

**Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и
благополучия человека
Федеральное бюджетное учреждение науки «Ростовский научно-
исследовательский институт микробиологии и паразитологии»
Роспотребнадзора**



«Утверждаю»
Директор ФБУН Ростов НИИМП
Роспотребнадзора
Г.И. Твердохлебова
«10» _____ 2021 г.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

**«Применение современных информационных технологий для
эпидемиологического анализа распространения возбудителей
паразитарных болезней»**

**Ростов-на-Дону
2021 год**

Разработчики:

ФБУН «Ростовский научно – исследовательский институт микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора:

Думбадзе Олег Соломонович – заведующий лабораторией санитарно-паразитологического мониторинга, медицинской паразитологии и иммунологии ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора, к.м.н.;

Димидова Людмила Леонидовна – старший научный сотрудник лаборатории санитарно-паразитологического мониторинга, медицинской паразитологии и иммунологии ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора, к.м.н.;

Хуторянина Ирина Валерьевна – старший научный сотрудник лаборатории санитарно-паразитологического мониторинга, медицинской паразитологии и иммунологии ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора;

Черникова Мария Петровна – научный сотрудник лаборатории санитарно-паразитологического мониторинга, медицинской паразитологии и иммунологии ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора;

Калюжина Мария Александровна – младший научный сотрудник лаборатории санитарно-паразитологического мониторинга, медицинской паразитологии и иммунологии ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и паразитологии» Роспотребнадзора.

Одобрено решением Ученого Совета
ФБУН «Ростовский НИИ микробиологии и
паразитологии» Роспотребнадзора
Протокол от _____ № _____

Содержание

Введение	4
Геоинформационные системы и их функциональные возможности	5
Применение современных информационных технологий в исследованиях паразитарных заболеваний	10
Спутниковые наблюдения в паразитологических исследованиях на примере малярии	12
Примеры использования ГИС в исследованиях малярии	22
Пространственные исследования на примере забытых тропических болезней в Африке к югу от Сахары	25
Пространственный анализ и моделирование	27
Использование ГИС в отечественных исследованиях	29
Заключение	32
Список использованных источников	33

Введение

Постоянный мониторинг динамики распространения паразитозов и уровня заболеваемости населения необходим для оперативного реагирования на изменение эпидемических проявлений паразитарных заболеваний, позволяющего значительно снизить заболеваемость населения и минимизировать материальные затраты по борьбе с ними.

Социально-гигиенический мониторинг (СГМ), как один из основных механизмов обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, невозможно представить без четко выстроенной, мобильной и современной системы сбора, консолидации, анализа и безопасного хранения многокомпонентной информации о состоянии здоровья населения и качестве среды обитания [1].

Одной из задач в области борьбы и профилактики паразитарных болезней является повышение эффективности системы эпидемиологического надзора на основе повсеместного использования новых информационных телекоммуникационных технологий [2]. Одним из возможных решений этой задачи является внедрение в практику и широкое применение географических информационных систем (ГИС). ГИС занимают важное место среди инструментов эпидемиологического надзора благодаря возможности комбинировать пространственные и эпидемиологические данные [3].

В целом, возможность быстро и легко связывать большие медицинские базы данных, базы общественного здравоохранения с такими же большими геопространственными базами представляет собой важный технологический прорыв.

Благодаря достижениям в области вычислительной мощности и скорости сегодня могут быть проведены исследования, которые не могли быть выполнены в разумные сроки буквально 10 лет назад. Связывая разрозненные базы данных в визуально доступном формате (т. е. с картами), исследователи могут распознавать взаимосвязи или различать закономерности заболеваний, которые могут привести к пониманию причинно-следственной связи, которая ранее не была очевидной.

При правильном использовании пространственные аналитические методы в сочетании с ГИС и другими инструментами дают важную информацию о биологических закономерностях и процессах, которые лежат в основе передачи болезней, в частности паразитозов. В свою очередь, это можно использовать для понимания и прогнозирования распространенности заболеваний [4].

Использование ГИС позволяет более полно изучать закономерности эпидемиологического процесса и географию паразитозов и, соответственно, совершенствовать методологию эпидемиологического и эпизоотологического анализа, как в глубокой длительной ретроспективе, так и в небольших временных интервалах и является идеальным инструментом анализа рисков и мониторинга природно-очаговых паразитарных болезней животных и человека.

Современные ГИС-инструменты реализуют методы геоинформатики, используя мощные программно-аппаратные средства: географические Web-серверы открытого доступа, инструменты сложного многофакторного пространственного анализа, устройства для формирования точнейших электронных и подготовки высококачественных бумажных карт [5].

ГИС позволяют решать прикладные задачи, связанные с оперативным анализом и прогнозом эпидемий, приспособлены для обобщения результатов и процедур эпидемиологического анализа конкретных ситуаций, особенно в части визуализации результатов анализа на географических картах [6].

В современных исследованиях нередко встречается пространственный анализ того или иного паразитоза с применением ГИС [7, 8].

Достижения в области географических информационных систем (ГИС) и технологий дистанционного зондирования (ДЗ) за последние 20 лет значительно облегчили объяснение и прогнозирование моделей риска паразитарных заболеваний, предоставив платформу для интеграции данных обследований с данными об экологических и социально-экономических детерминантах [9, 10].

К настоящему моменту в мире есть уже огромное количество работ с использованием современных информационных технологий, в частности ГИС, в исследованиях паразитарных заболеваний.

Геоинформационные системы и их функциональные возможности

ГИС – это совокупность технических, программных и информационных средств, обеспечивающих ввод, хранение, обработку, математико-картографическое моделирование и образное интегрированное представление пространственных и соотнесённых с ними атрибутивных данных для решения проблем территориального планирования и управления

ГИС содержит данные о пространственных объектах в форме их цифровых представлений (векторных, растровых, квадратомиических и иных), включает соответствующий задачам набор функциональных возможностей ГИС, в которых реализуются операции геоинформационных технологий,

поддерживается программным, аппаратным, информационным, нормативно-правовым, кадровым и организационным обеспечением.

Основная часть ГИС – база данных – состоит из двух взаимосвязанных информационных компонентов: картографической базы данных, описывающих форму и взаиморасположение картографических объектов в определенной проекции (системе координат) и атрибутивной базы данных, содержащей описание реквизитов объектов, их количественные и качественные характеристики, а также некоторые дополнительные данные, которые не могут быть непосредственно отображены на карте, например описание территории, профили, результаты анализов и обследований и т.п.

Современные (ГИС) в эпидемиологии – это совершенно новые компьютерные технологии, которые обеспечивают комплексную автоматизацию процессов сбора, хранения, обработки и анализа эпидемиологической информации с ее визуализацией на электронных картах. Современные ГИС предлагают все расширяющиеся функциональные возможности для решения прикладных задач, связанных с оперативным анализом и прогнозом эпидемий и эпизоотий. Многочисленные инструменты ГИС приспособлены для обобщения результатов и процедур эпидемиологического анализа конкретных ситуаций, особенно в части визуализации результатов анализа на географических картах.

ГИС-приложения различаются по многим признакам.

По территориальному охвату различают:

- глобальные или планетарные ГИС,
- субконтинентальные ГИС,
- национальные ГИС, зачастую имеющие статус государственных,
- региональные ГИС,
- субрегиональные ГИС,
- локальные или местные ГИС.

По особенностям реализации выделяют:

- пространственно-временные ГИС,
- векторные (масштабно-независимые),
- растровые,
- интегрированные и т.п.

Интегрированные ГИС совмещают функциональные возможности ГИС и систем цифровой обработки изображений (материалов дистанционного зондирования) в единой интегрированной среде.

Векторные, или масштабно-независимые ГИС основаны на множественных, или полимасштабных представлениях пространственных объектов, обеспечивая графическое или картографическое воспроизведение

данных на любом из избранных уровней масштабного ряда на основе единственного набора данных с наибольшим пространственным разрешением.

Пространственно-временные ГИС оперируют пространственно-временными данными.

С точки зрения программной архитектуры, геоинформационные системы можно разделить на следующие группы:

1. Открытые ГИС – имеющие встроенные возможности расширения, адаптации к новым форматам данных, возможности создания программных приложений пользователем, поддерживающие стандартные форматы и языки программирования высокого уровня.

2. Закрытые – не представляющие программных интерфейсов (API) и не имеющие возможностей расширения и написания приложений.

3. Специализированные – имеющие ограниченное применение и поставляемые вместе с набором программных приложений.

ГИС делятся на категории:

- специализированное программное обеспечение,
- комплексные системы, включающие все виды обеспечения (методическое, программное, техническое и др.), присущие развитым информационным системам,
- геоинформационные базы данных различного назначения на носителях цифровой информации,
- аэро- и космические снимки, тематические карты и изображения, текстовые отчеты.

ГИС делятся на классы, различающиеся по своим функциональным возможностям и технологическим этапам обработки информации:

1. Инструментальные ГИС.
2. ГИС-вьюеры.
3. Средства обработки данных дистанционного зондирования.
4. Векторизаторы растровых картографических изображений.
5. Средства пространственного моделирования.
6. Справочно-картографические системы.

