Использование географической информационной системы в эпидемиологическом надзоре на примере арбовирусных инфекций

Жуков К.В.,
Удовиченко С.К.,
Никитин Д.Н.,
Викторов Д.В.,
Топорков А.В.

Федеральное казенное учреждение здравоохранения «Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 400131, г. Волгоград, Российская Федерация

В статье показано использование географической информационной системы (ГИС) для проведения пространственного эпидемиологического анализа и дифференциации природно-очаговых территорий по риску заражения арбовирусными инфекциями в целях повышения эффективности комплекса профилактических мероприятий. Рассмотрено применение ГИС для разработки научно обоснованных прогнозов осложнений эпидемической обстановки по актуальным для международного сообщества арбовирусным инфекциям. Представлены результаты внедрения современных информационных технологий в систему эпидемиологического надзора за арбовирусными инфекционными болезнями на территории РФ с целью совершенствования информационно-аналитической и прогностно-моделирующей поддержки профилактических (противоэпидемических) мероприятий и принятия управленческих решений.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Авторы заявляют о равном вкладе в написание статьи.

Для цитирования: Жуков К.В., Удовиченко С.К., Никитин Д.Н., Викторов Д.В., Топорков А.В. Использование географической информационной системы в эпидемиологическом надзоре на примере арбовирусных инфекций // Инфекционные болезни: новости, мнения, обучение. 2021. Т. 10, № 2. С. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.33029/2305-3496-2021-10-2-16-24>

Статья поступила в редакцию 17.12.2020. **Принята в печать** 31.03.2021.

Ключевые слова: арбовирусные инфекции, лихорадка Западного Нила, географические информационные системы, эпидемиологический надзор, профилактические мероприятия

Application of Geographic Information Systems in epidemiological surveillance for West Nile Fever and other arbovirus infections at the modern stage

Zhukov K.V., Udovichenko S.K., Nikitin D.N.,
Viktorov D.V., Toporkov A.V.

Volgograd Research Anti-Plague Institute, 400131,
Volgograd, Russian Federation

The article focuses on the use of Geographic Information Systems (GIS) for spatial epidemiological analysis and differentiation of natural focal territories according to the risk of infection with arbovirus infections in order to increase the effectiveness of the complex of preventive measures. The prospects of the use of GIS for the development of scientifically based forecasts of complications of the epidemiological situation on arbovirus infections relevant to the international community are substantiated. The results of introducing modern information technologies into the system of epidemiological surveillance of arbovirus infectious diseases in the territory of the Russian Federation are presented with the aim of improving the information-analytical and prognostic-modeling support of preventive (anti-epidemic) measures and making managerial decisions.

Keywords: arbovirus infections, West Nile Fever, Geographic Information Systems, epidemiological surveillance, preventive measures

Funding. The study has no sponsor support.

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Contribution. The authors declare equal contributions to the writing of the article.

For citation: Zhukov K.V., Udovichenko S.K., Nikitin D.N., Viktorov D.V., Toporkov A.V. Application of Geographic Information Systems in epidemiological surveillance for West Nile Fever and other arbovirus infections at the modern stage. *Infektsionnye bolezni: novosti, mneniya, obucheniye* [Infectious Diseases: News, Opinions, Training]. 2021; 10 (2): 16–24. DOI: <https://doi.org/10.33029/2305-3496-2021-10-2-16-24> (in Russian)

Received 17.12.2020. **Accepted** 31.03.2021.

Актуальность проблемы арбовирусных инфекционных болезней на современном этапе определяется высоким темпом их территориальной экспансии, неуклонным ухудшением эпидемической обстановки, ростом завозных случаев, возникновением новых природных и антропоургических очагов, отсутствием эффективных средств лечения и специфической профилактики [1–3].

Наиболее быстро распространяющейся тропической болезнью признана лихорадка денге, глобальная заболеваемость которой, согласно официальным данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), за последние десятилетия выросла более чем в 30 раз и составляет около 3 млн случаев ежегодно. Риску заражения вирусом денге подвергаются 3,9 млрд человек в 128 странах мира. Самый высокий уровень заболеваемости регистрируется в Американском регионе, Юго-Восточной Азии и Западной части Тихого океана [4]. Реальную эпидемическую опасность лихорадка денге представляет и для стран Европы, что связано с возвращением в регион после длительного периода отсутствия комара *Aedes aegypti* L. и завозом инвазивного вида *Ae. albopictus* Sk. под влиянием растущей глобализации торговли и путешествий [5].

Другая малоизвестная до последнего времени арбовирусная инфекционная болезнь – лихорадка Зика стремительно приобретает масштабы трансконтинентального распространения. В 2007 г. вирус Зика впервые покинул свой привычный ареал в Африке и Юго-Восточной Азии, вызвав крупную вспышку на острове Яп (Микронезия), расположенном в западной части Тихого океана [3, 6]. Внезапное появление лихорадки Зика в странах Центральной и Южной Америки, прогрессирующее пространственное развитие эпидемического процесса и высокая интенсивность его проявления, серьезное воздействие вируса на здоровье населения пораженных территорий (синдром Гийена–Барре, микроцефалия у новорожденных и др.) послужили аргументами для объявления ВОЗ лихорадки Зика в феврале 2016 г. угрозой здоровью населения международного уровня [7, 8]. В настоящее время ситуация, связанная с международным распространением лихорадки Зика, определена ВОЗ как значительная и долгосрочная проблема общественного здравоохранения, требующая принятия мер реагирования на глобальном уровне.

Неожиданно возросший эпидемический потенциал демонстрирует лихорадка чикунгунья, географический ареал которой в течение длительного периода времени ограничивался Африканским континентом и Юго-Восточной Азией [9]. Вспышки и спорадические случаи лихорадки чикунгунья в Италии (2007, 2017) и Франции (2010, 2014, 2017) продемонстрировали уязвимость Европы перед рас-

пространением арбовирусных лихорадок и подтвердили возможность их местной передачи. В конце 2013 г. отмечена интродукция вируса в американский регион [10], где к настоящему времени диагностировано более 3 млн предполагаемых случаев заболевания, вызванных эндемичной передачей в 51 стране.

