров И.Ф., Сагадатова Ю.Р. Нейронные сети для прогнозирования динамики развития заболеваний. *Креативная хирургия и онкология*. 2020; 10(3):198–204. DOI: 10.24060/2076-3093-2020-10-3-198-204.

19. Лазаренко В.А., Антонов А.Е., Markapuram V.K., Awad K. Опыт нейросетевой диагностики и прогнозирования язвенной болезни по результатам анализа факторов риска. *Бюллетень сибирской медицины*. 2018; 17(3):88–95. DOI: 10.20538/1682-0363-2018-3-88-95.

20. Суханова Н.В. Разработка нейросетевой модели для мониторинга заболеваемости и прогнозирования эффективности противоэпидемических мер. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2020; 10:42–50. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-42-50.

21. Светлый Л.И., Лопухова В.А., Тарасенко И.В., Клишкин А.С. Применение системы оценки технологий здравоохранения в принятии эффективных управленческих решений. *Журнал научных статей «Здоровье и образование в XXI веке»*. 2013; 15(1-4):234–5.

22. Безруков Н.С., Еремин Е.Л. Построение и моделирование адаптивной нейро-нечеткой системы в задаче медицинской диагностики. *Информатика и системы управления*. 2005; 2:36–46.

23. Гидрометцентр России. [Электронный ресурс]. URL: <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda> (дата обращения 15.01.2024).

24. Иванова А.В., Сафронов В.А., Попов Н.В., Кожанова О.И., Матвеева Н.И., Крессова У.А., Чумачкова Е.А., Пospelov М.В., Архипова Г.Н., Вяткин И.Н., Щербакова С.А., Кутырев В.В. Эпидемиологические особенности вспышки ГЛПС в Саратовской области 2019 г. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2020; 2:78–85. DOI: 10.21055/0370-1069-2020-2-78-85.

25. Ормели Е.И. Оценка степени континентальности климата Саратовской области в начале XXI века. *Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле»*. 2022; 32(4):476–84. DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-4-476-484.

26. Даутов Р.З., Карчевский М.М. Введение в теорию метода конечных элементов: Учеб. пособие. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина; 2004. 239 с.

27. Гамбаров Г.М., Журавель Н.М., Королев Ю.Г. Статистическое моделирование и прогнозирование: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика; 1990. 383 с.

28. Котельников С.А., Усков А.А. Методика оценки точности нейросетевых моделей. *Программные продукты и системы*. 2008; 2:63–5.

29. Савицкая Т.А., Иванова А.В., Исаева Г.Ш., Решетникова И.Д., Трифионов В.А., Зиятдинов В.Б., Магеррамов Ш.В., Хусаинова Р.М., Транквилевский Д.В. Анализ эпидемиологической ситуации по геморрагической лихорадке с почечным синдромом в Российской Федерации в 2022 г. и прогноз ее развития на 2023 г. *Проблемы особо опасных инфекций*. 2023; 1:85–95. DOI: 10.21055/0370-1069-2023-1-85-95.

References

1. Onishchenko G.G., Ezhlova E.B. [Epidemiological surveillance and prevention of hemorrhagic fever with renal syndrome in the Russian Federation]. *Zhurnal Mikrobiologii, Epidemiologii i Immunologii [Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunology]*. 2013; (4):23–32.

2. Ivanova A.V., Safronov V.A., Zubova A.A., Popov N.V., Kozhanova O.I., Matveeva N.I., Vyatkin I.N., Shcherbakova S.A., Kutuyev V.V. [Methodological approaches to assessing the economic damage associated with the incidence of hemorrhagic fever with renal syndrome in the Russian Federation]. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2023; (1):96–104. DOI: 10.21055/0370-1069-2023-1-96-104.

3. Chistik O.F. [Statistical approach to the study of morbidity in the Russian population]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii [Intelligence. Innovation. Investment]*. 2018; (7):4–11.