Инструментальные ГИС – это в наибольшем числе случаев самодостаточные пакеты, включающие такой набор функций, который покрывает все стадии технологического цикла: ввод - обработка - анализ - вывод результатов. Самые мощные представители этого класса именуются «full GIS» (полнофункциональная ГИС). Они обеспечивают:

- двустороннюю связь между картографическими объектами и записями табличной базы данных,

- управление визуализацией объектов,
- работу с точечными, линейными и площадными объектами,
- ввод карт с дигитайзера и их редактирование,
- поддержку топологических взаимоотношений между объектами и проверку с их помощью геометрической корректности карты (замкнутость площадных объектов, связность, прилегание),
 - поддержку нескольких картографических проекций,
 - геометрические измерения на карте (длина, периметр, площадь) - построение буферных зон вокруг объектов,
 - оверлейные операции (наложение различных площадных объектов),
 - создание собственной символики (новые типы маркерных знаков, типов линий, типов штриховок),
 - создание дополнительных элементов оформления карты (подписи, рамки, легенды),
 - подготовка и вывод высококачественных твердых копий,
 - решение транспортных задач (кратчайший путь на графе и т.п.),
 - работу с цифровой моделью рельефа,
 - обработку данных съемки местности,
 - поддержку разработчика встроенными средствами программирования.

Наиболее известными представителями этого класса являются: линия пакетов ARC/INFO компании ESRI, США (ARC/INFO, PC ARC/INFO, ArcCAD); линия пакетов компании Intergraph (MGE-PC), США; пакет AutoCAD Map компании Autodesk; SMALLWORLD (SmallWorld System, Великобритания); MapInfo (MapInfo Corporation, США); SPANS от TYDAC; GEO-SQL фирмы Generation 5.

ГИС-вьюеры – это недорогие (по сравнению с full GIS), облегченные пакеты с ограниченной возможностью редактирования данных, предназначенный в основном для визуализации и выполнения запросов к базам данных (в том числе и графическим), подготовленным в среде инструментальных ГИС. Большинство из них позволяют оформить и вычертить карту. Как правило, все разработчики полнофункциональных ГИС предлагают и ГИС-вьюеры: ArcView (ESRI, США); WinCAT (Siemens Nixdorf, Германия); SPANS MAP; Project Viewer.

Средства обработки данных дистанционного зондирования предназначаются для предварительно обработки материалов, полученных в результате аэро- и космических съемок земной поверхности

Основные этапы обработки:

1. Предварительный (геометрическая и яркостная коррекции, составление мозаики из нескольких снимков)

2. Тематический - классификация, построение цифровой модели рельефа (ЦМР), автоматическое выделение (распознавание, дешифрирование) объектов. Для пользователя ГИС основная обработка – это проблемная, связанная в итоге с дешифрированием снимков

Дешифрирование, в свою очередь, подразделяется на объектное и тематическое. Объектное включает контурное дешифрирование (максимально точное проведение контуров и границ объектов: земельных участков, сельхозугодий, контуров зданий, полотна шоссейной дороги и т.д.) и идентификацию (опознание и выделение конкретных объектов) В тематическом дешифрировании акцент делается не столько и не только на точную отрисовку границ объекта, сколько на правильное его наполнение тематическим содержанием (например, какая толщина нефтяной пленки на водной поверхности). Самые известные представители этого класса продуктов: ERDAS Imagine; ER Mapper; серия продуктов Intergraph; TNT Mips.

Средства пространственного моделирования предназначены для решения задач моделирования пространственно-распределенных параметров. К этим задачам следует отнести:

- обработку результатов полевых измерений
- построение 3-мерной модели рельефа
- построение моделей гидрографической сети и определение участков затопления
- расчет переноса загрязнения и т.д.

Представители: линия продуктов фирмы Eagle Point, США; линия продуктов фирмы SOFTDESK, США.

Справочно-картографические системы – закрытые (в отношении формата и адаптации) оболочки, содержащие простой механизм запросов и отображения. Пользователь, как правило, лишен возможности изменения данных. Как правило, проект ГИС организуется в виде последовательности логических шагов, каждый из которых основан на предыдущем.

Лидерами в области глобальных ГИС в настоящее время являются продукты двух фирм – это система ArcFM американской фирмы ESRI и MapInfo корпорации INTERGRAPH. В СНГ первое место занимает программное обеспечение ESRI Inc.- ArcInfo, ArcView, ArcCAD и др.; второе место принадлежит MapInfo; третье-четвертое места делят между собой Autodesk с системами AutoCAD MAP, World, MAPGuide и GeoGraph (Russia);

пятое место (4%) – у Bentley; шестое и седьмое места (по 3%) удерживают Ziegler с CADDY и ERDAS Inc.

В настоящее время применение геоинформационных технологий и пространственного анализа находит все более широкое применение при моделировании процессов и явлений в системах мониторинга различного назначения. В здравоохранении оно опирается на целый ряд областей знаний: медицинская и социально-экономическая география, география транспорта и геостатистика, обработка растровых изображений и многое другое. Медицинская ГИС предназначена для решения задач на различных масштабных уровнях: федеральном, региональном и муниципальном, что создает предпосылки для формирования различных сегментов геоинформационной системы [11]. В медико-географическом отношении функции ГИС сориентированы на работу с картографическими банками данных по демографической ситуации, условиям и уровню жизни, состоянию здоровья населения, сети учреждений здравоохранения, а также на автоматизацию исследований в данной сфере деятельности [12].

Применение современных информационных технологий в исследованиях паразитарных заболеваний

Передача инфекционных заболеваний, в частности паразитарных, – это динамический процесс, определяемый множеством факторов, зависящий от возбудителей, видов-переносчиков, человеческой популяции, их естественной, социальной и поведенческой среды. Взаимодействия и взаимосвязи этих факторов обуславливают внутренние механизмы передачи заболевания во временном, пространственном и социальном плане. К примеру, происходят генетические мутации возбудителей в результате возникновения устойчивости к лекарствам, изменение климата влечет за собой колебания в популяциях переносчиков паразитозов, смена социально-экономических условий людей порождает модификации их поведения. От совокупного воздействия всех составляющих компонентов с их средой и зависит распространение паразитарных заболеваний [13].

Исследования паразитозов с применением ГИС технологий практически всегда неразрывно связаны с дистанционным зондированием и успешно используются во многих исследованиях паразитарных заболеваний. Геопространственные данные, включая спутниковые наблюдения, являются важнейшими атрибутами при мониторинге за паразитогами.

Дистанционное зондирование и наблюдения на месте в эпидемиологии используются в основном для получения данных о биологических и

физических переменных окружающей среды, которые определяют распространение инфекционного заболевания, либо напрямую, либо через их влияние на хозяина, переносчика или среду обитания паразита. Именно эти данные составляют важную часть информации, используемой при построении ГИС. Значительное внимание уделяется использованию этих инструментов при изучении забытых тропических болезней [14-18].

Характерной чертой таких стадий забытых тропических болезней, как лептоспироз, эхинококкоз, шистосомоз, гельминтозы, передающиеся через почву, лимфатический филяриатоз и онхоцеркоз, является их прочная связь с физической средой, поскольку факторы окружающей среды влияют на популяционную динамику жизненных этапов паразита, промежуточных хозяев и переносчиков [19].

Например, давно известно, что развитие и выживаемость *Ascaris lumbricoides* и *Trichuris trichiura* максимальны при температуре от 28 ° C до 32 ° C, а у анкилостомы - от 20 ° C до 30 ° C. Соответственно, переменные среды используются в качестве входных данных для пространственно-эпидемиологического анализа. Веck с соавторами еще в 2000 г. [20] перечислил 19 представляющих интерес переменных, касающихся земного покрова и землепользования (а также изменения почвенного покрова и землепользования), типа и фенологии растительности, воды (включая постоянные и непостоянные водоемы, наводнения, затопленную растительность, влажность почвы и заболоченные земли), и метеорологии (осадки, влажность и температура). Другие представляющие интерес переменные, предложенные другими авторами, включают еще высоту и тип почвы [21, 22].

Пространственно-эпидемиологический анализ распределения забытых тропических болезней осуществляется путем оценки эмпирических взаимосвязей между эпидемиологическими показателями возникновения заболевания (например, распространенность и интенсивность инфекции) и экологическими и / или социально-экономическими переменными, которые обычно моделируются как ковариаты. Цель таких моделей – либо дать представление о факторах, которые влияют на пространственное распределение болезни, либо использовать наблюдаемые эмпирические отношения между болезнью и окружающей средой для пространственного прогнозирования.

Дистанционное зондирование чаще всего используется для определения детерминант паразитарных заболеваний и разработки моделей для прогнозирования их развития. Подавляющее число исследований с применением пространственных технологий связано с малярией. Тем не

менее, существует значительное число исследований других паразитозов, в частности шистосомоза [23-39], гельминтозов, передающихся через почву [40-43], онхоцеркоза [44], описторхоза [45].

В эпидемиологических исследованиях часто в сочетании с ГИС и дистанционным зондированием используются спутниковые навигационные системы, обеспечивающие автономное геопространственное позиционирование с глобальным охватом.

Спутниковые наблюдения в паразитологических исследованиях на примере малярии

Значение спутниковых наблюдений для исследований паразитозов признано давно, и самые первые обзоры появились более двух десятилетий назад [46-48]. С тех пор произошли значительные изменения в глобальных усилиях по борьбе с некоторыми паразитами и достижения в области дистанционного зондирования. Выявлены бесчисленные связи между явлениями окружающей среды, наблюдаемыми с помощью спутниковых датчиков, и различными аспектами цикла передачи паразитозов, в частности, малярии.

Долгосрочные отчеты об изменении окружающей среды.

