

МЕДИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИРОДНООЧАГОВЫХ БОЛЕЗНЕЙ В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ СИБИРСКОЙ ЯЗВЫ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ)

MEDICO-GEOGRAPHICAL MODELLING OF SPATIOTEMPORAL CHANGES IN THE SPREAD OF NATURAL FOCAL DISEASES UNDER A CHANGING CLIMATE (THROUGH THE EXAMPLE OF ANTHRAX IN THE ARCTIC REGION)

Малхазова С.М.¹, Коренной Ф.И.², Орлов Д.С.¹, Суркова Г.В.¹

Malkhazova S.M.¹, Korennoy F.I.², Orlov D.S.¹, Surkova G.V.¹

e-mail: sveta_geo@mail.ru

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;

²Федеральный центр охраны здоровья животных, Владимир, Россия

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Federal Centre for Animal Health, Vladimir, Russia

Аннотация. Исследование посвящено моделированию потенциальных ареалов сибирской язвы в современном и будущем климате с использованием техники моделирования экологических ниш (Maxent). В анализе использованы известные местоположения сибиреязвенных скотомогильников как индикаторы климатической и ландшафтной пригодности физико-географических условий для существования патогена *Bacillus anthracis*. В качестве объясняющих переменных использован ряд ландшафтных, климатических и социально-экономических факторов. Полученная модель показала очень хорошую предсказательную способность ($AUC = 0,969$). Наиболее значимыми факторами, определяющими возможность выживания сибиреязвенного патогена и возникновение повторных вспышек заболевания являются pH почвы (от нейтрального до щелочного); вид почвы (в основном, почвенные единицы, относящиеся к почвам тайги, хвойно-широколиственных лесов и отличающиеся относительно высоким содержанием гумуса); средняя годовая температура воздуха (от -10°C ; чем выше температура, тем больше пригодность для выживания сибиреязвенного патогена); максимальная средняя суточная температура воздуха от $+24^{\circ}\text{C}$. При ожидаемом на период до 2100 г. изменении климата потенциальный ареал сибирской язвы может существенно расшириться, распространившись на большую часть модельной территории.

Abstract. The study aims at modelling the areas of the potential presence of anthrax under modern and future climates using the method of ecological niche modelling (Maxent). The known locations of anthrax burial sites were used as indicators of climatic and landscape suitability for the existence of the pathogen *Bacillus anthracis*. A number of landscape, climatic and socio-economic factors were used as explanatory variables. The resulting model showed predictive power close to excellent ($AUC = 0.969$). The most significant factors that determine the possibility of survival of anthrax pathogen and the occurrence of repeated outbreaks of the disease were as follows: the soil pH (from neutral to alkaline); the type of soil (mainly taiga and mixed coniferous-broad leaved forest soil units, with relatively high content of humus); the annual mean air temperature (higher than -10°C ; the higher the temperature, the greater the suitability for the survival of the pathogen); and the maximum mean daily air temperature higher than $+24^{\circ}\text{C}$. The potential area can expand significantly due to the expected climate change by the year 2100, and it is possible for anthrax to further spread across the modelling territory.

Ключевые слова: медицинское ландшафтоведение, сибирская язва, моделирование ареала, изменение климата, метод экологических ниш (Maxent).

Keywords: medical landscape ecology, anthrax, areal modelling, climate change, ecological niche modelling (Maxent).

Введение. Медицинское ландшафтоведение как основополагающий раздел медицинской географии имеет своей задачей изучение влияния на здоровье человека природных компонентов ландшафтов – геологических пород, рельефа местности и высоты н.у.м., характера климата, вод, почв, особенностей растительного покрова и животного мира, а также изменений, влияющих на жизнь природы и приводящих к смене природно-территориальных комплексов. На основании этих изысканий медицинское ландшафтоведение разрабатывает пути оздоровления ландшафтов [1].

Исследования по медицинскому ландшафтоведению касаются, в первую очередь, природноочаговых болезней, возбудители которых обитают в природных экосистемах независимо от человека [3]. Учение о природной очаговости болезней, сформулированное Е.Н. Павловским, позволило вплотную подойти к вопросу о ландшафтной приуроченности этих болезней, и по-новому осветило проблему борьбы с ними и их профилактики.

