

УДК 619:616.9-036.22; 619:616.9

Original Article

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ЭПИЗООТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЧУМЫ СРЕДИ ДИКИХ ЖИВОТНЫХ В ПУСТЫННЫХ ОЧАГАХ ЧУМЫ КАЗАХСТАНА ЗА ПЕРИОД 2020-2024 ГГ. НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Абдел З.Ж.¹ , Жумадилова З.Б.¹ , Айкимбаев А.М.¹ , Токмурзиева Г.Ж.¹ , Мусагалиева Р.С.¹ , Абдирасилова А.А.¹ , Исаева С.Б.¹, Байгурсын Б.А.¹ , Далибаев Ж.С.¹ , Абделиев Б.З.¹ , Бегимбаева Э.Ж.¹ , Шаяхметов А.М.¹ , Садовская В.П.¹ , Шаки Н.Н.¹ , Отебай Д.М.¹ , Сагидулин Т.З.¹ , Курманов Ж.Б.² , Нурмагамбетова Л.Б.³ , Даурбаев А.Ш.⁴ , Асимкулов Е.А.⁵ , Сайрамбекова Г.М.¹ *

¹Национальный научный центр особо опасных инфекций им. М. Айкимбаева, Алматы, Республика Казахстан

²Актюбинская противочумная станция, Актобе, Республика Казахстан

³Атырауская противочумная станция, Атырау, Республика Казахстан

⁴Жамбылская противочумная станция, Тараз, Республика Казахстан

⁵Талдыкорганская противочумная станция, Талдыкорган, Республика Казахстан

* Автор для корреспонденции: g.sairambekova@nscedi.kz

АБСТРАКТ

Настоящее исследование направлено на пространственно-временной анализ и прогноз эпизоотического процесса чумной инфекции среди диких животных в пустынных природных очагах чумы Республики Казахстан с использованием методов геоинформационного моделирования. В качестве исходной базы использованы данные эпизоотологического мониторинга за 2020–2024 гг., включающие сведения о численности и распределении основных резервуарных видов (*Rhombomys opimus*), активности переносчиков (эктопаразитов), а также необходимые характеристики исследуемых территорий для ГИС моделирования. Обработка и визуализация пространственных данных осуществлялись с использованием программных платформ ArcGIS и QGIS. Построены ситуационные, аналитические и прогнозные электронные карты эпизоотической активности.

По результатам моделирования установлено, что в перспективе наиболее вероятно усиление эпизоотической активности в западных участках пустынной зоны Казахстана, в том числе в Северо-Приаральском, Волго-Уральском песчаном, Предустюртском и Устюртском очагах. Потенциальное усиление риска также ожидается в Бетпакдалинском, Мойынқумском и Арысқумско-Дариялықтақырском автономных очагах. В условиях прогнозируемых климатических изменений вероятность расширения зон циркуляции возбудителя чумы может возрасти, что увеличивает риск заражения людей и верблюдов на энзоотических территориях.

Результаты исследований обладают высокой прикладной значимостью и могут быть использованы для оптимизации систем эпизоотологического надзора, планирования профилактических и противоэпидемических мероприятий, а также для минимизации риска передачи чумной инфекции от животных человеку.

Ключевые слова: чума, эпизоотия, природный очаг, ГИС-технология, прогнозирование

ВВЕДЕНИЕ

Чума (*Yersinia pestis*) — одна из древнейших и наиболее опасных природно-очаговых зоонозных инфекций, сохраняющая эпидемиологическую значимость и в XXI веке [1, 2]. В прошлом заболевание характеризовалось высокой, практически 100%-й летальностью и очень высокой заразностью. Возбудителем инфекции является чумная палочка (*Yersinia pestis*, Lehmann and Neumann, 1896). Основными природными хозяевами и резервуарами чумного микроба являются различные виды грызунов (сурки, суслики, песчанки), а также некоторые зайцеобразные. Перенос возбудителя осуществляется преимущественно блохами, насчитывающими десятки видов [3, 4].

Глобальная эпидемиологическая ситуация по чуме остаётся неблагоприятной и не демонстрирует тенденции к стабилизации [5]. Эпидемиологические проявления чумы в 2014-2024 гг. зарегистрированы на территории 10 государств. Общее число случаев заболевания составило 5514, из них летальных — 605 (показатель летальности — 11,1%) [6–10]. Наиболее сложная эпидемиологическая ситуация за указанный период складывалась в Республике Мадагаскар 3457 (373) и Демократической Республике

Конго 1352 (76), которые составляют 87,2% от всех зарегистрированных случаев [11, 12].

В Казахстане природные очаги чумы (пустынного, степного, горного и смешанного типов) занимают более миллиона квадратных километров, что составляет почти 40% территории страны [13–17]. Регистрация последних случаев заболеваний людей чумной инфекцией в Казахстане было в 2003 г. [14], однако ежегодные регистрации эпизоотий диких животных представляют биологическую угрозу [18–20].

Современные методы эпизоотологического мониторинга всё чаще базируются на использовании геоинформационных систем (ГИС), дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и пространственно-статистических моделей [21, 22]. Эти инструменты позволяют объединять биологические, климатические и географические данные, визуализировать распространение инфекции, выявлять закономерности эпизоотического процесса и строить прогнозы [23].

Изучение эпизоотического процесса чумы в природных очагах Казахстана активно развивается в рамках интеграции традиционной эпизоотологии с современными

цифровыми технологиями. В ряде работ казахстанских исследователей подчеркнута роль ГИС-анализа и регрессионного моделирования в оценке биологических рисков и прогнозировании эпизоотий [21–23]. Фундаментальные аспекты природной очаговости, в том числе биоценотическая структура, сезонность и пространственная гетерогенность, подробно раскрыты в трудах российских авторов [24–26]. Значительный вклад внесён в развитие дистанционного мониторинга и компьютерного моделирования [27–34]. Международные исследования подтверждают связь динамики чумы с климатическими факторами и демонстрируют успешное применение высокоразрешающего ДЗЗ и ГИС в Центральной Азии [33, 44, 35–41].

Международные и национальные источники подчеркивают необходимость внедрения современных пространственных технологий и комплексного подхода «One Health» для эффективного эпидемиологического надзора [28–30, 39].

Применение ГИС-технологий в Казахстане доказало свою эффективность: в ряде исследований успешно использовались инструменты ArcGIS, QGIS и статистические пакеты (например, STATA) для оценки эпизоотической активности и разработки прогностических моделей в разрезе ландшафтно-эпизоотологических районов (далее — ЛЭР) [23]. Такие подходы особенно актуальны для обширной, слабо заселённой территории, где требуется оптимизация логистики мониторинга и профилактических мероприятий [28].

Цель исследования – разработка и внедрение научно обоснованных методов прогнозирования эпизоотического процесса чумы в природных очагах Казахстана на основе интеграции эпизоотологических данных с современными ГИС-технологиями, в том числе проведение пространственно-временного анализа эпизоотической активности и построение прогностической модели и карты эпизоотической опасности.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В этом разделе дается описание области исследования,

данных и используемых методов анализа данных.

2.1 Данные эпизоотологического мониторинга

В работе использованы результаты эпизоотологического мониторинга 14-и автономных очагов Центрально-Азиатского пустынного природного очага чумы Казахстана за последние пять лет (2020–2024 гг.) и многолетние данные использованных в методических рекомендациях для стран-участников Содружества Независимых Государств (СНГ). При обработке данных использованы инструменты ГИС-технологии.

Исследовательские работы были проведены по общепринятым методикам эпизоотологического мониторинга [42, 43] с использованием современных инструментов GPS-системы и ГИС-технологии. Опытно-экспериментальной базой исследования являлась Центральная референс лаборатория Национального научного центра особо опасных инфекций имени Масгута Айкимбаева Министерства здравоохранения Республики Казахстан (ННЦООИ, МЗ РК).

Полевые и лабораторные исследования проводятся на основании Постановления МЗ РК «О проведении санитарно-противоэпидемических и санитарно-профилактических мероприятий на энзоотичной по чуме территории Республики Казахстан на 2021–2025 годы» за №8 от 26.02.2021 г. Природный эндемичный по чуме ареал расположен в Казахстане на площади 1 117 000 км², что составляет примерно 41,0% территории Казахстана [44, 45] (рис. 1).

2.2 Методы и инструменты ГИС-технологий

Для обработки и анализа пространственных данных в геоинформационной среде использовалось программное обеспечение ArcGIS Desktop версии 10.8 (разработчик ESRI, Inc., США) с интегрированными расширениями ArcToolbox, Spatial Analyst и Spatial Statistics, а также свободно распространяемая геоинформационная система QGIS.