Циклы передачи малярии чувствительны к изменчивости климата, и спутниковые наблюдения предоставляют точную, надежную и своевременную информацию об этих изменениях. Осадки влияют на гидрологические циклы водных местообитаний личинок *Anofelis* [49], в то время как температура и влажность влияют на показатели жизнедеятельности, которые определяют динамику популяции комаров, развитие паразитов в комарах и передачу паразитов [50]. Климат также влияет на малярию косвенно, влияя на землепользование, структуру поселений и перемещение населения [51]. Таким образом, спутниковые данные являются важным источником информации для описания тенденций за несколько десятилетий и отслеживания текущих изменений в этих областях.

Соответствующие спутниковые измерения включают оценки осадков, температуры поверхности земли и спектральные индексы, к примеру, нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), чувствительный к растительности и влажности.

Чтобы оценить взаимосвязь между колебаниями климата и малярией, важно иметь долгосрочные записи в сочетании с частыми измерениями для выявления краткосрочных аномалий и сезонных циклов. Ранние применения дистанционного зондирования для исследований малярии основывались на

NDVI и температуре поверхности суши, измеряемой усовершенствованным радиометром с очень высоким разрешением (AVHRR) на метеорологических спутниках Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA). AVHRR обеспечивает ежедневные глобальные наблюдения, начиная с 1981 г., с номинальным разрешением 1000–4000 м [52]. Спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS), запущенный на борту спутников Terra и Aqua Национального управления США по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) в 1999 и 2002 годах, обеспечил значительное улучшение пространственного разрешения (250–1000 м) и частоты измерений (до четыре раза в день в тропиках), количество спектральных диапазонов и качество данных.

Спектральные индексы и температура поверхности земли из MODIS часто используются со спутниковыми измерениями осадков в качестве предикторов в пространственных моделях для создания карт риска малярии [53, 54] и моделей временных рядов для прогнозирования изменений риска малярии в результате колебаний окружающей среды [55, 56]. Данные дистанционного зондирования также используются для контроля изменений окружающей среды при изучении влияния других факторов на малярию. В исследовании последствий мероприятий по борьбе с малярией в Африке использовались данные MODIS для контроля изменений климата и данные о ночном освещении из новейшего набора радиометров для визуализации в видимом инфракрасном диапазоне (VIIRS) для контроля за урбанизацией [57, 58]. Аналогичным образом, при анализе трансграничного распространения малярии в Амазонии использовались метеорологические и гидрологические переменные, полученные из спутниковых наблюдений, для контроля изменений факторов риска для окружающей среды [59].

Несмотря на продемонстрированную ценность MODIS для исследований малярии, пространственное разрешение не подходит для картирования мелких деталей ландшафта. Практика землепользования и связанная с этим структура земного покрова могут увеличивать или уменьшать численность комаров и их способность передавать малярию в зависимости от социальных, экологических и географических условий. Орошаемое земледелие может обеспечить среду обитания личинок комаров и является фактором риска малярии во многих, но не во всех местах [60]. Урбанизация увеличивает риск малярии в некоторых частях Азии, где основным переносчиком является адаптированный к городам *Anopheles stephensi* [61], но снижает риск малярии в Африке, где такие переносчики, как *Anopheles gambiae*, связаны с сельскими местами обитания [62]. Лесной покров является фактором риска малярии в некоторых частях Юго-

Восточной Азии, где переносчик *Anopheles dirus* ассоциирован с лесами с закрытым пологом [63]. Напротив, вырубка лесов может повысить пригодность среды обитания для таких видов переносчиков, как *Anopheles gambiae* sl в Африке и *Nyssorhynchus darlingi* (ранее *Anopheles darlingi*) в Южной Америке, что приводит к более высокому риску малярии на очищенных территориях [64-65]. Человеческая деятельность, связанная с методами землепользования, включая сельское хозяйство и лесные работы, также влияет на подверженность укусам инфицированных комаров [66-67].

Чтобы точно измерить эти особенности ландшафта, необходимы данные с более высоким разрешением, полученные от спутниковых программ, таких как Landsat. Программа Landsat собирала оптические данные с разрешением 30 м и тепловые данные с разрешением 60–120 м с момента запуска спутника Landsat 4 в 1982 г. Хотя 16-дневное время повторного посещения спутника Landsat значительно больше, чем дневное разрешение MODIS, оно подходит для измерения изменений земного покрова в сезонных и годовых масштабах. В большинстве приложений Landsat для оценки риска малярии используется одно или несколько изображений для получения статической оценки ландшафтных условий в определенный момент времени. Примеры включают влияние растительности и воды на пространственные схемы распространения малярии в Эфиопии [68], Свазиленде [69] и бразильской Амазонки [70], а также картирование риска малярии с высоким разрешением во Вьетнаме [71] и на Мадагаскаре [72]. Landsat также часто используется для создания классифицированных карт земного покрова и получения индексов растительности и влажности для анализа и картирования мест обитания комаров [73, 74].

Все новые и исторические данные Landsat стали доступны в 2010 году, что стало катализатором достижений в области дистанционного зондирования, которые сделали возможным картирование земного покрова с высоким разрешением с ежегодными временными интервалами [75]. Полученные со спутника Landsat ежегодные измерения прироста и исчезновения лесов на основе глобального набора данных [76] использовались для изучения воздействия расчистки и фрагментации лесов на появление *Plasmodium knowlesi* у людей на Малайзийском Борнео [77]. Набор данных Программы расчета обезлесения в Амазонии (PRODES), который использует Landsat и другие источники данных для картирования ежегодной вырубки лесов в бразильской Амазонии, использовался для изучения воздействия утраты лесов на заболеваемость малярией в этом регионе [78, 79]. 30-летний глобальный набор данных о поверхностных водах был включен в карту пригодности переносчиков малярии в Малави [80], а 14-

летний временной ряд NDVI, полученный с Landsat, использовался в модели случаев малярии на уровне медицинских учреждений в Замбии [81]. Существует потенциал для более широкого использования временных рядов Landsat в исследованиях малярии. Одним из ограничивающих факторов является наличие наборов долгосрочных эпидемиологических и энтомологических данных с достаточно высоким пространственным разрешением, чтобы их можно было связать с изменениями в землепользовании и земном покрове. Работа с временными рядами Landsat также технически сложна из-за больших объемов данных и пробелов в данных из-за облачного покрова.

Непрерывность данных – важная проблема для приложений дистанционного зондирования. Все спутниковые миссии имеют ограниченный срок службы, а различия в сенсорных и орбитальных характеристиках влияют на измерения, проводимые более новыми миссиями. Необходима разработка согласованных продуктов для объединения спутниковых данных из разных источников в последовательные, долгосрочные наборы данных. Примером может служить набор продуктов Integrated Multi-Satellite Retrieval for GPM (IMERG), которые обеспечивают непрерывные оценки осадков с 2000 года по настоящее время путем объединения данных из текущей миссии Global Precipitation Measurement (GPM), более старой миссии по измерению тропических осадков (TRMM) и другие источники. Полученные в результате записи данные использовались при изучении малярии и других заболеваний, связанных с водой. Значительным событием для сообщества дистанционного зондирования станет конец эпохи MODIS: вывод из эксплуатации Terra ожидается в 2026 году, а Aqua – через несколько лет. MODIS заменяется датчиком VIIRS на борту полярно-орбитальных спутников NOAA, и в настоящее время ведутся исследования по согласованию MODIS и VIIRS для создания согласованных записей температуры поверхности земли и индексов растительности [82, 83]. Однако пока не ясно, какие типы согласованных продуктов данных будут доступны и насколько они пригодны для работы с малярией и другими экологически уязвимыми заболеваниями.

Новые пространственные, временные и спектральные разрешения.

Исследования и вмешательства на уровне домашних хозяйств требуют информации об индивидуальных жилищах и мероприятиях сообщества, направленных на пространственные объекты с высоким разрешением, такие как пруды и временные водоемы. Для картирования такого уровня детализации требуются спутниковые изображения с очень высоким разрешением (VHR) (размером от <1 м до 5 м в пикселях), получаемые

коммерческими спутниками, такими как Ikonos, GeoEye и WorldView 1-3. Эти изображения могут быть использованы для подсчета отдельных домохозяйств для выбора предметов исследования или проведения вмешательств на уровне домохозяйств [84-86]. Отдельные водоемы, которые служат средой обитания личинок, также можно обнаружить на изображениях VHR, и эту информацию можно использовать для картирования районов с высокой численностью комаров и проведения мероприятий по борьбе с комарами [87, 88]. Однако из-за постоянной облачности в сезон дождей часто бывает трудно получить изображения VHR в то время, когда местообитания личинок наиболее многочисленны.

Значительное количество изображений VHR публично доступно через онлайн-платформы, такие как Google Earth, Google Maps и Bing Maps. Эти изображения представляют собой сжатые композитные материалы с истинным цветом (красный, зеленый и синий), которые подходят для визуальной интерпретации [89] и некоторых методов цифровой обработки и классификации [90]. Даты снимков различаются, хотя большинство из них относятся к прошлым нескольким годам. С помощью Google Earth можно определить даты снимков, а также получить доступ к историческим данным VHR. В принципе, большинство коммерческих спутников VHR могут собирать данные в ежедневном или почти ежедневном цикле. На практике эти спутниковые изображения покрывают только часть поверхности Земли каждый день, стратегии получения основаны на спросе со стороны клиентов, а охват исторических данных сильно варьируется в пространстве и во времени.