Отдельно необходимо остановиться на лихорадке Западного Нила (ЛЗН), природные очаги которой охватывают территории Северной, Центральной и Южной Америки, Африки, Ближнего Востока, Южной Азии и Европы. Примерно с середины 1990-х гг. эксперты отмечают значительное изменение эпидемической ситуации по ЛЗН, характеризующейся стремительным распространением возбудителя в мире. О темпе экспансии ЛЗН можно судить исходя из примера США, где болезнь после своего первого появления в 1999 г. в Нью-Йорке за 3 года охватила всю территорию страны [11]. США продолжают занимать лидирующие позиции по количеству случаев заболевания ЛЗН в мире (в среднем 2000 случаев в год).

Основные эпидемиологические риски в отношении арбовирусных лихорадок для Российской Федерации обусловлены возможностью завоза болезни людьми, посетившими неблагополучные территории, а также заносом инфицированных переносчиков транспортными средствами международного сообщения. Особую актуальность для Российской Федерации представляет ЛЗН как одна из ведущих угроз санитарно-эпидемиологическому благополучию населения. С момента официальной регистрации заболевания в 28 субъектах страны отмечено свыше 2,9 тыс. случаев ЛЗН и более 80 летальных исходов, а маркеры вируса Западного Нила (ВЗН) выявлены в 62 субъектах [12, 13].

В связи с вышеизложенной актуальной задачей здравоохранения как на уровне отдельных стран, так и мирового сообщества в целом является совершенствование стратегии и тактики эпидемиологического надзора за арбовирусными инфекциями и разработка целенаправленных (риск-ориентированных) санитарно-профилактических (противоэпидемических) мероприятий. Исключительно важное значение при этом имеет внедрение новых информационных технологий, к которым относятся географические информационные системы (ГИС). В настоящее время использование ГИС для мониторинга возбудителей природно-очаговых, зоонозных, актуальных антропонозных инфекционных болезней становится обычной практикой [14, 15]. В отношении обозначенных выше арбовирусных лихорадок применение ГИС широко распространено преимущественно в регионах, для которых данные инфекции являются актуальными, а эпидемиологический надзор проводится на достаточно высоком, системном уровне. Тяжелые эпиде-

мические осложнения, вызванные лихорадками Западного Нила, Зика, денге и чикунгунья в различных регионах мира инициируют и стимулируют разработку и внедрение новых или уже существующих подходов и методов анализа, доступных на базе геоинформационных платформ. Это позволяет выполнить широкий спектр задач – провести полноценный пространственный эпидемиологический анализ, эпидемиологическое районирование территорий, разработать научно обоснованные прогнозы развития эпидемической ситуации, способствующие принятию эффективных управленческих решений, направленных на поддержание эпидемиологического благополучия населения [16].

Цель работы – оценка современных аспектов и подходов к применению ГИС в эпидемиологическом надзоре за арбовирусными инфекциями.

Следует отметить, что по данной теме представлено очень большое количество работ, поэтому в обзоре в качестве примеров приведены только выборочные, репрезентативные публикации. Анализ научных публикаций, электронных и информационных ресурсов позволил выделить 3 ключевых подхода применения ГИС в эпидемиологическом надзоре.

Визуализация эпидемиологических данных и ранжирование территорий

В основе данного подхода лежит создание электронных баз данных (БД), содержащих пространственные, ретроспективные и оперативные эпидемиологические (эпизоотологические) данные. На их основе формируются информационные слои, которые визуализируются путем внедрения в ГИС для нанесения на векторные карты. Финальным этапом является ранжирование территорий с использованием инструментов геоинформационных приложений по различным показателям (уровень заболеваемости, смертности, иммунной прослойки, выявление маркеров возбудителей в объектах внешней среды и т.д.).

В качестве примера использования данного подхода можно привести ранжирование административных образований Колумбии по уровню заболеваемости лихорадками чикунгунья и Зика. В работах A.J. Rodríguez-Morales и соавт. показано, что 92% случаев заболевания лихорадкой чикунгунья сконцентрировано в зоне «кофейного треугольника» – сельской местности с плантациями кофе, привлекающей большое количество туристов. Дифференциация территории наиболее неблагоприятного по лихорадке Зика департамента Толима выявила преимущественное распределение случаев заболеваний в восточной области (>500 случаев на 100 тыс. населения). Применение ГИС позволило перераспределить материально-технические средства и кадровые ресурсы для предупреждения и контроля реализации угроз, связанных с арбовирусными инфекциями, и разработать рекомендации для посещающих страну туристов [17, 18].

Алгоритмы эпидемиологического районирования могут быть реализованы на базе онлайн-ресурсов на основе ГИС, имеющих встроенный узкоспециализированный функционал. Широко и успешно такой подход внедрен в национальную систему эпидемиологического надзора за арбовирусными инфекционными болезнями в США. На сайте

Центров по контролю и профилактике заболеваний (Centers for Disease Prevention and Control, CDC) представлена разработанная на базе платформы ArcGIS интерактивная карта ArboNET, позволяющая визуализировать текущую и ретроспективную эпидемическую ситуацию по ЛЗН, лихорадкам Зика, денге, чикунгунья, энцефалиту Сент-Луис и другим эндемичным арбовирусным инфекциям, данные о выявлении маркеров возбудителей у основных носителей и переносчиков, положительных результатах обследования доноров крови на маркеры ВЗН [19].

Наиболее полной по функциональным возможностям геоинформационной платформой, используемой для мониторинга за возбудителем ЛЗН, является платформа Министрства здравоохранения Канады (ISPHM-WNV), размещенная на онлайн-ресурсе с авторизованным доступом.

Основной компонент ISPHM-WNV – программное обеспечение JMap, представляющее собой интерактивную карту, содержащую набор встроенных инструментов, при помощи которых пользователи могут решать широкий спектр задач: районирование территории, создание и редактирование карт, а также использование инструментов ГИС для картографической навигации и определения точной локализации мест заражения. Геоинформационная платформа ISPHM-WNV нашла широкое практическое применение при проведении на территории Канады энтомологического и орнитологического мониторинга, а также комплексного анализа заболеваемости ЛЗН и прогнозирования эпидемической ситуации [20, 21].