Исходные данные эпизоотологического мониторинга природных очагов чумы Республики Казахстан за период

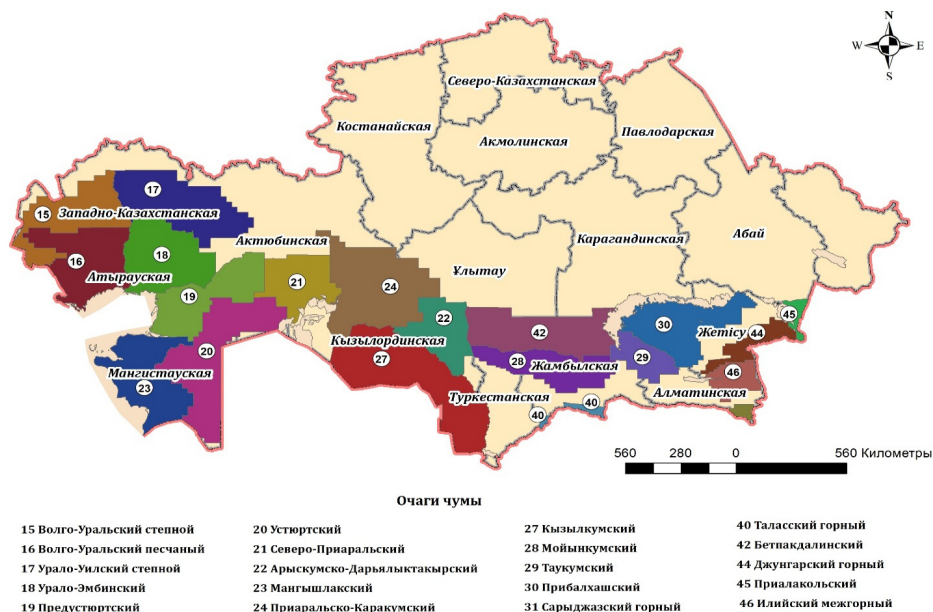


Рисунок 1. Природные очаги чумы Республики Казахстан, система координат Mercator

2020–2024 гг., предоставленные профильными научно-исследовательскими и мониторинговыми организациями, были конвертированы в базы данных, совместимые с указанными ГИС-платформами.

Пространственные данные были подготовлены в формате ArcGIS посредством создания Shape-файлов для каждой нозологической категории, включающих всю атрибутивную информацию, представленную в исходных Excel-таблицах.

Для построения прогностических моделей эпизоотической ситуации, а именно для оценки вероятности возникновения очагов чумы среди диких животных – основных носителей и переносчиков инфекции — на территориях с эндемичным распространением инфекции применялся модуль Geostatistical Analyst. В качестве базового метода интерполяции использовался алгоритм обратно взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting, IDW), позволяющий реконструировать непрерывное распределение параметров на основе дискретных наблюдений с учетом уменьшения влияния значений с увеличением расстояния от контрольных точек.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты эпизоотологического мониторинга за период 2020–2024 гг.

За анализируемый пятилетний период (2020–2024 гг.) были систематизированы, обработаны и проанализированы данные эпизоотологического мониторинга, проводимого на территории природных очагов чумы, расположенных в энзоотичных регионах Республики Казахстан (рисунок 1). В анализ были включены сведения о лабораторно подтвержденных выделениях штаммов возбудителя чумы — *Yersinia pestis*, а также результаты серологических исследований, установивших наличие антител к фракции 1 чумного микроба у основных (большая песчанка — *Rhombomys opimus*) и второстепенных резервуаров инфекции (другие виды грызунов и мелких млекопитающих).

Полученные данные позволили охарактеризовать динамику активности эпизоотического процесса в различных ЛЭРах, выявить тенденции в распространении инфекции и определить наиболее напряженные зоны где циркулирует возбудитель. На их основе были разработаны электронные карты, отображающие пространственное распределение случаев обнаружения возбудителя и серопозитивных реакций за каждый год исследуемого периода. Карты по активности эпизоотического процесса за 2020, 2021, 2022, 2023 и 2024 годы визуализированы на рисунке 2, что позволяет наглядно представить пространственно-временные изменения и очаговую структуру циркуляции *Y. pestis* в пределах пустынных и полупустынных зон Казахстана.

Рисунок демонстрирует распределение случаев эпизоотий в разрезе ЛЭРов, что позволило выявить пространственные кластеры и концентрации очагов инфекции. Группировка данных по количеству положительных результатов свидетельствует о неоднородном распределении активности эпизоотического процесса, с четко выделяющимися очагами в отдельных ЛЭРах, что обусловлено природными, биотическими и антропогенными факторами, влияющими на циркуляцию возбудителя чумы.

Для проведения всестороннего анализа полученных данных непосредственно в программе ArcMap применялись статистические методы. Случаи регистрации активности эпизоотического процесса были сгруппированы по количеству положительных результатов в разрезе ЛЭРов и в последующем с применением инструмента модуля ArcToolbox «Spatian Analist» были определены зоны высокой и низкой частоты циркуляции возбудителя чумы и активности эпизоотического процесса среди диких животных на энзоотичных по чуме территориях (рис. 3).

Данный рисунок отражает количественные показатели случаев активности эпизоотического процесса, сгруппированные по годам и территориям. Анализ показывает тенденцию изменения активности эпизоотического процесса с временным аспектом, выявляя зоны с высокой и

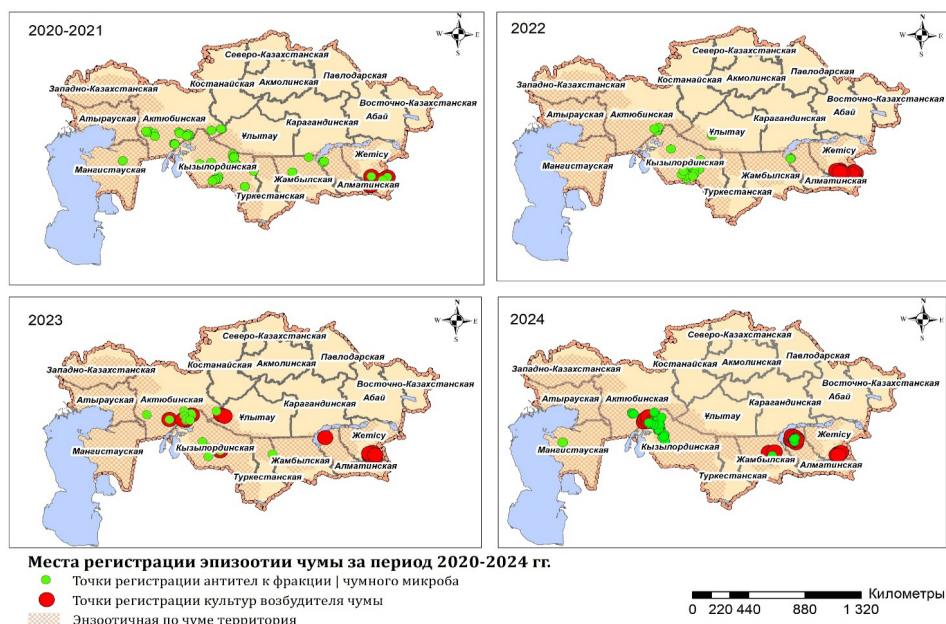


Рисунок 2. Места регистрации активности эпизоотического процесса чумы в природных очагах РК (2020–2024 гг.), система координат Mercator

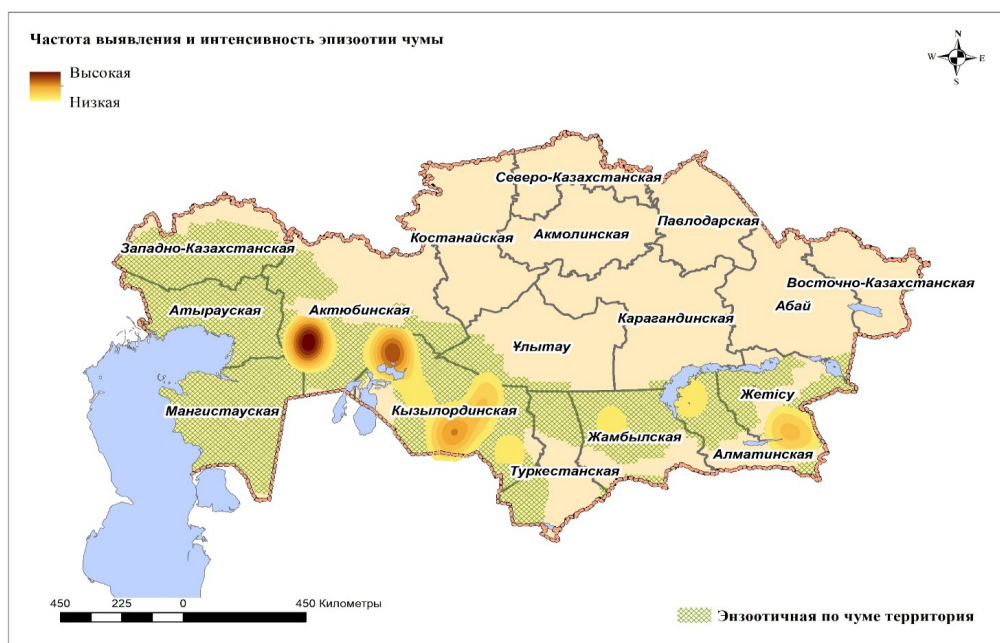


Рисунок 3. Частота выявления и активность эпизоотического процесса среди диких животных на энзоотичной по чуме территориях Казахстана (2020–2024 гг.), система координат Mercator

низкой частотой регистрации случаев. Использование инструмента «Spatial Analyst» позволило определить зоны с наибольшей циркуляцией возбудителя, что критично для планирования профилактических мероприятий.