Необработанные спутниковые данные, используемые для создания этих общедоступных изображений, предлагают больше возможностей для анализа и обычно включают один или несколько инфракрасных диапазонов, которые полезны для обнаружения водоемов и здоровой растительности [91, 92]. Однако высокая стоимость и технические проблемы работы с коммерческими данными VHR ограничивают их более широкое использование для исследований и приложений по малярии. Помимо стоимости получения изображений, обработка и анализ больших объемов изображений VHR требует значительного места для хранения и вычислительной мощности. Данные VHR часто классифицируются с использованием объектно-ориентированных методов, которые идентифицируют и классифицируют пространственные кластеры пикселей, а не подходов на основе пикселей, используемых с изображениями с более низким разрешением [93, 94]. Эти методы требуют специального

программного обеспечения и опыта, которые недоступны большинству конечных пользователей в секторе борьбы с малярией.

Важным достижением стала разработка малых спутников – компактных и относительно недорогих спутников, которые можно производить и запускать в большом количестве. Миссия PlanetScore, начавшаяся в 2016 году, состоит из более чем 120 малых спутников, которые ежедневно собирают спутниковые данные VHR с разрешением 3 м для всего земного шара. В отличие от других источников спутниковых данных VHR, PlanetScore позволяет отслеживать сезонную и межгодовую изменчивость окружающей среды. Высокое временное разрешение также приводит к более высокой вероятности получения данных без облачных вычислений для определенного местоположения и периода времени. Конкретные приложения включают выявление пахотных земель, пораженных болезнями растений [95], а также мониторинг пространственных и временных закономерностей малых водоемов в засушливых регионах [96]. Данные PlanetScore также должны хорошо подходить для отслеживания краткосрочных изменений в среде обитания личинок, а также размера и состояния населенных пунктов.

Миссия Sentinel-2, запущенная Европейским космическим агентством (ESA) в 2015 году, также имеет глобальную стратегию сбора данных с изображениями, получаемыми еженедельно с пространственным разрешением от 10 до 20 м. Хотя эти разрешения слишком грубые для обнаружения отдельных местообитаний или жилищ личинок, Sentinel-2 можно использовать для картирования характеристик земного покрова, таких как орошаемое земледелие, городские районы и водные ресурсы, с более высоким пространственным разрешением, чем это возможно с помощью Landsat. По сравнению с PlanetScore данные Sentinel-2 бесплатны и имеют более высокое радиометрическое качество, а также диапазоны среднего инфракрасного диапазона, которые полезны для картирования растительности и воды. Было несколько многообещающих применений Sentinel-2 для картирования водоемов и местообитаний комаров [97, 98]. Данные Sentinel-2 также были объединены с данными Landsat 8 для разработки согласованного продукта, который значительно увеличивает частоту наблюдений.

В большинстве работ по дистанционному зондированию малярии использовались данные пассивных датчиков, которые обнаруживают отраженную и излучаемую энергию в оптических и тепловых длинах волн. Напротив, радар с синтезированной апертурой (SAR) – это активный датчик, который испускает импульсы микроволнового излучения и измеряет энергию, возвращаемую датчику. SAR использовался для картографирования

ландшафтов, таких как орошаемое земледелие, открытая вода и водно-болотные угодья, которые обеспечивают среду обитания личинкам комаров [99, 100]. Что наиболее важно, инструменты SAR собирают данные на более длинных волнах, которые могут проникать сквозь значительный облачный покров, но основным ограничением использования SAR для приложений по борьбе с малярией была доступность данных. В прошлом данные SAR собирались в основном коммерческими спутниками и были относительно дорогими, в то время как меньший объем бесплатных данных SAR имел ограниченный пространственный и временной охват. Запуск первого спутника Sentinel-1 ЕКА в 2014 году положил начало новой эре бесплатного глобального доступа к данным SAR. Sentinel-1 предоставляет данные SAR в диапазоне C с разрешением 10 м для всего земного шара с 12-дневным циклом повторения. Sentinel-1 использовался для картирования открытых водоемов и водно-болотных угодий, которые обеспечивают среду обитания личинок переносчиков малярии в Замбии [101] и Амазонке [102]. Предстоящая миссия NASA – ISRO SAR (NISAR), запуск которой запланирован на 2022 год, предоставит дополнительный глобальный источник бесплатных данных SAR в L- и S-диапазонах. В целом конечные пользователи в секторе общественного здравоохранения менее знакомы с радаром, чем с оптическим и тепловым дистанционным зондированием. Однако с увеличением доступности бесплатных данных SAR становится доступным больше учебных ресурсов для поддержки их более широкого использования [103].

Пассивные микроволновые датчики обнаруживают излучаемое микроволновое излучение. Эти данные могут использоваться для оценки влажности почвы и могут быть полезны для определения почв, где может скапливаться вода и создавать среды обитания личинок. Миссия Active-Passive Soil Moisture (SMAP), запущенная в 2015 году, позволяет получать ежедневные данные о влажности почвы с разрешением 9 и 36 км. Продукт Инициативы по изменению климата ESA обеспечивает долгосрочные записи влажности почвы с 1978 по настоящее время на основе данных от нескольких активных и пассивных микроволновых датчиков с пространственным разрешением ~ 28 км [104]. Глобальная запись данных о параметрах суши (GLPDR), полученная на основе пассивных микроволновых наблюдений, включает ежедневные наблюдения с 2002 по 2018 год за влажностью почвы, а также за частичным водным покровом, температурой воздуха и водяным паром в атмосфере [105]. Изучение популяций комаров в США показало, что эти переменные, полученные с помощью дистанционного зондирования, сильнее связаны с численностью комаров, чем метеорологические

переменные с местных метеостанций [106]. На сегодняшний день данные пассивного микроволнового излучения не получили широкого распространения для исследования малярии. Хотя грубое пространственное разрешение ограничивает их использование для местных оценок, существует потенциал для включения данных о влажности почвы в более широких региональных и глобальных масштабах.

Помимо этих новых источников спутниковых данных важным событием является появление других сенсорных платформ, таких как дроны [107]. Хотя дроны менее подходят для регулярного долгосрочного мониторинга, чем спутники, их преимущество заключается в том, что они могут быть развернуты в определенное время и в определенных местах, желаемых пользователем. Другие соответствующие технологии включают недорогие регистраторы данных, которые можно использовать для мониторинга микроклимата на предмет наличия комаров-переносчиков на многих участках [108], и технологии определения местоположения, такие как трекеры глобальной системы позиционирования (GPS) и мобильные телефоны, которые могут отслеживать перемещения людей и паразитов [109]. Существует большой потенциал для интеграции этих технологий со спутниковым дистанционным зондированием, например, использование беспилотных летательных аппаратов для сбора данных с очень высоким разрешением о местообитаниях личинок и обучение классификаторов спутниковых изображений для экстраполяции прогнозов на большие территории и более длительные периоды времени.

Новые технологии для повышения доступности и удобства использования данных.

Хотя многие наборы спутниковых данных доступны в Интернете бесплатно, для доступа к ним требуется навигация по огромному и часто сбивающему с толку массиву продуктов данных, определение того, какие из них подходят для конкретного приложения, и загрузка большие объемы данных из онлайн-архивов. Обычно требуется несколько этапов обработки, включая извлечение данных из сложных архивных файлов, перепроецирование для соответствия системам координат других наборов геопространственных данных, вычисление экологических индексов на основе необработанных данных, обнаружение и заполнение пробелов в данных и обобщение результатов в соответствующих временных и пространственных единицах [110]. Большинство исследователей и практиков малярии не имеют опыта обработки спутниковых данных и доступа к необходимому специализированному программному обеспечению. Одним из способов решения этой проблемы является создание междисциплинарных групп ученых и практиков, которые могут работать совместно, чтобы связать спутниковое дистанционное зондирование с малярией. В более общем плане

существует потребность в обеспечении обмена данными между различными дисциплинами путем разработки инструментов для облегчения поиска данных и реализации политики, обеспечивающей доступ как к эпидемиологическим данным, так и к данным дистанционного зондирования для исследований и приложений.

Организации, предоставляющие спутниковые данные, такие как Система данных и информации системы наблюдения за Землей НАСА (EOSDIS) в США, предоставляют инструменты и услуги, позволяющие обнаруживать и загружать данные. Хотя многие из этих инструментов предназначены для специалистов по дистанционному зондированию, другие были разработаны для упрощения доступа пользователей в других областях. Система Джованни, разработанная Центром данных и информационных услуг Годдарда по наукам о Земле, предоставляет веб-интерфейс, который упрощает поиск, визуализацию и загрузку данных [111]. Библиотека данных Международного научно-исследовательского института климата и общества [112] включает упрощенный онлайн-интерфейс для управления, визуализации и загрузки климатических данных, включая климатические карты риска малярии. Данные дистанционного зондирования все чаще распространяются в виде «готовых к анализу» наборов данных или «кубов данных», где продукты предварительно обработанных данных предоставляются в виде ячеек с координатной сеткой, которые могут быть включены в аналитические рабочие процессы с минимальной дополнительной обработкой [113, 114]. Эти системы включают в себя удобные интерфейсы для просмотра данных, а также интерфейсы прикладного программирования (API), которые могут автоматизировать загрузку больших объемов данных. По мере внедрения новых инструментов для улучшения обнаружения, доступности и удобства использования данных, препятствия для работы с данными дистанционного зондирования будут продолжать уменьшаться.