Эффективно внедряются ГИС в системы эпидемиологического надзора за арбовирусными лихорадками на региональном уровне. Например, в Американском регионе ВОЗ, где проблема арбовирусных инфекций является актуальной для всех входящих в него стран, с целью мониторинга заболеваемости создана онлайн-платформа PAHO/PLISA (Pan American Health Organization/Plataforma de Informacion en Salud de las Americas). Интерактивная многофункциональная карта отображает результаты дифференциации стран по уровню заболеваемости лихорадками денге, Зика, чикунгунья (включая вероятные и подтвержденные случаи, тяжелые формы болезни) и смертности за многолетний период наблюдения. Возможности онлайн-платформы позволяют не только визуально оценить динамику заболеваемости, но и при помощи встроенных инструментов вывода эпидемиологических данных получать отчеты в виде таблиц, графиков и т.д. [22]. Однако использование ГИС в эпидемиологическом мониторинге ЛЗН на региональном уровне в настоящее время не нашло практического применения, так как мониторинг осуществляется только отдельными странами, а на системной основе – США и Канадой.

На территории стран Европы из арбовирусных лихорадок наибольший вклад в инфекционную патологию человека вносит ЛЗН. В регионе внедрены и нормативно закреплены единые принципы эпидемиологического надзора за возбудителем ЛЗН, проводится активный мониторинг основных носителей и переносчиков вируса не только отдельными странами, но и трансграничных территорий в тесном сотрудничестве специалистов сразу нескольких соседствующих государств. Это позволило оптимизировать и унифицировать

инструменты визуализации и анализа эпидемиологических данных с применением ГИС. Данные, поступающие в единую систему отчетности об инфекционных заболеваниях, еженедельно визуализируются на интерактивной карте, представленной на сайте Европейского центра профилактики и контроля заболеваний (European Center for Disease Prevention and Control, ECDC). Также на карте отображаются территории с зарегистрированными случаями в предшествующий эпидемический сезон и за многолетний период наблюдения и регистрируемые эпизоотии среди лошадей, свидетельствующие об интенсивности течения эпизоотического процесса [23].

В целом проведение эпидемиологического районирования территорий с использованием ГИС имеет гибкий подход, в частности возможность масштабирования анализируемых территорий (от континентов и отдельных государств до конкретных административно-территориальных единиц и улиц). Сочетание различных вариантов проведения анализа по одному или нескольким эпидемиологическим параметрам либо нозологиям позволяет оптимизировать и повысить эффективность противоэпидемических (профилактических) мероприятий, сконцентрировав их на территориях высокого риска заражения людей.

Пространственный анализ и оценка влияния биотических и абиотических факторов на заболеваемость

Современная эпидемическая ситуация по арбовирусным лихорадкам подчеркивает важность установления факторов, способствовавших расширению ареала их распространения и высокой интенсивности течения эпидемического процесса. Наличие широкого функционала и инструментов анализа данных, реализованных на базе ГИС, позволяет проводить оценку влияния различных факторов на заболеваемость населения и визуализировать полученные результаты.

Пространственная структура эпидемических очагов ЛЗН в округе Кайахога, штат Огайо (США), изучена A.D. LaBeaud и соавт. Показано, что высокий уровень заболеваемости регистрировался на территориях с высоким уровнем урбанизации и наличием ветхого жилья, тогда как территории с низким риском были приурочены к сельскохозяйственным районам, водно-болотным угодьям и лесам. Полученные результаты подтверждены выявлением в течение ряда последующих лет высокой численности и инфицированности переносчиков – комаров *Culex spp.* на территориях высокого риска заражения ВЗН [24].

Оценку влияния различных факторов на распределение случаев заболевания ЛЗН среди людей и положительных серологических находок среди диких птиц в Греции провели G. Valiakos и соавт. [25]. Используя инструменты ГИС, исследователи пришли к выводу, что наиболее значимыми природно-климатическими факторами являются близость населенного пункта к водоему и его расположение на умеренных высотах по отношению к уровню моря (коэффициент вероятности – 1,0, 95% доверительный интервал 0,723–1,386). Полученные результаты экстраполировали на всю территорию Греции, где

имела место общность структурной и пространственной функциональной организации паразитарной системы природных и природно-антропоургических очагов ЛЗН. Это позволило выявить ряд территорий, характеризующихся высокой степенью потенциальной эпидемической опасности, – северную часть Греции (Македония, Западная Фракия), Западную Грецию, Фессалию и ряд островов (Родос, Хиос и др.) [25].

В другом исследовании описано применение ГИС и дистанционного зондирования земли для анализа влияния абиотических факторов на заболеваемость ЛЗН в штате Миннесота (США). Показано, что наиболее значимыми факторами, способствующими возникновению заболеваемости, являются температура воздуха (ее повышение на длительные периоды времени), умеренные осадки в сельской местности, способствующие сохранению водно-болотных угодий, прудов, наполнению искусственных водоемов, обилие водно-болотных угодий. Засуха, тип почвы, обильные осадки и возвышенность территорий оказывают меньшее влияние [26].

Таким образом, на заболеваемость и распространенность арбовирусных инфекций, в том числе ЛЗН, оказывает влияние большое количество факторов, оценка их роли и механизмов влияния по-прежнему остается одной из актуальных задач в области эпидемиологии, в решении которой применяются геоинформационные технологии. Кроме того, как свидетельствуют представленные данные, один и тот же фактор на одной территории может потенцировать рост заболеваемости, а на другой – не иметь существенного значения.

Использование географических информационных систем при разработке прогностических моделей

В основе создания прогностической модели лежит применение математического аппарата для описания основных закономерностей влияния анализируемого фактора (климат, ландшафт, демография, численность переносчика и др.) на возникновение заболеваемости или территориальное распределение случаев. После оценки достоверности модели на ретроспективных данных ее можно использовать в геоинформационном приложении с целью визуализации результатов прогнозирования хода эпидемического процесса.