Систематическое получение ежегодных данных эпизоотологического и эпидемиологического мониторинга по чуме позволяет отслеживать эволюционные изменения в циркуляции *Y. pestis* в природных очагах, выявлять зоны повышенного риска, а также формировать как краткосрочные, так и долгосрочные прогнозы эпизоотической и эпидемической ситуации.

Таким образом, такая градация позволяет дифференцированно подходить к планированию эпизоотологического надзора, распределению ресурсов и реализации профилактических мер с учётом реального простран-

ственного распределения риска на территории природных очагов чумы Казахстана.

Результаты анализа методов и инструментов ГИС

Для прогноза развития эпизоотической ситуации на энзоотичной по чуме территории в ArcMap использовался модуль ArcToolbox и набор инструментов «Инструменты пространственной статистики» и «Измерение географического распределения».

Как показано на снимке экрана, При пространственном анализе был сформирован новый объектный класс, содержащий один полигон в форме окружности. Эта окружность отображает совокупность данных о числе и локализации лабораторно подтверждённых эпизоотий, находящихся в пределах одного стандартного отклонения от среднего значения (рис. 4).

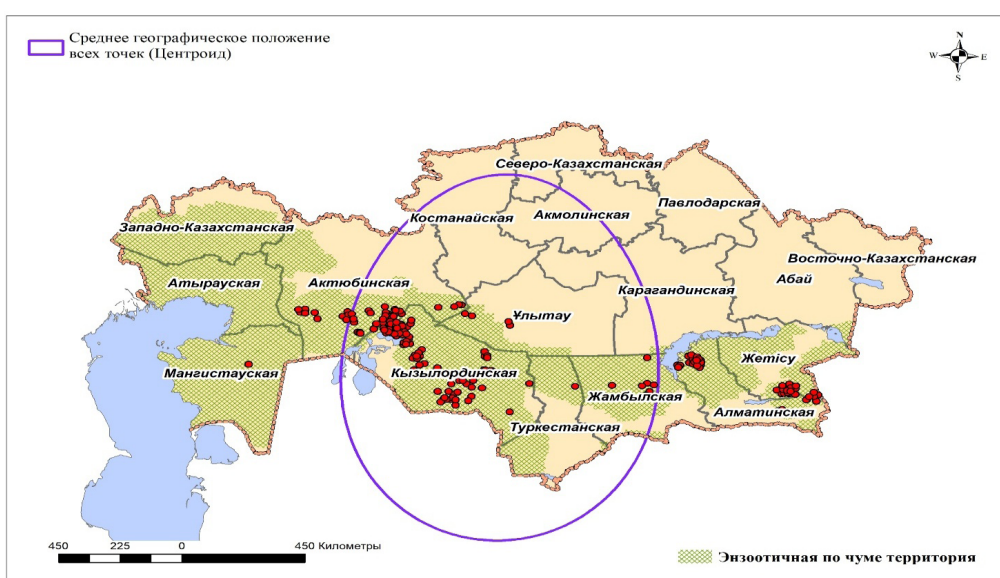


Рисунок 4. Частота регистрации эпизоотий чумы в пределах стандартного отклонения от среднего значения для дальнейшего проведения анализа и прогноза (2020–2024 гг.), система координат Mercator.

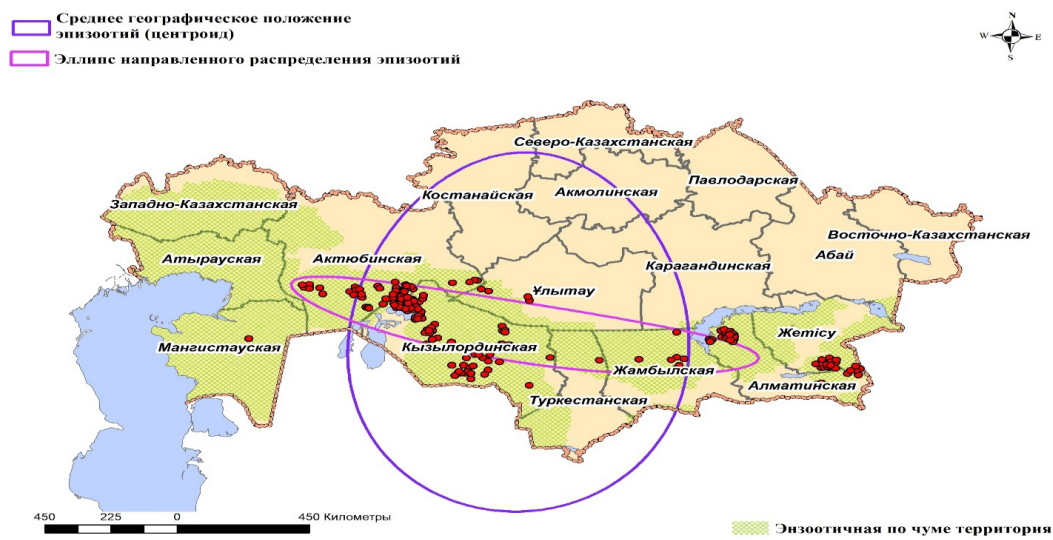


Рисунок 5. Эллипс направленного распределения эпизоотий чумы (2020–2024 гг.), система координат Mercator

Применение статистического анализа географического распределения выявило, что точки регистрации эпизоотий характеризуются значительной пространственной вариативностью — данные разбросаны на значительной территории, однако выявлен круг, включающий случаи с частотой, не выходящей за пределы стандартного отклонения. Такой подход помогает сфокусировать внимание на наиболее стабильных и репрезентативных очагах инфекции, что важно для прогнозирования и мониторинга.

Инструмент «Направленное распределение» является усовершенствованием инструмента «Стандартное расстояние», поскольку он создает эллипс, который измеряет направленный тренд данных, а также центральную тенденцию и дисперсию. Выходной эллипс показан на следующем снимке экрана (рис. 5).

Эллиптическая форма вывода дает представление о направленности пространственного распределения точек регистрации эпизоотий чумы в 2021–2024 годах. Данные по-прежнему широко разбросаны, но они дают нам представление о тенденции направленности с юго-востока на северо-запад.

Использование инструмента «Направленное распределение» позволило выявить тенденцию пространственной направленности очагов эпизоотий. Эллипс, ориентированный с юго-востока на северо-запад, указывает на линейную траекторию распространения возбудителя. Это свидетельствует о влиянии природных ландшафтных факторов (например, водоразделы, направления миграций животных) и антропогенных факторов (например, транспортные коридоры), что может служить базой для прогнозирования динамики распространения чумы.

Вся обработка данных производилась в системе координат проекции Mercator. При применении системы географических координат WGS 1984 (одной из ряда стандартных координатных систем для отображения территории Казахстана) программой создана правильная окружность.

Результаты обработки в системе координат Mercator с использованием модулей «Измерение географического

распределения» и «Инструменты пространственной статистики» продемонстрировали создание корректной геометрической модели очагов в виде окружности и эллипса. Это подтверждает корректность применения выбранных методов пространственного анализа для изучения эпизоотической ситуации чумы в масштабе региона.

На следующем этапе был проведен анализ пространственной автокорреляции, позволяющий установить, образуют ли исследуемые объекты кластеры либо их распределение носит случайный характер. Для этой цели рассчитан индекс Морана — ключевой статистический показатель, применяемый для оценки общей пространственной структуры данных. В основу анализа была положена матрица весов, учитывающая пространственное расположение объектов: каждому элементу присваивался вес в зависимости от расстояния до соседних объектов или их смежности. Такой подход даёт возможность определить уровень пространственной взаимосвязанности и выявить закономерности распределения. В дальнейшем была применена матрица весов, построенная по критерию расстояния, а её значения после расчёта подвергнуты стандартизации.

При значении индекса Морана больше нуля наблюдается положительная пространственная автокорреляция — то есть значения наблюдений в соседних территориях похожи. При отрицательных значениях индекса Морана пространственная корреляция отрицательная, наблюдения на соседних территориях отличаются. В случае, когда индекс Морана равен нулю, наблюдения на соседних территориях расположены случайным образом. Важным этапом в анализе значений индекса Морана является построение пространственной диаграммы рассеяния Морана (рис. 6). Она является графическим представлением индекса. На диаграмме отображается линия, наклон которой равен глобальному индексу Морана.