Другой важной тенденцией является увеличение доступности продукции более высокого уровня, в которой используются спутниковые данные для картирования земного покрова и метеорологических переменных в региональном и глобальном масштабах. Глобальные наборы данных о земном покрове включают лесной покров [77], поверхностные воды [115] и городские районы [116] с разрешением 30 м. Полученные со спутников данные о земном покрове также являются важным вкладом в карты населения с высоким разрешением, такие как карты WorldPop [115]. Наборы глобальных метеорологических данных с высоким разрешением включают данные об атмосферных осадках в инфракрасном диапазоне с помощью станций (CHIRPS) и группу климатических опасностей со станциями (CHIRTS), которые предоставляют ежедневные данные об осадках и температуре воздуха с пространственным разрешением ~ 5,5 км [117, 118]. Эти продукты могут улучшить исследования климата и малярии, предоставляя более локализованные оценки метеорологических условий,

влияющих на комаров и передачу малярии, чем метеорологические сетки с более низким разрешением. Наборы данных обычно проходят некоторую оценку точности, но качество данных может сильно варьироваться от места к месту. Поэтому настоятельно рекомендуется оценить пригодность этих глобальных продуктов, прежде чем применять их для местных и региональных оценок малярии.

Новые среды облачных вычислений для анализа данных дистанционного зондирования также способствовали его более широкому использованию. Google Earth Engine (GEE) включает в себя интерактивную среду разработки на основе браузера и интерфейс прикладного программирования JavaScript, которые обеспечивают доступ к широкому спектру вспомогательных продуктов [119]. Вычисления выполняются посредством параллельной обработки в Google Cloud, что упрощает анализ на больших площадях и за длительные периоды времени. Облачная реализация также обеспечивает доступ для конечных пользователей с ограниченными вычислительными ресурсами в средах с низкой пропускной способностью. На сегодняшний день использование GEE для приложений общественного здравоохранения и, в частности, от малярии ограничено [120]. Однако в недавних исследованиях GEE использовался для картирования мест обитания комаров в Малави [80] и других странах на юге Африки [121]. Поставщики коммерческих вычислительных услуг, такие как Google Cloud и Amazon Web Services, также предоставили доступ к обширным архивам спутниковых данных через свои платформы. Другие появляющиеся платформы для облачного анализа наборов данных наблюдения Земли, которые могут быть полезны для приложений по борьбе с малярией, включают Sentinel Hub, Open Data Cube (ODC) и Систему доступа к данным наблюдения Земли, обработки и анализа для мониторинга земли (SEPAL) [122].

Спутниковое дистанционное зондирование в настоящее время обычно используется в исследованиях малярии для измерения условий окружающей среды, которые влияют на популяции комаров, уязвимость людей и циклы передачи малярии. Эти взаимосвязи служат основой для карт риска, которые выделяют места с наивысшим риском малярии [72], и систем раннего предупреждения, которые прогнозируют вспышки малярии на основе запаздывающих реакций на изменения окружающей среды [123]. Спутниковые данные также можно использовать для картирования зданий, оценки плотности населения и определения методов землепользования, которые влияют на воздействие комаров на человека. Важной целью является включение этой информации в пространственные системы поддержки принятия решений, нацеленные на мероприятия по борьбе с малярией в тех местах и в то время, когда они будут наиболее эффективными.

Примеры использования ГИС в исследованиях малярии

Малярия, вызываемая простейшими из рода *Plasmodium*, передается через укусы инфицированных самок комаров-переносчиков *Anopheles*. Различные факторы, включая паразита, переносчика, человеческий организм и окружающую среду, участвуют в интенсификации его передачи. Пространственные пределы его распространения и сезонная активность чувствительны к климатическим факторам, а также к местной способности контролировать болезнь.

Действия переносчика, в том числе поиск хозяина и кормление кровью, связаны с набором условий окружающей среды, таких как температура и влажность. Передача малярии также объясняется климатическими условиями, которые могут повлиять на плотность и продолжительность жизни комаров.

Существует острая необходимость в использовании геопространственных инструментов, таких как ГИС, для выявления пространственных закономерностей малярии и определения ее очагов для улучшения планирования и управления мероприятиями, связанными с данным паразитозом [124-126]. Геопространственная технология, т.е. ГИС в сочетании с инструментами пространственной статистики, успешно использовалась при моделировании риска малярии в различных частях мира [127, 128]. Все более широкое использование геопространственных технологий было вызвано необходимостью локализации очагов инфекции и прогнозирования потенциального распространения болезни [129]. Появление ГИС в сочетании с улучшенными методами пространственной статистики расширило возможности по пространственному моделированию болезни на основе пригодности среды обитания переносчиков, а также на основе заболеваемости. Например, нишевое моделирование, обобщенные линейные смешанные модели, нелинейные уравнения, обычная регрессии наименьших квадратов и байесовской анализ являются одними из многих методов, которые использовались для моделирования пригодности векторов в различных пространственных масштабах.

К примеру, Gwitira с коллегами продемонстрировали, как геопространственный анализ дает возможность моделировать пространственные закономерности распределения очагов болезней, которые могут помочь в планировании и управлении здравоохранением [130].

В своем исследовании авторы проверили, в какой степени можно использовать пространственные модели на основе ГИС для прогнозирования сезонных очагов распространения малярии, полученных на основе модели пригодности среды обитания *Anopheles arabiensis* в Зимбабве. Для этого

сначала использовали биоклиматические переменные и высоту для прогнозирования пригодности среды обитания с использованием модели распределения видов только по присутствию перед нанесением на карту поверхностей в ГИС. Затем были определены сезонные очаги распространения малярии на основе подтвержденных положительных случаев заболевания малярией, зарегистрированных в медицинских учреждениях Зимбабве, с использованием геопространственных методов. Наконец, была использована аутологистическую регрессия, чтобы связать сезонные очаги малярии с пригодностью среды обитания *Anopheles arabiensis* с учетом пространственной автокорреляции. На основании полученных результатов были сделаны выводы о том, что между очагами распространения малярии и пригодностью среды обитания *Anopheles arabiensis* в Зимбабве существует тесная положительная взаимосвязь, и смоделированная пригодность среды обитания переносчика может успешно использоваться для прогнозирования сезонных очагов распространения малярии.

Alimi с соавторами в исследовании 2015 г. [131] представили модели текущего и будущего пространственного распределения малярии и двух ее доминирующих переносчиков, *Anopheles darlingi* и *Anopheles nuneztovari* sl на севере Южной Америки, включающем части Боливии, Бразилии, Колумбии, Эквадора, Французской Гвианы, Гайаны, Перу, Суринама и Венесуэлы, а также все части тропических лесов Амазонки. Авторы, используя данные о переносчиках и заболеваемости, 23 переменные окружающей среды, биоклиматические, топографические, гидрологические данные, информацию о землепользовании и почвенном покрове, а также данные о населении, спрогнозировали распространение малярии и ее переносчиков в 2050 и 2070 годах, используя помимо ГИС как и в работе Gwitira I. платформу моделирования распределения видов Maxent.

Maxent – метод, предсказывающий пригодность среды обитания вида путем включения его задокументированных точек появления с соответствующими экологическими предикторами в определенном географическом пространстве [132, 133], при условии, что ожидаемое значение каждого предиктора при этом предполагаемом распределении соответствует его эмпирическому среднему значению. Результатом является относительная пригодность среды обитания, рассчитанная путем преобразования экспоненциальных значений исходных оценок пригодности в логистические значения [134].

В результате, анализ показал, что хотя климатические факторы, температура и осадки играют важную роль в текущем и будущем

распространении малярийных паразитов и комаров-переносчиков в регионе, аспекты человеческого влияния, измеряемые с помощью землепользования и почвенного покрова, и изменения популяции также сильно будут влиять на распространение.

Влияние антропогенных изменений на распространение малярии также показано в работе Kaewwaen и Bhumiratana [135]. В исследовании авторы указывают на существенное увеличение потенциальных рисков передачи малярии при изменении в использовании сельскохозяйственных земель в агролесоводческих экосистемах и физических условиях окружающей среды в Таиланде. Из-за характера и масштабов изменений в землепользовании риски или отрицательные экосистемные последствия являются результатом динамики передачи малярии, восприимчивости населения и географического распространения переносчиков малярии. Исследование сосредоточено в основном на том, каковы потенциальные последствия изменения в использовании сельскохозяйственных земель в результате расширения каучуковых плантаций в Таиланде и насколько важны экотопы каучуковых плантаций, связанные с малярией.

Salahi-Moghaddam с соавторами провели исследование пространственных изменений в распределении переносчиков малярии в Иране за последние 5 десятилетий [136]. В ходе работы были собраны метеорологические и энтомологические данные за период около 50 лет, размещены в базе геоданных и проанализированы с помощью ArcGIS, экспортированы в SPSS для статистического анализа. Были созданы карты распространения для каждого из семи основных видов-переносчиков малярии в Иране - *Anopheles culicifacies sl*, *An. fluviatilis sl*, *An. stephensi*, *An. dthali*, *An. sacharovi*, *An. maculipennis.l.* и *An. superpictus* на основе климатических факторов в ареалах распространения каждого *Anopheles*-переносчика. Было показано текущее, историческое и прогнозируемое распределение переносчика малярии в Иране. Карты прогнозов были созданы на основе двух стратегий. Первый тип основан на влиянии трех важных классических факторов окружающей среды – температуре, относительной влажности и осадках. Второй тип карт прогнозов создан на основе влияния других переменных с помощью регрессионного анализа, которые были разными для каждого вида комара.