Пространственную модель «градусо-день» для выявления территорий штата Вайоминг (США), где существует вероятность активной передачи ВЗН, разработали L. Zou и соавт. Электронная БД содержала данные климатических станций о среднесуточных температурах воздуха в сезон активности комаров (июнь–сентябрь). Пользователями программы задавались такие параметры, как температурный порог начала репликации вируса в переносчике, внешний инкубационный период (период, необходимый для накопления вируса в переносчике) и продолжительность кормления комара. Программа идентифицировала дни и территории, когда сумма накопленных среднесуточных температур в период активности переносчиков была достаточной для эффективной передачи вируса. Для оценки достоверности модели на основе ГИС созданы информационные слои с ретроспективными данными о случаях заболевания ЛЗН, обнаружения маркеров возбудителя у носителей и пере-

носчиков в штате Вайоминг, которые были совмещены с полученными результатами. Прогностическая ценность пространственной модели по результатам проверки в «теплые» годы варьировала от 78,3 до 91,3%, что свидетельствовало о возможности использования модели для прогнозирования эпидемиологических осложнений в краткосрочной перспективе. Однако в год с относительно холодными летними месяцами прогностическая ценность модели составляла только 65,2%, что указывало на необходимость изучения влияния других абиотических факторов на эффективность передачи комарами ВЗН [27].

В публикации А.М. Samy и соавт. [28] описана модель экологической ниши для прогнозирования дальнейшего распространения лихорадки Зика в глобальном масштабе и определения наиболее значимых предикторов осложнения эпидемической ситуации. Авторы разработали 4 варианта модели на основе данных о зарегистрированных случаях заболевания лихорадкой Зика в Центральной и Южной Америке и набора разных факторов, оказывающих прямое или косвенное влияние на течение эпидемического процесса. Первая модель включала такие параметры, как особенности климата (температура, влажность) и ландшафта (высота местности над уровнем моря, засушливость почвы). Во вторую модель включены факторы, используемые в первой модели, а также демографические показатели (численность населения). В третью модель вместо демографических показателей авторы статьи включили распространенность основных переносчиков – комаров *Ae. aegypti* L. и *Ae. albopictus* Sk. Четвертая модель включала все вышеперечисленные факторы.

При оценке достоверности моделей с помощью программы ENM Gadgets (Ecological niche modeling gadgets) с использованием параметра 5% допустимой ошибки авторы определили, что последняя модель имеет наибольшую прогностическую ценность. По результатам исследования разработана картограмма, отражающая территории с потенциальным риском передачи вируса Зика. Авторы спрогнозировали возможное осложнение эпидемической обстановки по лихорадке Зика в странах Африки к югу от Сахары, Австралии, Меланезии (группы островов в Тихом океане) и Новой Зеландии [28].

В статье J. Ong и соавт. [29] описывается применение разработанной Лео Брейманом модели «случайного леса» (с англ. Random Forest) для прогнозирования заболеваемости лихорадкой денге на территории Сингапура и разработки карты риска с использованием ГИС. В основе данной модели лежит алгоритм, заключающийся в создании деревьев из подвыборки некоторой изучаемой выборки данных. Для каждого дерева подбираются параметры (или признаки), позволяющие получить разветвление. Далее по некоторому заданному критерию выбирается наилучшее разделение деревьев и параметр для дальнейшего составления прогноза по рискам (в данном исследовании – прогноз риска заболеваемости лихорадкой денге).

Авторы использовали данные о случаях заболевания, численности переносчиков, плотности населения, а также нормализованного индекса растительности за 2006–2016 гг. На основе построения специальных графиков, показываю-

щих влияние факторов риска на заболеваемость лихорадкой денге, установлено, что наиболее значимыми являлись плотность населения и численность переносчиков.

Для разработки карты риска использованы специальные процентильные показатели, характеризующие группы риска: низкие (1-я группа – от 0 до 25-го процентиля, 2-я группа – от 25 до 50-го процентиля) и высокие (3-я группа – от 50 до 75-го процентиля, 4-я группа – от 75 до 100-го процентиля). Распределив данные по случаям заболевания лихорадкой денге, а также численности переносчиков по данным процентилям исследователи выявили, что наибольшая заболеваемость приходится на 3-ю и 4-ю группу соответственно. На основе полученных результатов с использованием ГИС были нанесены градиенты и сетки, позволившие прогнозировать наиболее высокую заболеваемость на территории восточной части Сингапура.

Авторы отметили, что использование модели «случайного леса» для прогнозирования риска заболеваемости лихорадкой денге, а также разработанной на основе данной модели карты риска является мощным инструментом, позволяющим планировать комплекс профилактических мер и предупредить возникновение эпидемических проявлений болезни [29].

Разработка аналитических и прогностических моделей на базе ГИС при надзоре за арбовирусными инфекциями является ресурсоемким процессом, требующим высокой компетенции специалистов в области эпидемиологии, математики и информационных технологий. Большое количество различных факторов и предикторов, оказывающих как прямое, так и косвенное влияние друг на друга, усложняет не только сам процесс создания модели, но и применение ее на практике. Рассмотренные прогностические модели обладали определенной степенью статистической достоверности и, безусловно, позволяли разработать краткосрочные прогнозы развития эпидемической ситуации, а значит, своевременно спланировать и провести комплекс противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Однако на текущий момент данных о существовании прогнозно-аналитической системы, созданной на базе подходящего для любой территории набора факторов, при этом обладающей высокой степенью статистической достоверностью прогноза, особенно в средне- или долгосрочной перспективе, не представлено.

Применение геоинформационных технологий в эпидемиологическом надзоре за арбовирусными инфекционными болезнями на территории РФ

Учитывая актуальность проблемы арбовирусных лихорадок для Российской Федерации, на федеральном уровне проводится комплексная межведомственная работа по недопущению завоза и распространения арбовирусных инфекций, а также по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия по ЛЗН, базирующаяся на своевременном и адекватном информационном обеспечении, включая внедрение ГИС.