Анализ пространственной автокорреляции методом глобального индекса Морана ($\text{Moran's } I = 1.627, z = 4.39, p < 0.001$) выявил наличие статистически значимой кластеризации эпизоотий чумы. Высокое положительное зна-

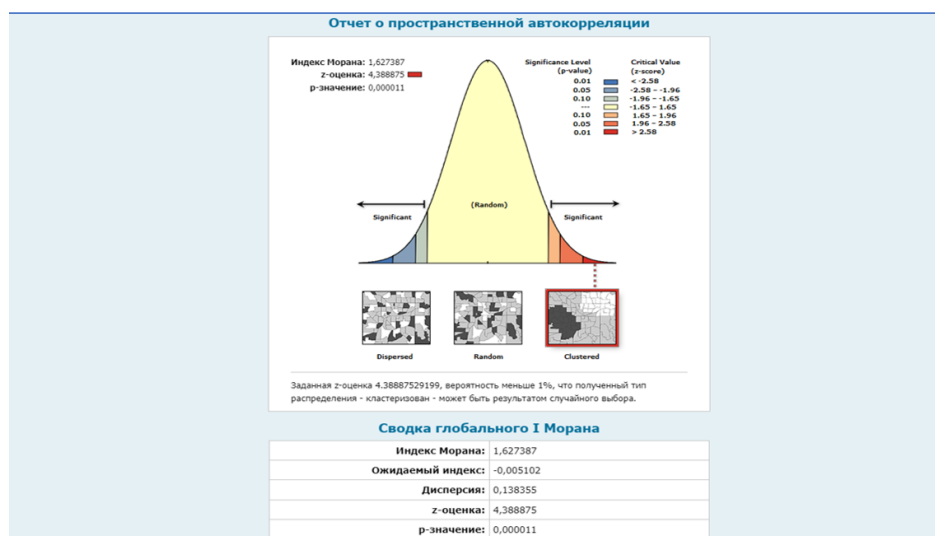


Рисунок 6. Пространственная диаграмма рассеяния Морана, глобальный индекс 1.627, z-оценка 4.39 ($p < 0.001$)

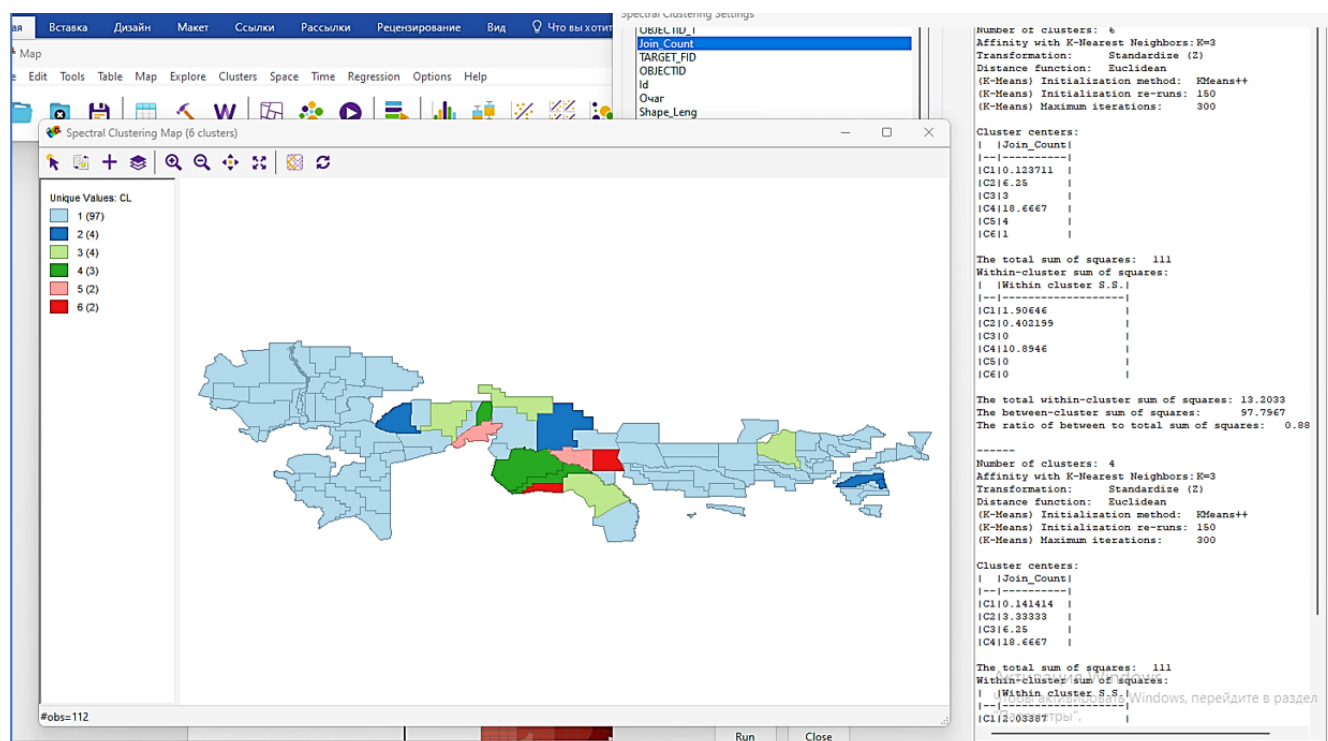


Рисунок 7. Группировка ЛЭР по числу положительных результатов с учетом повторов по годам.

чение Индекса Морана (1.627) и высокая z-оценка (4.39) свидетельствуют о сильной статистической значимости, p-значение < 0.01 означает, что результат не случаен с вероятностью более 99,0%.

Другими словами, очаги сгруппированы географически, а не разбросаны случайно по территории Казахстана, что указывает на необходимость фокусирования мониторинга в районах с высокой плотностью случаев.

Следующим этапом анализа данных являлось определение количественно-временных кластеров — за основу брались данные количества зарегистрированных случаев эпизоотий за каждый отдельный год и число повторных регистраций в одном и том же ЛЭР (рис. 7).

На данном рисунке показаны 6 кластеров по ЛЭР, сформированных на основе похожести по числу эпизо-

отий, где светло-синий цвет (кластер 1) — это преобладающее большинство ЛЭР с минимальными значениями регистрации, тогда как розовый и красный цвета (кластеры 5,6) — с высокими значениями регистрации.

Группировка ЛЭР с учетом повторных регистраций за каждый год выявила устойчивость некоторых очагов и повторяемость вспышек, что подчеркивает хронический характер эпизоотической ситуации в данных районах. Это подчеркивает важность постоянного эпизоотологического мониторинга и проведения профилактических мероприятий именно в этих ЛЭР.

Для прогнозирования эпизоотологической ситуации на энзоотичной по чуме территории был применен модуль Geostatistical Analyst, метод интерполяции, инструмент «Обратно взвешенные расстояния (ОВР)». Метод выбран

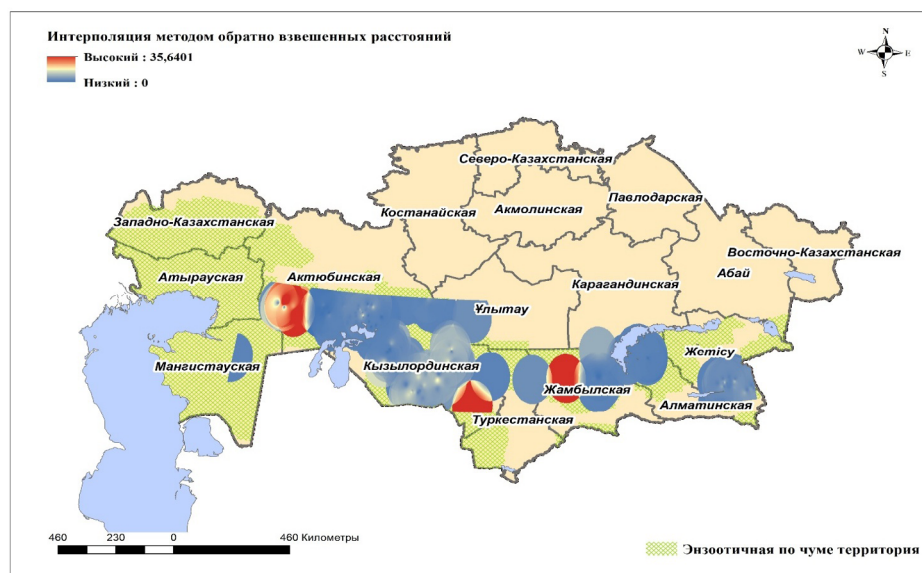


Рисунок 8. Результаты прогноза эпизоотий методом обратно взвешенных расстояний (ОВР), система координат Mercator.

на основании следующих соображений: простота реализации, наглядность результатов, устойчивость при малом объеме данных. Применение более сложных моделей, таких как кригинг, потребовало бы построения вариограмм, что не оправдано в условиях ограниченного набора точек.

Предполагается, что объекты, которые находятся поблизости, более подобны друг другу, чем объекты, удаленные друг от друга. Чтобы выполнить интерполяцию значения для неизмеренного положения, ОВР были использованы измеренные значения вокруг интерполируемого местоположения (точек регистрации эпизоотий). При интерполяции наибольший вес в прогнозе имеют точки, расположенные ближе к выбранной позиции, тогда как влияние удаленных объектов снижается по мере увеличения расстояния.

Максимальная точность метода достигается при плотном расположении опорных точек, что позволяет корректно отразить локальные особенности исследуемой территории. В нашем случае распределение точек было неравномерным, поэтому полученная поверхность лишь частично отражает реальное пространственное распределение параметра, однако, наглядно видно совпадение эллипса направленного распределения эпизоотий чумы (рис. 8) с результатами прогноза методом интерполяции.

Карта составлена на основе анализа очаговой активности с использованием метода ОВР (степень = 2, радиус — 5 ближайших точек). Значения нормированы в диапазоне от 0 до 1, где 1 соответствует наибольшей вероятности. Цветовая шкала отражает градации риска от низкого (синий) к высокому (красный).