В результате работы авторы предполагают, что в Иране можно прогнозировать сдвиг в распределении переносчиков малярии в прохладных, возвышенных и влажных районах. Прогнозируется, что низкие возвышенности центральных гор Ирана, с наибольшей вероятностью будут подвержены малярии в следующие десятилетия. Кстати, землепользование,

растительный покров, доступность поверхностных вод и их качество оказались основными факторами, влияющими на пространственное распределение этих векторов.

Пространственные исследования на примере забытых тропических болезней в Африке к югу от Сахары

Программы контроля и ликвидации заболеваний значительно выигрывают от точной информации о пространственной изменчивости риска заболевания, особенно когда этот риск сильно пространственно неоднороден. Благодаря достижениям в области статистической методологии в сочетании с возросшей доступностью геопространственных технологий эта информация становится все более доступной.

Среди забытых тропических болезней особый интерес вызывают три паразитоза, поражающих население в странах Африки к югу от Сахары, а именно: африканский трипаносомоз человека, шистосомоз и лимфатический филяриоз. Эти три вида заболеваний, с различными путями передачи, методами контроля и уровнем пространственной гетерогенности, демонстрируют гибкость и применимость методов пространственного анализа.

Африканский трипаносомоз человека, также известный как сонная болезнь, является инфекцией, вызываемой простейшими паразитами, принадлежащими к виду *Trypanosoma*. Это трансмиссивное заболевание, переносчиком которого является муха цеце. Существует две формы трипаносомоза в зависимости от вовлеченного паразита – *Trypanosoma brucei gambiense* («гамбийская» форма), которая в основном встречается в Западной и Центральной Африке и на которую приходится большинство случаев заболевания, и *Trypanosoma brucei rhodesiense* («родезийская» форма), которая в основном встречается в Восточной и Южной Африке.

Муши-цеце считаются очень чувствительными к условиям окружающей среды, поэтому даже при наличии определенных очагов существует неоднородность риска заболевания [137]. При определении географического распределения распространенности заболеваний или, что более важно, географического распространения передачи, связанные с этим факторы окружающей среды зависят от подрода *Glossina* и формы заболевания. К примеру, гамбийская форма в основном передается другими видами цеце, поэтому риск передачи сильно связан с наличием рек и окружающей прибрежной растительностью [138, 139]. Родезийская форма в основном передается видами, обитающими в саваннах, поэтому она больше ассоциируется с лесами. Кроме того, родезийская форма является зоонозом,

для которого животные являются основным резервуаром, поэтому присутствие дикой фауны и крупного рогатого скота также влияет на распределение риска [140, 141]. Необходимо также учитывать факторы, влияющие на вероятность контакта человека с инфицированным переносчиком. Пространственные модели, относящиеся к передаче трипаносомоза фокусируются либо на распределении переносчика, либо на случаях самого заболевания. В опубликованной литературе по случаям заболеваемости трипаносомозом имеется небольшое количество работ, включающих пространственный анализ, в отличие от тех, в которых исследуется пространственное распределение переносчика – мухи цеце [142 - 145].

Общие факторы риска распространения мухи цеце, включенные в эти модели, включают высоту, растительность, температуру, количество осадков и почвенный покров.

Шистосомоз. В Африке к югу от Сахары встречается две формы этого заболевания – урогенитальный и кишечный шистосомоз, вызываемые, соответственно, *Schistosoma haematobium* и *Schistosoma mansoni*. Шистосомоз – заболевание, передающееся через воду, заражение которым происходит при вступлении в контакт с пресноводными обитателями улиток (*Bulinus* и *Biomphalaria spp.*) [146, 147]. Конкретнее, люди заражаются личиночными формами паразитов, которые находятся в пресной воде после выхода из промежуточных хозяев - улиток и проникают в кожу индивидуума.

Передача шистосомоза происходит в районах, где люди контактируют с водоемами, являющимися средой обитания улиток, посредством такой деятельности, как купание, рыбная ловля и использование воды при приготовление пищи, что приводит к очень пространственно неоднородному распределению заболевания. Поэтому факторы окружающей среды, которые необходимо учитывать при определении риска передачи шистосомоза, включают те, которые связаны с пригодностью среды обитания улиток, например, осадки, температура, различные свойства почвы, индексы растительности, тип почвенного покрова и свойства воды, а также факторы, связанные с контактом человека с водой, например, доступность воды [148]. Обзор пространственных моделей шистосомоза 2015 года [149] выявил 36 работ, опубликованных в период 2009-2013 гг., в которых основное внимание уделяется пространственному распределению риска передачи заболеваний в Африке, дополняющий обзор, опубликованный в 2009 году, в котором основное внимание уделялось периоду 1996-2008 гг. [150]. В отличие от трипаносомоза, большинство исследований сосредоточено на распределении случаев заболевания, в отличие от промежуточного хозяина – улитки.

Лимфатический филяриатоз – трансмиссивное заболевание, вызываемое *Wuchereria bancrofti* и передаваемое в основном комарами рода *Anopheles* в сельских районах и комарами рода *Culex* в городских и пригородных районах. Схемы передачи инфекции в значительной степени связаны с факторами, связанными с распространением переносчика, а также факторами, связанными с контактом человека с комарами. *Anopheles*, как упоминалось ранее, также являются основным переносчиком малярии, поэтому было проведено большое количество исследований для определения факторов риска, связанных с распространением лимфатического филяриатоза, т. е. высоты, количества осадков, температуры, влажности, типа почвенного покрова и индексов растительности [151-153]. Что касается контакта человека с комарами, *Anopheles* в основном активны между закатом и рассветом, контакт определяется использованием методов индивидуальной защиты, и близостью дома к подходящему месту обитания комаров. Было проведено меньше исследований факторов, влияющих на передачу лимфатического филяриатоза в городских условиях, при этом связи в основном определялись с местоположением экологической инфраструктуры, например, близостью к санитарным сооружениям, канализации и дренажу, расположению коллекторов стоячей воды [154]. Как и в случае с шистосомозом, большинство работ, в которых применяются пространственные методы для получения данных о лимфатическом филяриатозе, сосредоточены на распространенности самого заболевания. Карты распространенности, основанные на исторических или базовых данных, можно найти на региональном, национальном или субнациональном уровне для многих стран Африки к югу от Сахары [152, 155-158]. Знание пространственного распределения переносчиков также имеет важное значение. Существует огромное количество доступной информации о пространственном распределении *Anopheles* в малярийном сообществе, например, проект "Атлас малярии" (Malaria Atlas Project) выпускает карты распределения видов, составленные с использованием данных о встречаемости комаров [159, 160]. Также были получены прогнозные карты распределения в рамках проекта VectorMap [161].

Пространственный анализ и моделирование

Карты риска заболеваний бывают разных форм в зависимости от их назначения и, что особенно важно, наличия данных. В своей простейшей форме карты болезней представляют собой визуальные представления риска заболевания (заболеваемости, распространенности, интенсивности, численности переносчиков и т.д.) в географическом пространстве, либо на

уровне области, например, с использованием пространственно дискретных границ районов, либо на уровне точек, пересекающих область интереса. Исторически сложилось так, что карты риска заболеваний на уровне районов являются более распространенными; однако, благодаря достижениям в области географических и вычислительных технологий, данные с привязкой к точкам теперь гораздо более доступны.

Существует множество подходов к картированию риска заболеваний, включая приемы геостатистики, математическое моделирование, методы оценки доказательств пространственной зависимости и методы картирования пространственной изменчивости [162].

К основным задачам пространственного анализа в эпидемиологическом контексте относятся – определение кластеров болезней, объяснение их пространственного распределения и прогнозирование риска заболевания. Эти цели достигаются путем визуализации, исследования и моделирования данных. Для этого файлы данных, содержащие географические ссылки, обычно выражающиеся как географические координаты или единицы площади, для каждой записи вводятся и организуются в базу геоданных), из которой они могут быть запрошены и извлечены. Первый шаг - нанесение на карту данных. Это позволяет визуализировать любые существующие пространственные закономерностей и помогает в формулировании гипотез для дальнейшего анализа. На этапе анализа данные и их пространственное распределение исследуется с помощью геостатистических методов, с целью выявления кластеров. Пояснительный этап анализа, направленный на выявление причинно-следственных связей, распределение и протяженность кластеров, что приводит к прогнозированию. На этом этапе, как правило, требуется использование дополнительных слоев информации (например, наборы данных об окружающей среде), и это предполагает использование моделирования.

Моделирование требует глубоких математических знаний и обычно не осуществляется исключительно в среде ГИС. Однако следует подчеркнуть: что современные проблемы эпидемиологии и паразитологии требуют способности объяснять и предсказывать кластеризацию болезней.

Важнейшее значение для правильной интерпретации карт и моделей имеет понимание природы неопределенности, включенной в данные. К сожалению, методы пространственного анализа неоднородны по регионам или административным единицам, странам или континентам из-за различного характера собранных данных и метаданных [163]. Например, в стадии подготовки атласа гельминтозов Африки, Brooker с соавторами [164] отметили, что в то время как некоторые страны (Бурунди, Руанда и Уганда)

имеют всеобъемлющие общенациональные базы данных инфекционной заболеваемости населения, другие (Кения и Танзания) только регистрировали данные из густонаселенных районов.