Интерактивная карта «Эпидемиологические проявления лихорадки Западного Нила на территории Российской Федерации»

Обобщение результатов мониторинга за возбудителем ЛЗН, совершенствование подходов к организации системы эпидемиологического надзора и прогнозирования эпидемиологической обстановки являются прерогативой Референс-центра по мониторингу возбудителя ЛЗН, функционирующего на базе ФКУЗ «Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт» Роспотребнадзора. В рамках деятельности референс-центра с использованием ГИС разработан электронный атлас «Лихорадка Западного Нила на территории Российской Федерации», размещенный на сайте Роспотребнадзора. Для создания атласа использована БД, включающая данные по заболеваемости ЛЗН среди населения, выявлению маркеров ВЗН в объектах окружающей среды (птицы, мелкие и крупные млекопитающие, комары, клещи) и серологических находок среди доноров и других выборочных групп здорового населения на территории РФ с 1997 по 2019 г. При помощи инструментов ArcGIS 9.0 разработана 121 векторная карта, отражающая уровень заболеваемости ЛЗН и районирование территорий по наличию маркеров ВЗН и степени эпидемиологического риска отдельных субъектов и Российской Федерации в целом (см. рисунок). Дифференциация территорий по уровню потенциальной эпидемиологической опасности позволила оптимизировать алгоритм мониторинга и контроля переносчиков ВЗН, обеспечить противоэпидемиологическую готовность органов и учреждений здравоохранения санитарно-эпидемиологического и лечебно-профилактического профиля на территориях, характеризующихся высоким риском заражения ЛЗН, повысить эффективность межведомственного и внутриведомственного взаимодействия.

Примером использования ГИС в системе регионального эпидемиологического надзора является «Эпидемиологи-

ческий атлас Приволжского федерального округа», подготовленный сотрудниками ФБУН ННИИЭМ им. академика И.Н. Блохиной Роспотребнадзора. Атлас представляет собой набор векторных карт, разработанных на основе OpenStreetMaps, визуализирующих информацию по инфекционным (паразитарным) болезням, включая ЛЗН и лихорадку денге, в субъектах Приволжского федерального округа за 2010–2019 гг. Электронный эпидемиологический атлас предоставляет пользователю возможность оценить на карте-схеме динамику выбранного им заболевания как за год, так и помесечно, распределение случаев заболевания по территории (Приволжский федеральный округ в целом, отдельные субъекты, а в субъектах – вплоть до районов и городов) и возрастным группам. Пользователь также может распечатать карту-схему, посмотреть диаграммы и графики по отдельным нозологиям за выбранный период, ознакомиться с таблицами и создать отчет в формате электронной таблицы [30].

Несмотря на то что на территории России регистрируются исключительно завозные случаи заболевания лихорадками Зика, денге и чикунгунья, риск возникновения эпидемиологических осложнений сохраняется, что связано с обнаружением инвазивных видов комаров – переносчиков арбовирусных лихорадок на Черноморском побережье Кавказа и Крымском полуострове [31].

В рамках комплекса мероприятий, направленных на противодействие распространению арбовирусных лихорадок в Российской Федерации в связи с осложнением в 2015–2016 гг. эпидемиологической ситуации по лихорадке Зика в мире, специалистами ФКУЗ «Ставропольский научно-исследовательский противочумный институт» Роспотребнадзора разработано картографическое программное обеспечение ZikaMap, которое размещено на сайте института. Применен-

ние этого информационного ресурса позволяет в режиме реального времени визуализировать и осуществлять анализ данных мониторинга численности и распространения комаров *Ae. albopictus* Sk., контролировать выполнение и эффективность инсектицидных (ларвицидных) обработок. Программа ZikaMap успешно апробирована при обеспечении санитарно-эпидемиологического благополучия населения в период подготовки и проведения Чемпионата мира по футболу – 2018 в Сочи [32].

В целом реализация возможностей ГИС при эпидемиологическом надзоре за возбудителем ЛЗН в Российской Федерации преимущественно представлена в виде визуализации ретроспективных и оперативных эпидемиологических данных. Однако возрастающая актуальность арбовирусных лихорадок стимулирует развитие и внедрение в практику более специализированных подходов применения геоинформационных технологий.

Заключение

Таким образом, применение ГИС в системе мониторинга арбовирусных и других инфекций нашло широкое распространение, а большое число различных специализированных приложений и алгоритмов их применения для решения поставленных задач делает геоинформационные приложения гибким инструментом для усовершенствования системы эпидемиологического надзора.

Рассмотренные в данной статье подходы к применению ГИС позволяют визуализировать эпидемиологические данные, проводить ранжирование территорий по различным эпидемиологическим характеристикам, выполнять пространственный анализ территорий с набором заданных параметров, проводить оценку влияния различных факторов на распространение возбудителей, создавать модели для прогнозирования развития эпидемической ситуации по отдельным нозологиям.

Вместе с тем существует ряд проблем, связанных с применением ГИС при мониторинге ЛЗН. В частности, достоверность прогностических моделей, рассмотренных в данной статье, либо не оценивали, либо она изменялась в пределах 50–60%, достигая в редких случаях более высоких значений. Это обусловлено наличием большого количества уникальных абиотических (климатогеографических и др.) и биотических факторов, влияющих на распространение возбудителя и/или появление случаев заболеваний в конкретной местности, их сложными корреляционными взаимодействиями. Все это может осложняться существованием скрытых факторов, влияние которых на заболеваемость может быть не очевидным, но достаточно весомым. Создание универсальной прогностической модели, обладающей высокой достоверностью и применимостью в любой точке Земли, является сложной комплексной задачей современной эпидемиологии.

В связи с этим выявление основных факторов и предикторов роста заболеваемости природно-очаговыми инфекциями, а также механизмов и степени их влияния на эпидемический процесс требует дальнейшего детального изучения. Единые подходы и принципы эпидемиологического надзора за возбудителями арбовирусных инфекций, унификация, оптимизация и их комплексное внедрение в практику позволят своевременно выявлять возникновение эпидемических осложнений, что повысит эффективность проводимых противоэпидемических мероприятий.

Использование математического анализа при описании основных закономерностей распространения и роста заболеваемости ЛЗН и других арбовирусных инфекций в сочетании с функционалом ГИС дает возможность как создания прогностических моделей, так и визуализации полученных результатов и прогнозов. Применение подобных подходов в настоящее время относится к одним из самых трудоемких и ресурсозатратных, но в то же время перспективных направлений исследований в эпидемиологии.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФКУЗ «Волгоградский научно-исследовательский противочумный институт» Роспотребнадзора, Волгоград, Российская Федерация:

Жуков Кирилл Вадимович (Kirill V. Zhukov) * – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории эпидемиологического анализа и противоэпидемического обеспечения

E-mail: zhukofff@inbox.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8000-3257>

Удовиченко Светлана Константиновна (Svetlana K. Udovichenko) – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории эпидемиологического анализа и противоэпидемического обеспечения

E-mail: vari2@sprint-v.com.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8682-1536>

Никитин Дмитрий Николаевич (Dmitry N. Nikitin) – младший научный сотрудник лаборатории эпидемиологического анализа и противоэпидемического обеспечения

E-mail: vari2@sprint-v.com.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6940-0350>

* Автор для корреспонденции.