4. Chistik O.F. [Statistical analysis of morbidity and mortality]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta [Bulletin of the Samara State University of Economics]*. 2019; (9):65–72. DOI: 10.46554/1993-0453-2019-9-179-65-72.

5. Paklin N.B., Oreshkov V.I. [Business Analytics: from Data to Knowledge: A Study Guide]. 2nd ed., revised. St. Petersburg; 2013. 704 p.: illustrated.

6. Bernstein A.D., Apekina N.S., Kopylova L.F., Khvorenkov A.V., Myasnikov Yu.A., Mikhailova T.V., Gavrilovskaya I.N. [Features of the manifestation of forest foci of hemorrhagic fever

with renal syndrome, located in the optimum range of the red vole]. *[RAT info]*. 2000; (3):11–7.

7. Zhigalsky O.A., Kshnyasev I.A. [Population cycles of the European red vole in the optimum range]. *Ekologiya [Ecology]*. 2000; (5):376–83.

8. Berstein A.D., Gavrilovskaya I.N., Apekina N.S., Dzagurova T.K., Tkachenko E.A. [Features of the natural focality of hantavirus zoonoses]. *Epidemiologiya i Vaksino profilaktika [Epidemiology and Vaccinal Prevention]*. 2010; (2):5–13.

9. Korenberg E.I. [Natural focality of infections: current problems and research prospects]. *Zoologicheskyy Zhurnal [Zoological Journal]*. 2010; 89(1):5–17.

10. Kushnareva T.V. [Epizootiological potential of mouse-like rodents in natural foci of hantavirus infection and its epidemiological significance]. *Tikhookeansky Meditsinsky Zhurnal [Pacific Medical Journal]*. 2008; (2):50–2.

11. Tranquilevsky D.V. [The current state of the organization of zoological, entomological, epizootiological monitoring in Russia]. *[Pest Management]*. 2022; (3):16–9. DOI: 10.25732/PM.2022.123.3.003

12. Belyakov V.D. [Controlled infections and self-regulation of parasitic systems]. *Zhurnal Mikrobiologii, Epidemiologii i Immunologii [Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunology]*. 1986; 63(11):8–12.

13. Prislegina D.A., Dubyansky V.M., Platonov A.E., Maletskaya O.V. [Influence of natural and climatic factors on the epidemiological situation of natural focal infections]. *Infektsiya i Immunitet [Russian Journal of Infection and Immunity]*. 2021; 11(5):820–36. DOI: 10.15789/2220-7619-EOT-1631.

14. Lifrenko N.G., Kostina N.V. [To assess the possible impact of climate on the epidemic process]. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Tsentra Rossijskoj Akademii Nauk [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]*. 2008; 10(2):333–9.

15. Maletskaya O.V., Taran T.V., Prislegina D.A., Platonov A.E., Dubyansky V.M., Volinkina A.S., Vasilenko N.F., Tokhov Yu.N., Tsapko N.V. [Natural focal viral fevers in the south of the European part of Russia. Hemorrhagic fever with renal syndrome]. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2019; (4):79–84. DOI: 10.21055/0370-1069-2019-4-79-84.

16. Platonov A.E. [The influence of weather conditions on the epidemiology of vector-borne infections (by the example of West Nile fever in Russia)]. *Vestnik Rossijskoj Akademii Meditsinskikh Nauk [Bulletin of the Russian Academy of Medical Sciences]*. 2006; (2):25–9.

17. Prokhorenko I.O. [The method of neural network modeling and its use for predicting the development of somatic pathology in older age groups]. *Sovremennyye Problemy Nauki i Obrazovaniya [Modern Problems of Science and Education]*. 2013; (1):70.

18. Khasanov A.G., Shaibakov D.G., Zhernakov S.V., Mentshikov A.M., Badretdinova F.F., Suфияров I.F., Sagadatova Yu.R. [Neural networks for predicting the dynamics of disease development]. *Kreativnaya Khirurgiya i Onkologiya [Creative Surgery and Oncology]*. 2020; 10(3):198–204. DOI: 10.24060/2076-3093-2020-10-3-198-204.