Проблема пространственно меняющейся популяции [165] не ограничивается только развивающимися странами, но часто встречается и в странах с длинной историей исследований, агрегирования и сбора географических данных, их архивированием. Это вносит неопределенность, которую необходимо решать индивидуально, применяя сложные аналитические и вычислительные процедуры, особенно в случае, когда данные раннего пространственного анализа используются при подготовке моделей риска.

Другой источник неопределенности возникает из-за типа собираемых эпидемиологических данных. В исследованиях паразитозов, например, инфекцию в сообществе можно измерить либо по ее интенсивности, т. е. по количеству паразитов, обнаруженных в каждом инфицированном хозяине, либо по распространенности инфекции, которая предполагает долю инфицированных среди всех обследованных людей. Измерение интенсивности заражения ресурсоемкие, а потому лабораторное определение количества паразитов в образцах от человека-хозяина чаще всего используются в случаях запущенной заболеваемости, когда пациенты обратились за медицинской помощью. В исследованиях, направленных на определение пространственной закономерности заболевания, распространенность инфекции используется чаще всего. Однако распространенность может привести к ошибочной интерпретации, особенно когда население имеет небольшие размеры или неравномерное распределение населения по регионам. В таких случаях сложно отличить случайную изменчивость от реальных различий, которая может скрыть причины болезни [166]. С другой стороны, способ подсчета паразитов у инфицированных хозяев также приводит к вариативности, в зависимости от методов и протоколов, применяемых в разных лабораториях различных географических районах [167].

При работе с комбинированным использованием данных смешанного характера требуются многоуровневые статистические подходы [168, 169].

В целом же, источников неопределенности, характерных для анализа пространственно-распределенных данных, как и статистических подходов к их учету, множество.

Использование ГИС в отечественных исследованиях

В настоящее время применение геоинформационных технологий и пространственного анализа находит все более широкое применение при моделировании процессов и явлений в системах мониторинга различного назначения. В здравоохранении оно опирается на целый ряд областей знаний: медицинская и социально-экономическая география, география транспорта и геостатистика, обработка растровых изображений и многое другое. Медицинская ГИС предназначена для решения задач на различных масштабных уровнях: федеральном, региональном и муниципальном, что создает предпосылки для формирования различных сегментов геоинформационной системы [170]. В медико-географическом отношении функции ГИС сориентированы на работу с картографическими банками данных по демографической ситуации, условиям и уровню жизни, состоянию здоровья населения, сети учреждений здравоохранения, а также на автоматизацию исследований в данной сфере деятельности [12].

Использование ГИС-технологий позволяет отобразить на карте административные территории с высокими и низкими уровнями загрязнения атмосферного воздуха и воды хозяйственно-питьевого водоснабжения, провести комплексную оценку среды обитания и определить уровни риска здоровью населения [1].

Использование уникальных возможностей ГИС при работе с большим массивом данных, поступающих из разных информационных источников, взаимодействие с другими информационными системами (конвертация «на лету») дают возможность быстрого анализа и оценки пространственно-распределенных процессов, явлений и событий по единым методикам [171].

Геоинформационные технологии позволяют быстро оценивать ретроспективные данные об активности природных очагов зоонозов на любой территории, от окрестностей конкретного населенного пункта до масштабов области, сопоставлять их с оперативной информацией, анализировать и выработать организационно-управленческие решения по проведению профилактических мероприятий [172].

ГИС в эпидемиологическом надзоре за паразитарными болезнями обеспечивают сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных, которые могут быть применены для решения научных и прикладных задач: анализа, мониторинга, оценки, прогноза распространения паразитозов и поддержания санитарно-эпидемиологического благополучия населения на территории Российской Федерации [2]. Подтверждено, что ГИС позволяет значительно повысить оперативность всех этапов работы по мониторингу за паразитогами

на территории России, от ввода исходной информации, ее анализа и до планирования противоэпидемических мероприятий [173].

На территории Российской Федерации ведутся работы по разработке различных геоинформационных систем по инфекционным заболеваниям: бруцеллез, чума, туляремия, сибирской язве и др.

Так, в Ростовском-на-Дону противочумном институте разработана геоинформационная система «Единая система мониторинга эпидемиологических угроз. Модуль санитарная охрана» (Зарегистрирована в Роспатенте 13 декабря 2019 г. № 2019622360) для мониторинга заболеваемости особо опасными инфекциями [174].

Применение ГИС-технологий в системе надзора за сибирской язвой в настоящее время является неотъемлемым инструментом эпидемиологической диагностики и дает возможность установить динамику активности почвенных очагов, выдвинуть гипотезы о причинах и условиях развития эпизоотического и эпидемического процессов, а также ранжировать территории страны по степени потенциального эпизоотологического и эпидемиологического риска [175, 176].

В Ставропольском крае предложена методика использования программного продукта Arc GIS 10 в эпидемиологическом надзоре за бруцеллезом. С этой целью были разработаны две базы данных (Эпидемиология бруцеллеза в Ставропольском крае, Эпизоотология бруцеллеза в Ставропольском крае), совместимые с Arc GIS 10. Проведено районирование территории края по риску инфицирования бруцеллезом [177].

Для решения широкого спектра задач в области борьбы с антропоозоонозными цестодозами (на примере эхинококкоза) использована ведущая ГИС-платформа для создания картографических данных и управления ими – Auto CAD Map 3D [178].

При разработке технологии создания электронных карт распространения заболеваемости описторхозом людей с применением компьютерных ГИС, была определена совокупность эпидемиологических показателей, прежде всего, среднегодовалых показателей заболеваемости в разрезе областей по отношению к аналогичному среднереспубликанскому показателю [179].

Для оптимизации применения ГИС-технологий в анализе лептоспироза были использованы данные эпидемиологического и эпизоотологического исследования лептоспироза в Европе, Украине и Крыму [180].

Для оценки риска возможного расширения ареала аскаридоза на территории России, использована ГИС программа Health Mapper (версия 4.3), в которой были созданы индикаторы по геогельминтозам, необходимые для

географической привязки разработанной Базы данных: «Медицинские, социальные и природно-климатические аспекты аскаридоза», позволяющая анализировать социальные и природно-климатические параметры, определяющие возможности развития эпидемической ситуации по геогельминтозам (на примере аскаридоза) и определять границы ареала аскаридоза в России [181].

Нижегородским НИИ эпидемиологии и микробиологии имени академика И.Н. Блохиной (ННИИЭМ) совместно с Верхневолжским аэрогеодезическим предприятием создан и внедряется в практику работы органов Роспотребнадзора и здравоохранения электронный эпидемиологический атлас Приволжского федерального округа [182]. Электронный эпидемиологический атлас позволяет максимально визуализировать традиционную эпидемиологическую информацию в скрининговом и мониторинговом режимах с использованием информационных технологий. На электронных картах атласа легко оценить особенности и тенденции развития эпидемического процесса актуальных для территорий инфекций [183].

Учеными Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии им. П.А. Столыпина разработаны картографические модели зон циркуляции нематодозов, дан текущий и перспективный прогноз развития эпизоотической ситуации в популяциях крупного рогатого скота на территории Ульяновской области [184].

Для целей социально-гигиенического мониторинга в городе Москве разработана и внедрена «Автоматизированная информационная система для комплексного анализа, моделирования и отображения многофакторных пространственно-распределенных данных социально-гигиенического мониторинга на базе геоинформационных технологий» [1]. Интегрированная с персонифицированным банком данных инфекционных больных в Москве (АИС «ОРУИБ»), ГИС–СГМ обеспечивает представление на электронной карте оперативной информации по инфекционной заболеваемости с проведением анализа пространственно-распределенной информации.

Заключение

Геоинформационные системы являются современным аналитическим инструментом не только в проведении эпидемиологических обследований, картирования очагов инфекционных болезней и оперативного принятия управленческих решений, но и определяют границы ареалов с помощью изучения условий существования очагов инфекционных и паразитарных заболеваний.

Геоинформационные системы стали неотъемлемой частью исследований, проводимых в сфере эпидемиологического надзора за особо опасными и природноочаговыми инфекциями. Сделать ГИС эффективным инструментом, позволяющим оперативно получать нужные материалы, результаты моделирования и прогнозирования, а затем применять эти данные в практической работе, является одним из стратегических направлений совершенствования эпидемиологического надзора.

Географические информационные системы и технологии дистанционного зондирования все чаще используются для изучения пространственных и временных закономерностей паразитарных заболеваний. Эти технологии демонстрируют потенциал в качестве: 1. эффективного инструмента сбора, картирования и анализа данных для разработки атласов гельминтов; 2. среды для моделирования пространственного распределения инфекции относительно дистанционного зондирования и переменных окружающей среды, что способствует пониманию влияния факторов, не зависящих от плотности и эффективное прогнозирование рисков; (3) центрального инструмента в разработке программ борьбы с паразитами, учитывая их способности лучше определять эндемичные районы, предоставлять более точные оценки групп риска, составлять карты их распределения по отношению к медицинским учреждениям и облегчать стратификацию областей по вероятностям риска инфицирования. Все вышеперечисленное предполагает успешное использование географических информационных систем и технологий дистанционного зондирования в исследованиях пространственной эпидемиологии паразитарных заболеваний.

Список использованных источников

1. Домкин А. В., Скворцов С. А., Кузнецов А. С., Иваненко А. В., Волкова И. Ф., Волкова Н. А., Цыкин С. А. Использование геоинформационных систем при ведении социально-гигиенического мониторинга в Москве:// ГК "Центр пространственных исследований" 2011-2013. URL: http://gishealth.ru/?page_id=1570.