Возбудители, носители и переносчики таких болезней, являясь неотъемлемыми компонентами ландшафтов, подвергаются воздействию факторов окружающей среды наравне с другими представителями биоты, и вовлечены в сложные взаимосвязи внутри природно-территориальных комплексов. Одним из наиболее значимых природных факторов, воздействующих на биоту, является климатический. Он ограничивает распространение многих природноочаговых болезней, в связи с чем изменения климата могут вызывать изменения их ареалов. Одним из наиболее интенсивно обсуждаемых вопросов распространения инфекционных и паразитарных болезней является влияние потепления климата. Что касается современных инфекций и инвазий, то достаточно давно установилось представление о том, что климатические изменения могут приводить к сдвигам границ распространения возбудителей, носителей и переносчиков природноочаговых болезней [3].

В настоящее время широкую популярность приобрела концепция «Одно здоровье» (One Health) – система теоретических и практических мероприятий, направленных на выявление и снижение рисков для здоровья животных, человека и окружающей среды в рамках их взаимодействия [2].

В настоящее время основную угрозу здоровью животных, как и людей, связывают с глобальным потеплением климата. Потепление способствует тому, что целый ряд животных и растений теперь мигрирует к северу, принося туда и свойственные им заболевания, и, хотя зафиксированные до сих пор вспышки заболеваний имели достаточно ограниченное распространение, эта проблема рассматривается как весьма серьезная и угрожающая.

Исследование проведено на примере особо опасного зоонозного заболевания – сибирской язвы (СЯ) в Арктической зоне РФ. Для РФ СЯ до сих пор представляет серьезную проблему. Наличие очагов СЯ характерно и для Арктического региона. Самая крупная вспышка в последнее десятилетие зафиксирована в ЯНАО на полуострове Ямал в 200 км от поселка Яр-Сале летом 2016 г. В результате контакта с больными животными произошли 36 случаев заболевания людей СЯ. По данным Центрального НИИ эпидемиологии Роспотребнадзора, вспышка СЯ возникла из-за потепления, которое способствовало оттаиванию вечной мерзлоты и активизации бактерии СЯ в замерзших могильниках [4].

В связи с этим актуально построение потенциального ареала СЯ, определение территории, где условия среды благоприятны для функционирования очагов инфекции, а также прогноз возможных изменений распространения заболевания в условиях меняющегося климата.

Материал и методика. Моделирование потенциальных ареалов СЯ в современном и будущем климате проведено с использованием техники моделирования экологических ниш (Maxent). Метод используется для выявления ареалов заболеваний, распространение которых зависит от условий окружающей среды. Метод максимальной энтропии был разработан Phillips et al. [6] с целью выявления территорий, наиболее пригодных для существования различных видов живых организмов. Он основан на сопоставлении данных об известных местах присутствия изучаемого объекта и условиях среды. В основе метода лежит принцип итеративного подбора распределения физико-географических факторов, наиболее полно соответствующего имеющемуся пространственному распределению данных об известных местоположениях изучаемого объекта [2].

При моделировании с использованием данного подхода используется два допущения:

Индикаторами пригодности соответствующих ландшафтно-климатических условий для существования возбудителя *Bacillus anthracis* являются местоположения зарегистрированных в прошлом вспышек СЯ и захоронений погибших от СЯ животных как индикаторов климатической и ландшафтной пригодности физико-географических условий для существования патогена.

В местах со сходной комбинацией физико-географических условий имеется потенциальная опасность возникновения вспышек СЯ в результате реактивации законсервированных и неучтенных почвенных очагов или заноса бактерии СЯ извне.

Для моделирования были использованы данные об имеющихся захоронениях животных, павших от СЯ на территории модельного региона. База данных насчитывает 357 захоронений, территориально привязанных к 154 пунктам.

В качестве физико-географических переменных был использован набор ландшафтных (вид и pH почвы, высота н.у.м., тип земельного покрова, доля зеленой биомассы) и климатических факторов. Климатические факторы представлены 19 биоклиматическими переменными из международной базы данных WorldClim [5], которые являются производными от среднемесячных значений температур воздуха и уровня осадков, систематизированными на основе информации метеостанций в глобальном масштабе за период 1970–2000 гг. Используются также данные о категории земельного покрова. Выбор физико-географических переменных обусловлен эпидемиологией патогена, а также результатами работ других авторов.

Климатические переменные использовались как для текущего климата, так и для прогностического климата на период до 2100 г. по сценарию РТК8.5. Таким образом, выполнялось моделирование ареала СЯ как для текущих климатических условий, так и для прогностического климата.

Для исключения мультиколлинеарности все переменные были протестированы с помощью скрипта USDM в статистически ориентированном языке программирования R.