19. Lazarenko V.A., Antonov A.E., Markapuram V.K., Awad K. [The experience of neural network diagnostics and forecasting of peptic ulcer disease based on the results of risk factor analysis]. *Byulleten Sibirskoy Meditsiny [Bulletin of Siberian Medicine]*. 2018; 17(3):88–95. DOI: 10.20538/1682-0363-2018-3-88-95.

20. Sukhanova N.V. [Development of a neural network model for monitoring morbidity and predicting the effectiveness of anti-epidemic measures]. *Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta [Bulletin of the Bryansk State Technical University]*. 2020; (10):42–50. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-10-42-50.

21. Svetly L.I., Lopukhova V.A., Tarasenko I.V., Klimkin A.S. [Application of the health technology assessment system in making effective management decisions]. *[Journal of Scientific Articles "Health and Education in the XXI Century"]*. 2013; 15(1-4):234–5.

22. Bezrukov N.S., Eremin E.L. [Construction and modeling of an adaptive neuro-fuzzy system in the task of medical diagnostics]. *Informatika i Sistemy Upravleniya. [Computer Science and Management Systems]*. 2005; 2:36–46.

23. Hydrometeorological Centre of Russia. (Cited 15 Jan 2024). [Internet]. Available from: <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda>.

24. Ivanova A.V., Safronov V.A., Popov N.V., Kozhanova O.I., Matveeva N.I., Kresova U.A., Chumachkova E.A., Pospelov M.V., Arkhipova G.N., Vyatkin I.N., Shcherbakova S.A., Kutuyev V.V. [Epidemiological features of the HFRS outbreak in the Saratov Region in 2019]. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]*. 2020; (2):78–85. DOI: 10.21055/0370-1069-2020-2-78-85.

25. Ormeli E.I. [Assessment of the degree of continentality of the climate of the Saratov region at the beginning of the XXI century]. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Seriya «Biologiya*.

*Nauki o Zemle» [Bulletin of the Udmurt University. "Biology. Earth Sciences" Series]. 2022; 32(4):476–84. DOI: 10.35634/2412-9518-2022-32-4-476-484.*

26. Dautov R.Z., Karchevsky M.M. [Introduction to the Theory of the Finite Element Method. A Study Guide]. Kazan: Kazan State University named after V.I. Ulyanov-Lenin; 2004. 239 p.

27. Gambarov G.M., Zhuravel' N.M., Korolev Yu.G. [Statistical Modeling and Forecasting: A Study Guide]. Moscow: "Finance and Statistics"; 1990. 383 p.

28. Kotelnikov S.A., Uskov A.A. [Methodology for evaluating the accuracy of neural network models]. *Programmnye Produkty i Sistemy [Software Products and Systems]. 2008; (2):63–5.*

29. Savitskaya T.A., Ivanova A.V., Isaeva G.Sh., Reshetnikova I.D., Trifonov V.A., Ziatdinov V.B., Magerramov Sh.V., Khusainova R.M., Tranquilevsky D.V. [Analysis of the epidemiological situation

of hemorrhagic fever with renal syndrome in the Russian Federation in 2022 and forecast of its development for 2023]. *Problemy Osobo Opasnykh Infektsii [Problems of Particularly Dangerous Infections]. 2023; (1):85–95. DOI: 10.21055/0370-1069-2023-1-85-95.*

**Authors:**

*Ivanova A.V., Safronov V.A.* Russian Research Anti-Plague Institute "Microbe". 46, Universitetskaya St., Saratov, 410005, Russian Federation. E-mail: rusrapi@microbe.ru.

**Об авторах:**

*Иванова А.В., Сафронов В.А.* Российский научно-исследовательский противочумный институт «Микроб». Российская Федерация, 410005, Саратов, ул. Университетская, 46. E-mail: rusrapi@microbe.ru.