Как видно, эпизоотическая активность прогнозируется в Северо-Приаральском, Бетпакдалинском, Мойынкумском, Кызылкумском автономных очагах чумы, с возможным переходом в соседние очаги, как Волго-Уральский песчаный, Предустюртский и Устюртский и Арыкумско-Дариялыктакырский.

Таким образом, анализ пространственно-временного распределения эпизоотий чумы в природных очагах Казахстана с использованием ГИС и статистических мето-

дов позволил выявить основные закономерности эпизоотического процесса за период 2020–2024 гг. и составил прогностическую модель степени вероятности возникновения эпизоотии чумы на конкретной территории. Применение методов пространственной статистики, включая оценку автокорреляции и направленного распределения, позволило определить ключевые очаги и направления распространения инфекции.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного исследования позволяют глубже понять механизмы функционирования природных очагов чумы в Республике Казахстан и их взаимосвязь с географическими, экологическими и биологическими факторами. Полученные данные подтверждают фундаментальные эпизоотологические концепции, согласно которым очаги чумы обладают очаговой, дискретной структурой, формируемой под влиянием абиотических условий, биотических особенностей среды и миграционной активности резервуаров и переносчиков инфекции [46].

Установленная пространственная неоднородность циркуляции *Yersinia pestis* подтверждает локализованный характер очагов и положительную пространственную автокорреляцию, зафиксированную при расчёте индекса Морана. Это свидетельствует о слабой связанности между очагами и высоким уровне локальной изоляции инфекции [47, 48]. Такая структура обусловлена особенностями экологии грызунов, устойчиво обитающих в определённых ландшафтных нишах, и переноса инфекции в пределах их ареалов. Существенную роль играют микроэкологические факторы — состав почв, тип растительности, наличие водоёмов, — создающие оптимальные условия для поддержания жизненного цикла как резервуаров, так и переносчиков [46].

Выделение ЛЭР позволило уточнить географические зоны с повышенной эпизоотической активностью. Анализ направленности распространения очагов, выполненный с применением ГИС-инструментов, показал совпадение пространственных векторов с миграционными маршру-

тами грызунов. Подобные закономерности описаны и в других регионах Центральной Азии [49]. Естественные преграды — горные хребты, водоёмы и пустынные барьеры — формируют стабильные границы очагов, ограничивая распространение возбудителя [47, 49].

Климатические условия региона играют существенную роль в модуляции эпизоотического процесса. Сезонные колебания температуры, влажности и количества осадков напрямую влияют на активность резервуаров и переносчиков инфекции [50, 51]. Повышение температуры и уровня влажности способствует расширению ареалов грызунов и блох, удлинению периода активности и повышению риска эпизоотий [48, 51].

Дальнейшее наблюдение и сопоставление результатов прогностического моделирования методом обратно взвешенных расстояний (ОВР) с фактическими вспышками чумы в будущем позволит оценить адекватность и эффективность выбранного подхода к прогнозированию эпизоотических процессов. Несмотря на ограничения, связанные с неравномерностью исходных данных, модель адекватно отразила текущие пространственные тренды распространения *Y. pestis* [52]. Повышение точности прогнозов возможно за счёт расширения наблюдательной сети, интеграции данных дистанционного зондирования и применения автоматизированных методов слежения за популяциями грызунов [53].

На основании полученных результатов, а также в соответствии с международными рекомендациями по надзору за особо опасными инфекциями [54], целесообразно внедрение дифференцированных программ мониторинга, ориентированных на характеристики ЛЭР, сезонные факторы и ландшафтную специфику.

Таким образом, исследование вносит вклад в углублённое понимание структуры и функционирования природных очагов чумы в Казахстане и может служить основой для совершенствования системы эпидемиологического надзора в условиях изменения климата и усиления антропогенной нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ пространственно-временного распределения эпизоотий чумы в природных очагах Казахстана с использованием ГИС и статистических методов позволил выявить основные закономерности эпизоотического процесса за период 2020–2024 гг. Применение методов пространственной статистики, включая оценку автокорреляции и направленного распределения, позволило определить ключевые очаги и направления распространения инфекции.

По результатам моделирования установлено, что в перспективе наиболее вероятно усиление эпизоотической активности в западных участках пустынной зоны Казахстана, в том числе в Северо-Приаральском, Волго-Уральском песчаном, Предустюртском и Устюртском очагах. Потенциальное усиление риска также ожидается в Бетпакдалинском, Мойынкумском, Кызылкумском и Арыкумско-Дариялыктакырском автономных очагах. В условиях прогнозируемых климатических изменений вероятность расширения зон циркуляции возбудителя

чумы может возрасти. Выявленные пространственные кластеры и тенденции служат основанием для усиления эпизоотического мониторинга и своевременного реагирования, особенно в районах с повышенным риском. Дальнейшее развитие исследований должно быть направлено на расширение базы данных, внедрение современных методов дистанционного мониторинга и моделирования, а также на усиление межведомственного сотрудничества для оперативного реагирования всплеск среди людей и верблюдов находящиеся на территории природных очагов чумы Республики Казахстан.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования проводились в рамках научно-исследовательской работы по теме «Совершенствование мер обеспечения биологической безопасности в Казахстане: противодействие опасным и особо опасным инфекциям», ИРН проекта – BR218004/0223, источник финансирования — Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА

1. World Health Organization (WHO). Plague: Disease Fact Sheet. – Geneva: WHO, 2023. – URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/plague> (дата обращения: 23.05.2025).
2. Злобин В.И. Чума: эпидемиология, профилактика и надзор. – Новосибирск: СибФНЦ, 2019. – 412 с.
3. Чумная палочка. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Чумная_палочка (дата обращения: 01.10.2024).
4. Plague Manual: Epidemiology, Distribution, Surveillance and Control. – WHO/CDS/CSR/EDC/99.2. – P. 11. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CDS-CSR-EDC-99.2> (дата обращения: 01.10.2024).
5. Попов Н.В., Карнаухов И.Г. и др. Оценка современной эпидемиологической обстановки в природных очагах чумы мира // Проблемы особо опасных инфекций. – 2019. – №1. – С. 81–88. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2019-1-81-88>
6. He Z., Wei B. et al. Distribution and characteristics of human plague cases and *Yersinia pestis* isolates from 4 marmota plague foci, China, 1950–2019 // Emerg. Infect. Dis. – 2021. – Т. 27, №10. – С. 2544–2553. <https://doi.org/10.3201/eid2710.202239>
7. Прогноз эпизоотической активности природных очагов чумы Российской Федерации на первое полугодие 2025 года. – Российский научно-исследовательский противочумный институт «Микроб». – URL: <https://www.microbe.ru/news/20250130/> (дата обращения: 05.02.2025).
8. Liu B.X., Duan R. et al. Analysis on prevalence and epidemic risk of animal plague in different ecological plague foci in Inner Mongolia Autonomous Region // Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi. – 2022. – Т. 56, №1. – С. 9–14. <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112150-20211101-01007>
9. Qin J., Wu Y. et al. Genomic diversity of *Yersinia pestis* from Yunnan Province, China, implies a potential common ancestor as the source of two plague epidemics //

Commun. Biol. – 2023. – Т. 6, №1. – С. 847. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05186-2>

10. Otgonbayar D., Baigalmaa M. et al. Epidemiological and clinical features of plague cases registered in Khovd province, Mongolia (1993–2022) // Current Issues on Zoonotic Diseases. – Ulaanbaatar, 2023. – Вып. 25. – С. 74–75.

11. Negi S., Tripathy S. et al. Plague outbreak in Madagascar amidst COVID-19: A re-emerging concern of public health // Clinical Infection in Practice. – 2023. – Т. 17, №8. – С. 100222. <https://doi.org/10.1016/j.clinpr.2023.100222>

12. Rakotosamimanana S., Taglioni F. et al. Socioenvironmental determinants as indicators of plague risk in the central highlands of Madagascar: Experience of Ambositra and Tsiroanomandidy districts // PLoS Negl. Trop. Dis. – 2023. – Т. 17, №9. – С. e0011538. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0011538>

13. Abdeliyev B.Z., Dalibayev Z.S. et al. Zoning of the Territory of the Republic of Kazakhstan by the Degree of Intensity of the Epizootic Situation on Plague in Camels // Problems of Particularly Dangerous Infections. – 2022. – №2. – С. 64–69. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-2-64-69>

14. Атшабар Б.Б., Бурделов Л.А., Избанова У.А. и др. Паспорт регионов Казахстана по особо опасным инфекциям // Карантинные и зоонозные инфекции в Казахстане. – 2015. – Т. 1, №31. – С. 5–177.

15. Abdel Z.Zh., Erubaev T.K., Tokmurzieva G.Zh. et al. Demarcation of the Boundaries of the Central Asian Desert Natural Focus of Plague of Kazakhstan and Monitoring the Areal of the Main Carrier, *Rhombomys opimus* // Problemy Osobo Opasnykh Infektsii. – 2021. – №2. – С. 71–78. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2021-2-71-78>

16. Айкимбаев А.М. и др. Эпидемический потенциал природных очагов чумы Казахстана. – Алматы: ОО «ДО-ИВА Медеуского р-на г. Алматы», 2006. – 153 с.

17. Ривкус Ю.З., Блюммер А.Г. Эндемия чумы в пустынях Средней Азии и Казахстана. – Воронеж, Россия, 2016. – С. 358.