Викторов Дмитрий Викторович (Dmitry V. Viktorov) – доктор биологических наук, доцент, заместитель директора по научно-экспериментальной работе

E-mail: vari2@sprint-v.com.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2722-7948>

Топорков Андрей Владимирович (Andrey V. Toporkov) – доктор медицинских наук, доцент, директор института

E-mail: vari2@sprint-v.com.ru

<https://orcid.org/0000-0002-3449-4657>

ЛИТЕРАТУРА

1. Franklins L.H.V., Jones K.E., Redding D.W., Abubakar I. The effect of global change on mosquito-borne disease // *Lancet Infect. Dis.* 2019. Vol. 19, N 9. P. e302–e312. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(19\)30161-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(19)30161-6)
2. Weaver S.C., Charlier C., Vasilakis N., Lecuit M. Zika, Chikungunya, and other emerging vector-borne viral diseases // *Annu. Rev. Med.* 2018. Vol. 69. P. 395–408. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-med-050715-105122>
3. Musso D., Gubler D.J. Zika virus // *Clin. Microbiol. Rev.* 2016. Vol. 29. P. 487–524. DOI: <https://doi.org/10.1128/CMR.00072-15>
4. Денге и тяжелая денге [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue> (дата обращения: 14.06.2020)
5. Денге в Европейском регионе ВОЗ [Электронный ресурс]. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/246852/Fact-sheet-Dengue-Rus.pdf (дата обращения: 24.06.2020)
6. Покровский В.И., Платонов А.Е., Симонова Е.Г., Платонов О.В., Малеев В.В. Лихорадка Зика // *Эпидемиология и инфекционные болезни. Актуальные вопросы.* 2016. № 2. С. 35–42.
7. Заявление ВОЗ о первом совещании Комитета Международных медико-санитарных правил по чрезвычайной ситуации в связи с вирусом Зика [Электронный ресурс]. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/detail/01-02-2016-who-statement-on-the-first-meeting-of-the-international-health-regulations-\(2005\)-\(ihr-2005\)-emergency-committee-on-zika-virus-and-observed-increase-in-neurological-disorders-and-neonatal-malformations](https://www.who.int/ru/news-room/detail/01-02-2016-who-statement-on-the-first-meeting-of-the-international-health-regulations-(2005)-(ihr-2005)-emergency-committee-on-zika-virus-and-observed-increase-in-neurological-disorders-and-neonatal-malformations) (дата обращения: 04.06.2020)
8. Hennessey M., Fischer M., Staples J.E. Zika virus spreads to new areas – region of the Americas, May 2015–January 2016 // *MMWR Morb. Mortal. Wkly Rep.* 2016. Vol. 65. P. 55–58. DOI: <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6503e1>
9. Vu D.M., Jungkind D., LaBeaud A.D. Chikungunya virus // *Clin. Lab. Med.* 2017. Vol. 37, N 2. P. 371–382. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cll.2017.01.008>
10. Nunes M.R., Faria N.R., de Vasconcelos J.M., Golding N. et al. Emergence and potential for spread of Chikungunya virus in Brazil // *BMC Medicine.* 2015. Vol. 13. P. 102. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12916-015-0348-x>
11. Hadfield J., Brito A.F., Swetnam D.M., Vogels C.B.F. et al. Twenty years of West Nile virus spread and evolution in the Americas visualized by Nextstrain // *PLoS Pathog.* 2019. Vol. 15, N 10. Article ID e1008042. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1008042>
12. Путинцева Е.В., Алексейчик И.О., Чеснокова С.Н., Удовиченко С.К. и др. Результаты мониторинга возбудителя лихорадки Западного Нила в Российской Федерации в 2019 г. и прогноз развития эпидемической ситуации на 2020 г. // *Проблемы особо опасных инфекций.* 2020. № 1. С. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2020-1-51-60>
13. Топорков А.В. (ред.). Лихорадка Западного Нила. Волгоград : Волга-Пресс, 2017. 304 с.
14. Водяницкая С.Ю., Судына Л.В., Логвин Ф.В., Водопьянов А.С. и др. ГИС-технологии в совершенствовании эпидемиологического надзора за сибирской язвой в Ростовской области // *Эпидемиология и инфекционные болезни.* 2016. Т. 21, № 3. С. 152–156.
15. Кузнецов А.А., Поршаков А.М., Матросов А.Н., Лопатин А.А. Применение ГИС-технологий для определения границ и площадей эпизоотических участков в природных очагах чумы // *Проблемы особо опасных инфекций.* 2017. № 4. С. 41–44. DOI: <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2017-4-41-44>
16. Ананьев Ю.С. Геоинформационные системы : учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2003. 70 с.
17. Rodriguez-Morales A.J., Bedoya-Arias J.E., Ramírez-Jaramillo V., Montoya-Arias C.P. et al. Using geographic information system (GIS) to mapping and assess changes in transmission patterns of chikungunya fever in municipalities of the Coffee-Triangle region of Colombia during 2014–2015 outbreak: Implications for travel advice // *Travel. Med. Infect. Dis.* 2016. Vol. 14, N 1. P. 62–65. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2015.06.009>
18. Rodriguez-Morales A.J., Galindo-Marquez M.L., García-Loaiza C.J., Sabogal-Roman J.A. et al. Mapping Zika virus infection using geographical information systems in Tolima, Colombia, 2015–2016 // *F1000Res.* 2016. Vol. 5. P. 568. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.8436.1>
19. Centre for Disease Prevention and Control, CDC. ArboNET [Electronic resource]. URL: https://www.cdc.gov/arboNET/Maps/ADB_Diseases_Map/index.html (date of access August 30, 2020)
20. Jones R.C., Weaver K.N., Smith S., Blanco C. et al. Use of the vector index and geographic information system to prospectively inform West Nile virus interventions // *J. Am. Mosq. Control. Assoc.* 2011. Vol. 27, N 3. P. 315–319. DOI: <https://doi.org/10.2987/10-6098.1>
21. Ozdenler E., Taff G.N., Akkus C. Exploring the spatio-temporal dynamics of reservoir hosts, vectors, and human hosts of west Nile virus: a review of the recent literature // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2013. Vol. 10, N 11. P. 5399–5432. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph10115399>
22. PanAmericanHealthOrganization. Dengue [Electronic resource]. URL: <http://www.paho.org/data/index.php/en/mnu-topics/indicadores-dengue-en.html> (date of access May 25, 2020)
23. European Centre for Disease Prevention and Control, ECDC. Weekly updates: 2019 West Nile virus transmission season. [Electronic resource]. URL: <http://ecdc.europa.eu/en/west-nile-fever/surveillance-and-disease-data/disease-data-ecdc> (date of access July 22, 2020)
24. LaBeaud A.D., Gorman A.-M., Koonce J., Kippes C. et al. Rapid GIS-based profiling of West Nile virus transmission: defining environmental factors associated with an urban-suburban outbreak in Northeast Ohio, USA // *NIH Public Access.* 2008. Vol. 2, N 2. P. 215–225. DOI: <https://doi.org/10.4081/gh.2008.245>
25. Valiakos G., Papaspyropoulos K., Giannakopoulos A., Birtsas P. et al. Use of wild bird surveillance, human case data and GIS spatial analysis for predicting spatial distributions of West Nile virus in Greece // *PLoS One.* 2014. Vol. 9, N 5. Article ID e96935. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096935>
26. Moore M. J. Geographic analysis of West Nile virus in the Upper Minnesota River Valley: a GIS and multi-temporal remote sensing approach. Theses, dissertations, and other capstone projects. 2014. 134 p.
27. Zou L., Miller S.N., Schmidtman E.T. A GIS tool to estimate West Nile virus risk based on a Degree-Day model // *Environ. Monit. Assess.* 2006. Vol. 129, N 1–3. P. 413–420. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9373-834>
28. Samy A.M., Thomas S.M., Wahed A.A., Cohoon K.P., Peterson A.T. Mapping the global geographic potential of Zika virus spread // *Mem. Inst. Oswaldo Cruz.* 2016. Vol. 111, N 9. P. 559–560. DOI: <https://doi.org/10.1590/0074-02760160149>
29. Ong J., Liu X., Rajarethinam J., Yheng Kok S. et al. Mapping dengue risk in Singapore using Random Forest // *PLoS Negl. Trop. Dis.* 2018. Vol. 12, N 6. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0006587>
30. Эпидемиологический атлас ПФО. ФБУН «Нижегородский научно-исследовательский институт эпидемиологии и микробиологии имени академика И.Н. Блохиной» Роспотребнадзора [Электронный ресурс]. URL: <http://epid-atlas.nniiem.ru/index.html> (дата обращения: 07.08.2020)
31. Сычева К.А., Швеиц О.Г., Медяник И.М., Журенкова О.Б., Федорова М.В. Итоги мониторинга ареала комара *Aedes albopictus* (Skuse, 1895) в Краснодарском крае // *Медицинская паразитология и парази-*