Результаты и их обсуждение. Полученные результаты демонстрируют, что в современных климатических условиях ареал СЯ в границах модельного региона в целом ограничен местами регистрации случаев СЯ в прошлом. К регионам с повышенной вероятностью возникновения вспышек относятся: южные районы Архангельской области и Республики Карелия, а также север Мурманской области; южные районы Красноярского края; территории Республики Саха (Якутия) вдоль р. Лена и в районе Колымской низменности.

Рассматривая переменные, наиболее сильно связанные с имеющимся распределением исторических случаев СЯ на модельной территории, можно сделать вывод, что наибольший вклад вносят такие величины как pH почвы, средняя годовая температура воздуха, вид почвы, тип растительного покрова, средняя годовая сумма осадков, выпадающая при отрицательных температурах и максимальная средняя суточная температура воздуха.

В условиях прогнозируемого изменения климата по наиболее жесткому сценарию к 2100 г. потенциальный ареал СЯ значительно расширится, демонстрируя существенное повышение вероятности возникновения заболевания почти на всей модельной территории. Можно особенно отметить значительное повышение пригодности (от нулевой до практически максимальной) на полуострове Ямал, на прибрежных территориях Ямало-Ненецкого АО, Республики Саха (Якутия) и Чукотского АО. Повышение пригодности в наибольшей степени обусловлено повышением среднего значения годовой температуры воздуха и максимальной средней суточной температуры воздуха.

Изменения температуры и осадков могут повлиять на пригодность мест обитания носителей и переносчиков, показатели их воспроизводства, распределение и численность. Климатические изменения могут провоцировать сдвиги границ ареалов хозяев и переносчиков, формирование новых сочетаний потенциальных хозяев инфекций. Локальные климатические флуктуации могут менять внутреннюю структуру ареалов инфекций, их носителей и переносчиков.

Полученные в результате моделирования карты потенциальных ареалов СЯ в современном и будущем климате отражают благоприятность условий среды для циркуляции сибиреязвенного патогена. Повышенная благоприятность отмечается в южных районах модельной территории.

Полученные результаты согласуются с литературными данными об особенностях экологии патогена и позволяют прогнозировать изменение эпидемической ситуации и границ ареалов инфекций в связи с меняющимися природными условиями.

Заключение. Методика моделирования экологических ниш Maxent позволила построить потенциальный ареал СЯ в современном климате; показать возможные пространственно-временные изменения в распространении болезни к концу XXI в. и выделить факторы, в наибольшей степени влияющие на существование природных очагов СЯ. К таким факторам относятся вид и рН почвы, средняя годовая температура воздуха, тип растительного покрова, средняя годовая сумма осадков, выпадающая при отрицательных температурах и максимальная средняя суточная температура воздуха.

Показано, что ожидаемое изменение климата влечет значительное повышение риска возникновения новых очагов СЯ вследствие вытеснения почвенных очагов и повышения благоприятности климатических показателей практически по всей территории арктического региона.

Разработанный подход может быть использован для медико-географического моделирования пространственно-временных изменений распространения различных природноочаговых болезней в условиях меняющегося климата.

Благодарности. Методическая часть работы выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 21-47-00016 «Новые и возвращающиеся природнообусловленные инфекционные заболевания в Китае и России: пространственно-временной анализ и оценка трансграничных рисков».

Тематическая часть исследования проведена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

Литература

1. Воронов А.Г. Медицинская география. Вып.1. Общие вопросы. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 161 с.
2. Коренной Ф.И. Математико-картографическое моделирование распространения особо опасных заболеваний сельскохозяйственных животных / Ф.И. Коренной // Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук. – 2019. – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова.
3. Медико-географический атлас России «Природноочаговые болезни» / под ред. С.М. Малхазовой. 2-е изд. – М.: Географический факультет МГУ, 2017. – 216 с.
4. Попова А.Ю., Демина Ю.В., Ежлова, Е.Б., Куличенко А.Н., Рязанова А.Г. и др. Вспышка сибирской язвы в Ямало-Ненецком автономном округе в 2016 году. Эпидемиологические особенности // Проблемы особо опасных инфекций. – 2016. – Т. 4. – С. 42-46.
5. Fick S.E. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas / S.E. Fick, R.J. Hijmans // Intern. J. Climatol. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
6. Phillips S.J. Maximum entropy modeling of species geographic distributions / S.J. Phillips, R.P. Anderson, R. E. Schapire // Ecological Modelling. – 2006. – Vol.190. – P. 231-259.