18. Попова А.Ю., Кутырев В.В. Обеспечение эпидемиологического благополучия в природных очагах чумы на территории стран СНГ и Монголии в современных условиях. – Ижевск: ООО «Принт», 2018. – 336 с.

19. World Health Organization (WHO). Plague. – URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/plague> (дата обращения: 10.02.2022).

20. Юмашев М.М. Географические аспекты эпидемий природных очагов чумы // Вестник географии. – 2008. – №4. – С. 62–69.

21. Абдрахманов С.К. Эпизоотологический мониторинг и оценка риска распространения бешенства среди диких животных с использованием ГИС // Kaz-Vet. – 2014. – №3. – С. 23–27.

22. Скабылов А.А., Нышанов Н.С., Кулемин М.В. Моделирование и оценка биологических рисков на эндемичных территориях Туркестанской области и Шымкентской городской агломерации // Вестник КазНУ. Серия биол. – 2024. – №1(81). – С. 87–94.

23. Скабылов А.А. Использование регрессионного анализа и ГИС-технологий при оценке эпизоотической активности природных очагов чумы в Казахстане // РУС-МЕД. – 2023. – №2(14). – С. 45–53.

24. Акимов А.П., Левин С.З. Природно-очаговые инфекции: эпизоотология и мониторинг. – Алматы: Наука, 2011. – 298 с.

25. Коренберг Э.И. Природно-очаговые инфекции в экосистемах Евразии. – М.: Наука, 2004. – 344 с.

26. Юмашев М.М. Географические аспекты эпидемий природных очагов чумы // Вестник географии. – 2008. – №4. – С. 62–69.

27. Баймухамбетов М.Ж., Аждарбеков Е.А. Особенности распространения чумы в пустынных регионах Казахстана и методы их картографирования // Вестник НАН РК. – 2021. – №2. – С. 101–108.

28. ESRI CIS. Геоинформационные системы в эпидемиологии: опыт применения ГИС в мониторинге очагов чумы // ArcReview. – 2010. – №4. – URL: <https://arcreview.esri-cis.ru/2010/10/08/gis-plague-infection-prophylactic/> (дата обращения: 23.05.2025).

29. Rametov N.M., Steiner M., Bizhanova N. A., Abdel Z. Zh., Yessimseit D. T., Abdeliyev B. Z., Mussagaliyeva R. S. (2023). Mapping plague risk using Super Species Distribution Models and forecasts for rodents in the Zhambyl region, Kazakhstan. *GeoHealth*, 7, e2023GH000853. <https://doi.org/10.1029/2023GH000853>

30. Айкимбаев А.М., Абдел З.Ж., Жумадилова З.Б., Токмурзиева Г.Ж., Мека-Меченко Т.В., Мусагалиева Р.С., Байтурсын Б., Умарова С. Систематизация показателей и стандартов эпидемиологического и эпизоотологического надзора по чуме для усовершенствования профилактических (противочумных) мероприятий в Республике Казахстан. Биобезопасность и Биотехнология. – 2024. – Т. 19. – С. 6-30. <https://doi.org/10.58318/2957-5702-2024-19-6-30>

31. Дубянский В.М., Бурделов Л.А. Компьютерная модель чумного эпизоотического процесса в поселениях большой песчанки (*Rhombomys opimus*): описание и проверка адекватности // Зоологический журнал. – 2010. – Т. 89, №1. – С. 79–87.

32. Дубянский В.М., Бурделов Л.А. Опыт наблюдения за состоянием колоний большой песчанки (*Rhombomys opimus*) с использованием дистанционного зондирования в очагах чумы Республики Казахстан // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы VIII всероссийской конференции. – Москва: ИКИ РАН, 2010. – С. 154–159.

33. Addink E.A., de Jong S.M., Davis S. et al. Using very high resolution remote sensing to monitor and to combat outbreaks of bubonic plague in Kazakhstan // Proceedings of the XIV Brazilian Remote Sensing Symposium. – Natal RN, Brazil, 2009. – P. 1–6.

34. Addink E.A., de Jong S.M., Davis S. et al. The use of high-resolution remote sensing for plague surveillance in Kazakhstan // Remote Sensing of Environment. – 2010. – Т. 114. – С. 674–681. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.014>

35. Дубянский В.М. Концепция использования ГИС-технологий и дистанционного зондирования в эпидемиологии

надзоре за чумой // Врач и информационные технологии. – 2012. – №2. – С. 42–46.

36. Дубянский В.М. Компьютерное моделирование эпизоотической ситуации с применением дистанционного зондирования земли в системе эпидемиологического надзора за чумой (на примере Среднеазиатского природного очага): автореф. дис. д.б.н. – Москва, 2015. – 33 с.

37. Бурделов Л.А. Использование данных дистанционного зондирования для анализа природных очагов чумы // География и природные ресурсы. – 2009. – №2. – С. 122–126.

38. Stenseth N.C., Samia N.I., Viljugrein H. et al. Plague dynamics are driven by climate variation // PNAS. – 2006. – Т. 103(35). – С. 13110–13115.

39. Gage K.L., Kosoy M.Y. Natural history of plague: perspectives from more than a century of research // Annual Review of Entomology. – 2005. – Т. 50. – С. 505–528.

40. Parmenter R.R., Yadav E.P., Parmenter C.A. et al. Incidence of plague associated with increased winter-spring precipitation in New Mexico // American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. – 1999. – Т. 61(5). – С. 814–821.

41. Biggins D.E., Kosoy M.Y. Influences of introduced plague on North American mammals: implications from ecology of plague in Asia // Journal of Mammalogy. – 2001. – Т. 82(4). – С. 906–916.

42. Организация и проведение эпидемиологического надзора в природных очагах чумы на территории государств – участников Содружества Независимых Государств. Методические рекомендации. – Саратов, 2019. – 113 с.

43. Practical Guide to Biological Safety in Laboratory Conditions. Third edition // World Health Organization. – Geneva, 2004. – 190 p. <https://www.who.int/csr/resources/publications/biosafety/WHO>

44. Атшабар Б.Б., Бурделов Л.А., Избанова У.А. и др. Паспорт регионов Казахстана по особо опасным инфекциям // Карантинные и зоонозные инфекции в Казахстане. – 2015. – Т. 1, №31. – С. 5–177.

45. Атлас природных очагов чумы России и зарубежных государств / под ред. А.Ю. Поповой, В.В. Кутырева. – Калининград: РА Полиграфычъ, 2022. – 348 с.

46. Perry R.D., Fetherston J.D. Yersinia pestis, etiologic agent of plague // Clinical Microbiology Reviews. – 1997. – Т. 10(1). – С. 35–66. <https://doi.org/10.1128/CMR.10.1.35>

47. Gage K.L., Kosoy M.Y. Natural history of plague: perspectives from more than a century of research // Annual Review of Entomology. – 2005. – Т. 50. – С. 505–528. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.50.071803.130337>

48. Stenseth N.C. et al. Plague: past, present, and future // PLoS Medicine. – 2006. – Т. 3(1). – e2. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0030002>

49. Anisimov A.P., Lindler L.E., Pier G.B. Infectious disease emergencies: Plague // Clinical Infectious Diseases. – 2004. – Т. 39(9). – С. 1359–1366. <https://doi.org/10.1086/425159>

50. Eisen R.J., Gage K.L. Transmission of flea-borne zoonotic agents // Annual Review of Entomology. –

2012. – Т. 57. – С. 61–82. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120710-100554>

51. Thomson M.C. et al. Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles // Nature. – 2006. – Т. 439(7076). – С. 576–579. <https://doi.org/10.1038/nature04503>

52. Википедия. Интерполяция. – 2024. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Интерполяция>

53. MaxEnt software for species habitat modeling. – URL: https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

54. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ). Доклад по эпидемиологическому надзору за чумой. – 2020. – URL: <https://www.who.int>

REFERENCES

1. World Health Organization (WHO). Plague: Disease Fact Sheet. – Geneva: WHO, 2023. – Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/plague> (accessed: May 23, 2025).

2. Zlobin V.I. Plague: Epidemiology, Prevention and Surveillance. – Novosibirsk: Siberian Federal Scientific Center, 2019. – 412 p.

3. The plague wand. The material is from Wikipedia, the free encyclopedia. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/The plague wand](https://ru.wikipedia.org/wiki/The_plague_wand) (date of request: 01.10.2024).

4. Plague Manual: Epidemiology, Distribution, Surveillance and Control. – WHO/CDS/CSR/EDC/99.2. – P. 11. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CDS-CSR-EDC-99.2> (accessed: October 1, 2024).

5. Popov N.V., Karnaukhov I.G. et al. Assessment of the Current Epidemiological Situation in the Natural Foci of Plague Worldwide // Problems of Particularly Dangerous Infections. – 2019. – No. 1. – P. 81–88. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2019-1-81-88>

6. He Z., Wei B. et al. Distribution and Characteristics of Human Plague Cases and Yersinia pestis Isolates from 4 Marmot Plague Foci, China, 1950–2019 // Emerging Infectious Diseases. – 2021. – Vol. 27, No. 10. – P. 2544–2553. <https://doi.org/10.3201/eid2710.202239>

7. Forecast of Epizootic Activity of Natural Plague Foci in the Russian Federation for the First Half of 2025. – Russian Scientific and Research Anti-Plague Institute “Microbe.” Available at: <https://www.microbe.ru/news/20250130/> (accessed: February 5, 2025).