тарные болезни. 2020. № 2. С. 3–8. DOI: <https://doi.org/10.33092/0025-8326mp2020.2.03-08>

32. Попова А.Ю., Куличенко А.Н., Малецкая О.В., Манин Е.А. и др. Использование географической информационной системы ZikaMap для

контроля ситуации по переносчикам опасных арбовирусов в период подготовки и проведения Чемпионата мира по футболу FIFA 2018 в г. Сочи // Здоровье населения и среда обитания. 2019. № 4 (313). С. 4–7.

REFERENCES

- Franklin L.H.V., Jones K.E., Redding D.W., Abubakar I. The effect of global change on mosquito-borne disease. *Lancet Infect Dis.* 2019; 19 (9): e302–12. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(19\)30161-6](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(19)30161-6)
- Weaver S.C., Charlier C., Vasilakis N., Lecuit M. Zika, Chikungunya, and other emerging vector-borne viral diseases. *Annu Rev Med.* 2018; 69: 395–408. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-med-050715-105122>.
- Musso D., Gubler D.J. Zika virus. *Clin Microbiol Rev.* 2016; 29: 487–524. DOI: <https://doi.org/10.1128/CMR.00072-15>
- Dengue and severe dengue. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue> (date of access June 14, 2020) (in Russian)
- Dengue in the WHO European Region. URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/246852/Fact-sheet-Dengue-Rus.pdf (date of access June 24, 2020) (in Russian)
- Pokrovsky V.I., Platonov A.E., Simonova E.G., Platonov O.V., Maleev V.V. Zika fever. *Epidemiologiya i infektsionnye bolezni. Aktual'nye voprosy* [Epidemiology and Infectious Diseases. Actual Issues]. 2016; (2): 35–42. (in Russian)
- WHO statement on the first meeting of the International Health Regulations (2005) (IHR 2005) Emergency Committee on Zika virus and observed increase in neurological disorders and neonatal malformations. URL: [https://www.who.int/ru/news-room/detail/01-02-2016-who-statement-on-the-first-meeting-of-the-international-health-regulations-\(2005\)-\(ihr-2005\)-emergency-committee-on-zika-virus-and-observed-increase-in-neurological-disorders-and-neonatal-malformations](https://www.who.int/ru/news-room/detail/01-02-2016-who-statement-on-the-first-meeting-of-the-international-health-regulations-(2005)-(ihr-2005)-emergency-committee-on-zika-virus-and-observed-increase-in-neurological-disorders-and-neonatal-malformations) (data access June 4, 2020) (in Russian)
- Hennessey M., Fischer M., Staples J.E. Zika virus spreads to new areas – region of the Americas, May 2015–January 2016. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 2016; 65: 55–8. DOI: <https://doi.org/10.15585/mmwr.mm6503e1>
- Vu D.M., Jungkind D., LaBeaud A.D. Chikungunya virus. *Clin Lab Med.* 2017; 37 (2): 371–82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cll.2017.01.008>
- Nunes M.R., Faria N.R., de Vasconcelos J.M., Golding N., et al. Emergence and potential for spread of Chikungunya virus in Brazil. *BMC Medicine.* 2015; 13: 102. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12916-015-0348-x>
- Hadfield J., Brito A.F., Swetnam D.M., Vogels C.B.F., et al. Twenty years of West Nile virus spread and evolution in the Americas visualized by Nextstrain. *PLoS Pathog.* 2019; 15 (10): e1008042. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1008042>
- Putintseva E.V., Alekseychik I.O., Chesnokova S.N., Udovichenko S.K., et al. Results of the West Nile fever agent monitoring in the Russian Federation in 2019 and the forecast of epidemic situation development in 2020. *Problemy osobo opasnykh infektsiy* [Problems of Particularly Dangerous Infections]. 2019; (1): 17–25. DOI: <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2019-1-17-254> (in Russian)
- Toporkov A.V. (ed.). *West Nile Fever*. Volgograd: Volga-Press, 2017: 304 p. (in Russian)
- Vodyanitskaya S.Yu., Sud'ina L.V., Logvin F.V., Vodop'yanov A.S., et al. GIS-technologies in the advancement of epidemiological surveillance for anthrax in the Rostov region. *Epidemiologiya i infektsionnye bolezni* [Epidemiology and Infectious Diseases]. 2016; 21 (3): 152–6. (in Russian)
- Kuznetsov A.A., Porshakov A.M., Matrosov A.N., Lopatin A.A. Application of GIS technologies for determination of boundaries and area of epizootic regions within natural plague foci. *Problemy osobo opasnykh infektsiy* [Problems of Particularly Dangerous Infections]. 2017; (4): 41–4. DOI: <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2017-4-41-44> (in Russian)