8. Liu B.X., Duan R. et al. Analysis on Prevalence and Epidemic Risk of Animal Plague in Different Ecological Plague Foci in Inner Mongolia Autonomous Region // Chinese Journal of Preventive Medicine. – 2022. – Vol. 56, No. 1. – P. 9–14. <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112150-20211101-01007>

9. Qin J., Wu Y. et al. Genomic Diversity of Yersinia pestis from Yunnan Province, China, Implies a Potential Common Ancestor as the Source of Two Plague Epidemics // Communications Biology. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 847. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05186-2>

10. Otgonbayar D., Baigalmaa M. et al. Epidemiological

and Clinical Features of Plague Cases Registered in Khovd Province, Mongolia (1993–2022) // *Current Issues on Zoonotic Diseases*. – Ulaanbaatar, 2023. – Issue 25. – P. 74–75.

11. Negi S., Tripathy S. et al. Plague Outbreak in Madagascar Amidst COVID-19: A Re-emerging Public Health Concern // *Clinical Infection in Practice*. – 2023. – Vol. 17, No. 8. – P. 100222. <https://doi.org/10.1016/j.clinpr.2023.100222>

12. Rakotosamimanana S., Taglioni F. et al. Socioenvironmental Determinants as Indicators of Plague Risk in the Central Highlands of Madagascar: Experience of Ambositra and Tsiroanomandidy Districts // *PLoS Neglected Tropical Diseases*. – 2023. – Vol. 17, No. 9. – e0011538. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0011538>

13. Abdeliyev B.Z., Dalibayev Z.S. et al. Zoning of the Territory of the Republic of Kazakhstan by the Degree of Epizootic Intensity of Plague in Camels // *Problems of Particularly Dangerous Infections*. – 2022. – No. 2. – P. 64–69. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-2-64-69>

14. Atshabar B.B., Burdelov L.A., Izbanova U.A. et al. Passport of Regions of Kazakhstan for Particularly Dangerous Infections // *Quarantine and Zoonotic Infections in Kazakhstan*. – 2015. – Vol. 1, No. 31. – P. 5–177.

15. Abdel Z.Zh., Erubaev T.K., Tokmurzieva G.Zh. et al. Demarcation of the Boundaries of the Central Asian Desert Natural Focus of Plague of Kazakhstan and Monitoring the Area of the Main Carrier, *Rhombomys opimus* // *Problems of Particularly Dangerous Infections*. – 2021. – No. 2. – P. 71–78. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2021-2-71-78>

16. Aikimbaev A.M. et al. Epidemic Potential of Natural Plague Foci of Kazakhstan. – Almaty: OOP «DOIYA Medeusky District of Almaty», 2006. – 153 p.

17. Rivkus Yu.Z., Blummer A.G. Endemicity of Plague in the Deserts of Central Asia and Kazakhstan. – Voronezh, Russia, 2016. – P. 358.

18. Popova A.Y., Kutyrev V.V. Ensuring Epidemiological Well-Being in Natural Plague Foci of CIS Countries and Mongolia Under Modern Conditions / Ed. Prof. A.Y. Popova, Acad. RAS, Prof. V.V. Kutyrev. – Izhevsk: Print, 2018. – 336 p.

19. World Health Organization (WHO). Plague. [Electronic Resource]. – Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/plague> (accessed: February 10, 2022).

20. Yumashev M.M. Geographical Aspects of Epidemics of Natural Plague Foci // *Bulletin of Geography*. – 2008. – No. 4. – P. 62–69.

21. Abdrakhmanov S.K. Epizootic Monitoring and Risk Assessment of Rabies Spread Among Wild Animals Using GIS // *Kaz-Vet*. – 2014. – No. 3. – P. 23–27.

22. Skabylov A.A., Nyshanov N.S., Kulemin M.V. Modeling and Assessment of Biological Risks in Endemic Areas of Turkestan Region and Shymkent Urban Agglomeration // *Bulletin of KazNU. Series Biology*. – 2024. – No. 1(81). – P. 87–94.

23. Skabylov A.A. Use of Regression Analysis and GIS Technologies to Assess Epizootic Activity of Natural Plague

Foci in Kazakhstan // *RUSMED*. – 2023. – No. 2(14). – P. 45–53.

24. Akimov A.P., Levin S.Z. Natural Focal Infections: Epizootiology and Monitoring. – Almaty: Nauka, 2011. – 298 p.

25. Korenberg E.I. Natural Focal Infections in the Ecosystems of Eurasia. – Moscow: Nauka, 2004. – 344 p.

26. Yumashev M.M. Geographical Aspects of Epidemics of Natural Plague Foci // *Bulletin of Geography*. – 2008. – No. 4. – P. 62–69.

27. Baimukhambetov M.Zh., Azhdarbekov E.A. Features of Plague Spread in the Desert Regions of Kazakhstan and Methods of Their Mapping // *Bulletin of the NAS RK*. – 2021. – No. 2. – P. 101–108.

28. ESRI CIS. GIS in Epidemiology: Experience in GIS Application for Monitoring Plague Foci // *ArcReview*. – 2010. – No. 4. – Available at: <https://arcreview.esri-cis.ru/2010/10/08/gis-plague-infection-prophylactic/> (accessed: May 23, 2025).

29. Rametov N.M., Steiner M., Bizhanova N. A., Abdel Z. Zh., Yessimseit D. T., Abdeliyev B. Z., Mussagaliyeva R. S. (2023). Mapping plague risk using Super Species Distribution Models and forecasts for rodents in the Zhambyl region, Kazakhstan. *GeoHealth*, 7, e2023GH000853. <https://doi.org/10.1029/2023GH000853>

30. Aikymbayev A.M., Abdel Z.Zh., Zhumadilova Z.B., Tokmurziyeva G.Zh., Meka-Mechenko T.V., Mussagaliyeva R.S., Baitursyn B., Umarova S.K. Systematization of indicators and standards of epidemiological and epizootological surveillance of plague to improve preventive (anti-plague) measures in the Republic of Kazakhstan. *Biosafety and Biotechnology*. 2024;(19):6-30. <https://doi.org/10.58318/2957-5702-2024-19-6-30>

31. Dubyansky V.M., Burdelov L.A. Computer Model of the Plague Epizootic Process in Great Gerbil Settlements (*Rhombomys opimus*): Description and Adequacy Verification // *Zoological Journal*. – 2010. – Vol. 89, No. 1. – P. 79–87.

32. Dubyansky V.M., Burdelov L.A. Observation of Great Gerbil (*Rhombomys opimus*) Colonies Using Remote Sensing in Plague Foci of the Republic of Kazakhstan // *Proceedings of the VIII All-Russian Conference «Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space»*. – Moscow: IKI RAS, 2010. – P. 154–159.

33. Addink E.A., de Jong S.M., Davis S. et al. Using Very High Resolution Remote Sensing to Monitor and Combat Outbreaks of Bubonic Plague in Kazakhstan // *Proceedings of the XIV Brazilian Remote Sensing Symposium*. – Natal RN, Brazil, 2009. – P. 1–6.

34. Addink E.A., de Jong S.M., Davis S. et al. The Use of High-Resolution Remote Sensing for Plague Surveillance in Kazakhstan // *Remote Sensing of Environment*. – 2010. – Vol. 114. – P. 674–681. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.014>

35. Dubyansky V.M. Concept of GIS and Remote Sensing in Plague Surveillance // *Doctor and Information Technologies*. – 2012. – No. 2. – P. 42–46.

36. Dubyansky V.M. Computer Modeling of Epizootic Situation with the Use of Remote Sensing in the

Epidemiological Surveillance of Plague (Based on the Central Asian Natural Focus): Abstract of Doctoral Dissertation. – Moscow, 2015. – 33 p.

37. Burdelov L.A. Use of Remote Sensing for the Analysis of Natural Plague Foci // Geography and Natural Resources. – 2009. – No. 2. – P. 122–126.

38. Stenseth N.C., Samia N.I., Viljugrein H. et al. Plague Dynamics Are Driven by Climate Variation // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2006. – Vol. 103, No. 35. – P. 13110–13115.

39. Gage K.L., Kosoy M.Y. Natural History of Plague: Perspectives from More than a Century of Research // Annual Review of Entomology. – 2005. – Vol. 50. – P. 505–528.

40. Parmenter R.R., Yadav E.P., Parmenter C.A. et al. Incidence of Plague Associated with Increased Winter–Spring Precipitation in New Mexico // American Journal of Tropical Medicine and Hygiene. – 1999. – Vol. 61, No. 5. – P. 814–821.

41. Biggins D.E., Kosoy M.Y. Influences of Introduced Plague on North American Mammals: Implications from the Ecology of Plague in Asia // Journal of Mammalogy. – 2001. – Vol. 82, No. 4. – P. 906–916.

42. Organization and Implementation of Epidemiological Surveillance in Natural Plague Foci in the CIS Countries. Methodological Recommendations. – Saratov, 2019. – 113 p.

43. Practical Guide to Biological Safety in Laboratory Conditions. Third edition. – Geneva: World Health Organization, 2004. – 190 p. <https://www.who.int/csr/resources/publications/biosafety/WHO>

44. Atshabar B.B., Burdelov L.A., Izbanova U.A. et al. Passport of Regions of Kazakhstan for Particularly Dangerous Infections // Quarantine and Zoonotic Infections in Kazakhstan. – 2015. – Vol. 1, No. 31. – P. 5–177.

45. Atlas of Natural Plague Foci of Russia and Foreign Countries / Ed. A.Y. Popova, Acad. RAS, Prof. V.V. Kutyrev. – Kaliningrad: RA Poligrafych, 2022. – 348 p.

46. Perry R.D., Fetherston J.D. Yersinia pestis, Etiologic Agent of Plague // Clinical Microbiology Reviews. – 1997. – Vol. 10, No. 1. – P. 35–66. <https://doi.org/10.1128/CMR.10.1.35>

47. Gage K.L., Kosoy M.Y. Natural History of Plague: Perspectives from More Than a Century of Research // Annual Review of Entomology. – 2005. – Vol. 50. – P. 505–528. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.50.071803.130337>

48. Stenseth N.C. et al. Plague: Past, Present, and Future // PLoS Medicine. – 2006. – Vol. 3, No. 1. – e2. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.0030002>

49. Anisimov A.P., Lindler L.E., Pier G.B. Infectious Disease Emergencies: Plague // Clinical Infectious Diseases. – 2004. – Vol. 39, No. 9. – P. 1359–1366. <https://doi.org/10.1086/425159>

50. Eisen R.J., Gage K.L. Transmission of Flea-Borne Zoonotic Agents // Annual Review of Entomology. – 2012. – Vol. 57. – P. 61–82. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120710-100554>

51. Thomson M.C. et al. Malaria Early Warnings Based on Seasonal Climate Forecasts from Multi-Model Ensembles // Nature. – 2006. – Vol. 439, No. 7076. – P. 576–579. <https://doi.org/10.1038/nature04503>

52. Wikipedia. Interpolation. – 2024. – Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Интерполяция>

53. MaxEnt Software for Species Habitat Modeling. – Available at: https://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/

54. World Health Organization (WHO). Plague Surveillance Report. – 2020. – Available at: <https://www.who.int>

ӨОК: 619:616.9-036.22; 619:616.9

ГАЗ-ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ НЕГІЗІНДЕ 2020-2024 ЖЖ. КЕЗЕҢІНДЕ ҚАЗАҚСТАННЫҢ ШӨЛДІ ОБА ОШАҚТАРЫНДАҒЫ ЖАБАЙЫ ЖАНУАРЛАР АРАСЫНДАҒЫ ОБАНЫҢ ЭПИЗООТИЯЛЫҚ ҮРДІСІНІҢ КЕҢІСТІКТІК ДИНАМИКАСЫН БОЛЖАУ

Абдел З.Ж.¹, Жумадилова З.Б.¹, Айкимбаев А.М.¹, Токмурзиева Г.Ж.¹, Муссағалиева Р.С.¹, Абдирасилова А.А.¹, Исаева С.Б.¹, Байтурсын Б.А.¹, Далибаев Ж.С.¹, Абделиев Б.З.¹, Бегимбаева Э.Ж.¹, Шаяхметов А.М.¹, Садовская В.П.¹, Шаки Н.Н.¹, Отебай Д.М.¹, Сагидулин Т.З.¹, Курманов Ж.Б.², Нурмагамбетова Л.Б.³, Даурбаев А.Ш.⁴, Асимкулов Е.А.⁵, Сайрамбекова Г.М.^{1*}

¹М. Айқымбаев атындағы аса қауіпті инфекциялар ұлттық ғылыми орталығы, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

²Ақтөбе обаға қарсы күрес станциясы, Ақтөбе қ., Қазақстан Республикасы

³Атырау обаға қарсы күрес станциясы, Атырау қ., Қазақстан Республикасы

⁴Жамбыл обаға қарсы күрес станциясы, Тараз қ., Қазақстан Республикасы

⁵Талдықорған обаға қарсы күрес станциясы, Талдықорған қ., Қазақстан Республикасы

*Хат-хабар үшін жауапты автор: g.sairambekova@nscedi.kz

ТҮЙІН

Осы зерттеу геоақпараттық модельдеу әдістерін пайдалана отырып, Қазақстан Республикасының шөлді табиғи оба ошақтарындағы жабайы жануарлар арасында оба инфекциясының эпизоотиялық үрдісін кеңістіктік-уақыттық талдауға және болжауға бағытталған. Бастапқы база ретінде негізгі резервуарлық түрлердің (*Rhombomys opimus*) саны және таралуы, таратушылардың (сыртмасылдардың) белсенділігі, сондай-ақ зерттелетін аумақтардың климаттық, ландшафттық және антропогендік сипаттамалары туралы мәліметтерді қамтитын 2020–2024 жж. эпизоотологиялық мониторингтің деректері пайдаланылды.

Кеңістіктік деректерді өңдеу және визуализациялау ArcGIS және QGIS бағдарламалық платформаларын қолдану арқылы жүзеге асырылды. Эпизоотиялық белсенділіктің ахуалдық, талдаулық және болжамдық электрондық карталары әзірленді.

Модельдеу нәтижелері бойынша келешекте Қазақстанның шөлді аймағының батыс телімдерінде, оның ішінде Солтүстік Арал маңды, Еділ-Жайық құмды, Үстірт алды және Үстірт ошақтарында эпизоотиялық белсенділіктің күшеюі ықтимал екені анықталды. Бетпақдала, Мойынқұм және Дариялық-Тақыр дербес ошақтарында да тәуекелдің ықтимал күшеюі күтілуде. Болжамды климаттық өзгерістер жағдайында оба қоздырғышының айналымдық аймақтарының кенеюі ықтималдығы артуы мүмкін, бұл энзоотиялық аумақтарда адамдардың және түйелердің ауру жұқтыру қаупін арттырады.

Зерттеу нәтижелері қолданбалы маңыздылығы жоғары және эпизоотологиялық қадағалау жүйелерін оңтайландыру, алдын алу және індетке қарсы шараларды жоспарлау және жануарлардан адамға оба инфекциясының таралу қаупін азайту үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйінді сөздер: оба, эпизоотия, табиғи ошақ, ГАЗ-технология, болжамдау

UDC: 619:616.9-036.22; 619:616.9

FORECASTING THE SPATIAL DYNAMICS OF THE EPIZOOTIC PROCESS PLAGUE AMONG THE WILD ANIMALS IN THE DESERT PLAGUE FOCI OF KAZAKHSTAN FOR THE PERIOD 2020-2024. BASED ON GIS TECHNOLOGIES

Abdel Z.Zh.¹, Zhumadilova Z.B.¹, Aikimbayev A.M.¹, Tokmurziyeva G.Zh.¹, Mussagaliyeva R.S.¹, Abdirassilova A.A.¹, Issayeva S.B.¹, Baitursyn B.A.¹, Dalibayev Zh.S.¹, Abdeliyev B.Z.¹, Begimbayeva E.Zh.¹, Shayakhmetov A.M.¹, Sadovskaya V.P.¹, Shaki N.N.¹, Otebay D.M.¹, Sagidulin T.Z.¹, Kurmanov Zh.B.², Nurmagambetova L.B.³, Daurbayev A.Sh.⁴, Asymkulov E.A.⁵, Sairambekova G.M.^{1*}

¹M. Aikimbayev National Scientific Center for Especially Dangerous Infections, Almaty, Republic of Kazakhstan

²Aktobe Anti-Plague Station, Aktobe, Republic of Kazakhstan

³Atyrau Anti-Plague Station, Atyrau, Republic of Kazakhstan

⁴Zhambyl Anti-Plague Station, Taraz, Republic of Kazakhstan

⁵Taldykorgan Anti-Plague Station, Taldykorgan, Republic of Kazakhstan

*Corresponding author: g.sairambekova@nscedi.kz

ABSTRACT

The present study is aimed at spatial and temporal analysis and prediction of the epizootic process of plague infection among wild animals in desert natural plague foci of the Republic of Kazakhstan using geoinformation modeling methods. The data of epizootological monitoring for 2020–2024 were used as the initial base, including information on the abundance and

distribution of the main reservoir species (*Rhombomys opimus*), vector activity (ectoparasites), as well as climatic, landscape and anthropogenic characteristics of the studied territories.

Spatial data was processed and visualized using the ArcGIS and QGIS software platforms. Situational, analytical, and predictive electronic maps of epizootic activity have been constructed.

By the modeling results, it was found that in the future, epizootic activity is most likely to increase in the western parts of the desert zone of Kazakhstan, including in the North Aral, Volga-Ural sandy, Predustyurt and Ustyurt foci. A potential increase in risk is also expected in the Betpakdalinsky, Moyinkumsky and Dariyalyk-Takyr autonomous foci. Under the conditions of predicted climatic changes, the probability of expanding the circulation zones of the plague pathogen may increase, which increases the risk of infection of humans and camels in enzootic territories.

The research results have high applied significance and can be used to optimize epizootological surveillance systems, plan preventive and anti-epidemic measures, and minimize the risk of transmission of plague infection from animals to humans.

Key words: plague, epizootic, natural focus, GIS technology, forecasting