- Anan'ev Yu.S. *Geographical Information System. Study guides*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2003: 70 p. (in Russian)
- Rodriguez-Morales A.J., Bedoya-Arias J.E., Ramírez-Jaramillo V., Montoya-Arias C.P., et al. Using geographic information system (GIS) to mapping and assess changes in transmission patterns of chikungunya fever in municipalities of the Coffee-Triangle region of Colombia during 2014–2015 outbreak: Implications for travel advice. *Travel Med Infect Dis.* 2016; 14 (1): 62–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2015.06.009>
- Rodriguez-Morales A.J., Galindo-Marquez M.L., García-Loaiza C.J., Sabogal-Roman J.A., et al. Mapping Zika virus infection using geographical information systems in Tolima, Colombia, 2015–2016. *F1000Res.* 2016; 5: 568. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.8436.1>
- Centre for Disease Prevention and Control, CDC. ArboNET [Electronic resource]. URL: https://www.cdc.gov/arboNET/Maps/ADB_Diseases_Map/index.html (date of access August 30, 2020)
- Jones R.C., Weaver K.N., Smith S., Blanco C., et al. Use of the vector index and geographic information system to prospectively inform West Nile virus interventions. *J Am Mosq Control Assoc.* 2011; 27 (3): 315–9. DOI: <https://doi.org/10.2987/10-6098.1>
- Ozdenler E., Taff G.N., Akkus C. Exploring the spatio-temporal dynamics of reservoir hosts, vectors, and human hosts of west Nile virus: a review of the recent literature. *Int J Environ Res Public Health.* 2013; 10 (11): 5399–432. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph10115399>
- Pan American Health Organization. Dengue [Electronic resource]. URL: <http://www.paho.org/data/index.php/en/mnu-topics/indicadores-dengue-en.html> (date of access May 25, 2020)
- European Centre for Disease Prevention and Control, ECDC. Weekly updates: 2019 West Nile virus transmission season [Electronic resource]. URL: <http://ecdc.europa.eu/en/west-nile-fever/surveillance-and-disease-data/disease-data-ecdc> (date of access July 22, 2020)
- LaBeaud A.D., Gorman A.-M., Koonce J., Kippes C., et al. Rapid GIS-based profiling of West Nile virus transmission: defining environmental factors associated with an urban-suburban outbreak in Northeast Ohio, USA. *NIH Public Access.* 2008; 2 (2): 215–25. DOI: <https://doi.org/10.4081/gh.2008.245>
- Valiakos G., Papaspyropoulos K., Giannakopoulos A., Birtsas P., et al. Use of wild bird surveillance, human case data and GIS spatial analysis for predicting spatial distributions of West Nile virus in Greece. *PLoS One.* 2014; 9 (5): e96935. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096935>
- Moore M. J. *Geographic analysis of West Nile virus in the Upper Minnesota River Valley: a GIS and multi-temporal remote sensing approach*. Theses, dissertations, and other capstone projects. 2014: 134 p.
- Zou L., Miller S.N., Schmidtman E.T. A GIS tool to estimate West Nile virus risk based on a Degree-Day model. *Environ Monit Assess.* 2006; 129 (1–3): 413–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9373-834>
- Samy A.M., Thomas S.M., Wahed A.A., Cohoon K.P., Peterson A.T. Mapping the global geographic potential of Zika virus spread. *Mem Inst Oswaldo Cruz.* 2016; 111 (9): 559–60. DOI: <https://doi.org/10.1590/0074-02760160149>
- Ong J., Liu X., Rajarethinam J., Yheng Kok S., et al. Mapping dengue risk in Singapore using Random Forest. *PLoS Negl Trop. Dis.* 2018; 12 (6): 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0006587>
- Epidemiological atlas of the Volga Federal District. FBUN «Nizhny Novgorod Research Institute of Epidemiology and Microbiology named after Academician I.N. Blokhina» Rospotrebnadzor. URL: <http://epid-atlas.nniiem.ru/index.html> (date of access August 07, 2020) (in Russian)
- Sycheva K.A., Shvets O.G., Medyanik I.M., Zhurenkova O.B., Fedorova M.V. Results of Aedes albopictus (SKUSE, 1895) range monitoring in Krasnodar region in 2019. *Meditinskaya parazitologiya i parazitarnye bolezni* [Medical Parasitology and Parasitic Diseases]. 2020; (2): 3–8. DOI: <https://doi.org/10.33092/0025-8326mp2020.2.03-08>
- Popova A.Yu., Kulichenko A.N., Maletskaya O.V., Manin E.A., et al. Using geographic information system ZikaMap to control the situation with vectors for dangerous arboviruses during the preparation and hosting the 2018 FIFA World Cup in Sochi. *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya* [Public Health and Life Environment]. 2019; 4 (313): 4–7. (in Russian)