2. Морозова Л.Ф. Географические информационные системы в эпидемиологическом надзоре за паразитарными болезнями.: дис. на соискание уч. степени кандидата мед. наук: 03.02.11/ Морозова Люла Фармоновна. - М., 2015.-129 с.

3. Водопьянов А.С. ГИС «Холера-интернет» - использование современных интернет-технологий в эпидемиологической практике / А.С. Водопьянов, С.О. Водопьянов, Б.Н. Мишанькин, И.П. Олейников // ЗНиСО.- №012 (285).- С.36 – 39.

4. Basáñez M. G. Pfeiffer DU, Robinson TP, Stevenson M, Stevens KB, Rogers DJ, Clements ACA: Spatial Analysis in Epidemiology. – 2009.
5. (Белименко В.В., Самойловская Н.А., Новосад Е.В., Христиановский П.И. Риск-ориентированный мониторинг антропозоонозных цестодозов на основе геоинформационных систем // Российский паразитологический журнал. – М., 2016. – Т.38. – Вып.4. – С.)
6. Данилов А. Н., Филимонов Е. С., Куклев Е. В., Кутырев В. В. Анализ структуры и функциональных возможностей современных ГИС-технологий в эпидемиологии // Проблемы особо опасных инфекций. 2005. №1. С.19-20)
7. Raissi V. et al. Spatial analysis of *Toxocara* spp. eggs in soil as a potential for serious human infection // Comparative immunology, microbiology and infectious diseases. – 2021. – Т. 75. – С. 101619.
8. Stanton M. C. The role of spatial statistics in the control and elimination of neglected tropical diseases in sub-Saharan Africa: a focus on human African trypanosomiasis, schistosomiasis and lymphatic filariasis // Advances in parasitology. – 2017. – Т. 97. – С. 187-241.
9. Hay, S.I., Tatem, A.J., Graham, A.J., Goetz, S.J., Rogers, D.J., 2006. Global environmental data for mapping infectious disease distribution. Adv. Parasitol. 62, 37–77.
10. Robinson, T.P., 2000. Spatial statistics and geographical information systems in epidemiology and public health. Adv. Parasitol. 47, 81–128.
11. Глотов А.А. Медицинская геоинформатика. Как оценить здоровье региона. 2013. URL: https://www.cnews.ru/articles/meditsinskaya_geoinformatika_kak_otsenit.
12. Чистобаев А.И. Геоинформационные системы и технологии в медицинской географии / А. И. Чистобаев, З. А. Семенова // Вестник СПбГУ. – 2010. – Сер. 7. – № 1. – с. 53-61.
13. Xia S., Zhou X. N., Liu J. Systems thinking in combating infectious diseases // Infectious diseases of poverty. – 2017. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-7.
14. Kalluri S. et al. Surveillance of arthropod vector-borne infectious diseases using remote sensing techniques: a review // PLoS pathogens. – 2007. – Т. 3. – №. 10. – С. e116.
15. Chammartin F. et al. Modelling the geographical distribution of soil-transmitted helminth infections in Bolivia // Parasites & vectors. – 2013. – Т. 6. – №. 1. – С. 1-14.
16. Simoonga C. et al. Remote sensing, geographical information system and spatial analysis for schistosomiasis epidemiology and ecology in Africa // Parasitology. – 2009. – Т. 136. – №. 13. – С. 1683-1693.

17. Pleydell D. R. J. et al. Landscape composition and spatial prediction of alveolar echinococcosis in southern Ningxia, China //PLoS neglected tropical diseases. – 2008. – T. 2. – №. 9. – C. e287.
18. Walz Y. et al. Risk profiling of schistosomiasis using remote sensing: approaches, challenges and outlook //Parasites & vectors. – 2015. – T. 8. – №. 1. – C. 1-16.
19. Hamm N. A. S., Soares Magalhães R. J., Clements A. C. A. Earth observation, spatial data quality, and neglected tropical diseases //PLoS neglected tropical diseases. – 2015. – T. 9. – №. 12. – C. e0004164.
20. Beck L. R., Lobitz B. M., Wood B. L. Remote sensing and human health: new sensors and new opportunities //Emerging infectious diseases. – 2000. – T. 6. – №. 3. – C. 217.
21. Hay S. I. et al. Global environmental data for mapping infectious disease distribution //Advances in parasitology. – 2006. – T. 62. – C. 37-77.
22. Brooker S., Clements A. C. A., Bundy D. A. P. Global epidemiology, ecology and control of soil-transmitted helminth infections //Advances in parasitology. – 2006. – T. 62. – C. 221-261.
23. Assaré R. K. et al. The spatial distribution of *Schistosoma mansoni* infection in four regions of western Côte d'Ivoire //Geospatial health. – 2015. – T. 10. – №. 1.
24. Gomes E. C. S. et al. Schistosomiasis transmission and environmental change: a spatio-temporal analysis in Porto de Galinhas, Pernambuco-Brazil //International journal of health geographics. – 2012. – T. 11. – №. 1. – C. 1-11.
25. Guimarães R. J. P. S. et al. A geoprocessing approach for studying and controlling schistosomiasis in the state of Minas Gerais, Brazil //Memórias do Instituto Oswaldo Cruz. – 2010. – T. 105. – №. 4. – C. 524-531.
26. Guo J. G. et al. A geographic information and remote sensing based model for prediction of *Oncomelania hupensis* habitats in the Poyang Lake area, China //Acta Tropica. – 2005. – T. 96. – №. 2-3. – C. 213-222.
27. Hu Y. et al. Spatio-temporal transmission and environmental determinants of schistosomiasis japonica in anhui province, china //PLoS Neglected Tropical Diseases. – 2015. – T. 9. – №. 2. – C. e0003470.
28. Manyangadze T. et al. Application of geo-spatial technology in schistosomiasis modelling in Africa: a review //Geospatial health. – 2015. – T. 10. – №. 2.
29. Simoonga C. et al. Remote sensing, geographical information system and spatial analysis for schistosomiasis epidemiology and ecology in Africa //Parasitology. – 2009. – T. 136. – №. 13. – C. 1683-1693.

30. Spear R. C. et al. Disease transmission models for public health decision making: toward an approach for designing intervention strategies for *Schistosomiasis japonica* //Environmental health perspectives. – 2002. – T. 110. – №. 9. – C. 907-915.
31. Spear R. C. et al. Factors influencing the transmission of *Schistosoma japonicum* in the mountains of Sichuan Province of China //The American journal of tropical medicine and hygiene. – 2004. – T. 70. – №. 1. – C. 48-56.
32. Walz Y. et al. Risk profiling of schistosomiasis using remote sensing: approaches, challenges and outlook //Parasites & vectors. – 2015. – T. 8. – №. 1. – C. 1-16.
33. Walz Y. et al. Modeling and validation of environmental suitability for schistosomiasis transmission using remote sensing //PLoS neglected tropical diseases. – 2015. – T. 9. – №. 11. – C. e0004217.
34. Walz Y. et al. Use of an ecologically relevant modelling approach to improve remote sensing-based schistosomiasis risk profiling //Geospatial health. – 2015. – T. 10. – №. 2.
35. Wang Y., Zhuang D. A rapid monitoring and evaluation method of schistosomiasis based on spatial information technology //International journal of environmental research and public health. – 2015. – T. 12. – №. 12. – C. 15843-15859.
36. Yang G. J. et al. Remote sensing for predicting potential habitats of *Oncomelania hupensis* in Hongze, Baima and Gaoyou lakes in Jiangsu province, China //Geospatial Health. – 2006. – T. 1. – №. 1. – C. 85-92.
37. Yang G. J. et al. A review of geographic information system and remote sensing with applications to the epidemiology and control of schistosomiasis in China //Acta tropica. – 2005. – T. 96. – №. 2-3. – C. 117-129.
38. Zhang Z. et al. Identification of parasite-host habitats in Anxiang county, Hunan Province, China based on multi-temporal China-Brazil earth resources satellite (CBERS) images //PLoS One. – 2013. – T. 8. – №. 7. – C. e69447.
39. Zhu H. R. et al. Ecological model to predict potential habitats of *Oncomelania hupensis*, the intermediate host of *Schistosoma japonicum* in the mountainous regions, China //PLoS neglected tropical diseases. – 2015. – T. 9. – №. 8. – C. e0004028.
40. Scholte R. G. C. et al. Spatial analysis and risk mapping of soil-transmitted helminth infections in Brazil, using Bayesian geostatistical models //Geospatial Health. – 2013. – T. 8. – №. 1. – C. 97-110.
41. Lai Y. S. et al. Bayesian geostatistical modelling of soil-transmitted helminth survey data in the People's Republic of China //Parasites & Vectors. – 2013. – T. 6. – №. 1. – C. 1-16.

42. Brooker S. et al. Use of remote sensing and a geographical information system in a national helminth control programme in Chad //Bulletin of the World Health Organization. – 2002. – T. 80. – C. 783-789.
43. Brooker S., Michael E. The potential of geographical information systems and remote sensing in the epidemiology and control of human helminth infections //Advances in parasitology. – 2000. – T. 47. – C. 245-288.
44. Jacob B. G. et al. Validation of a remote sensing model to identify *Simulium damnosum* breeding sites in sub-Saharan Africa //PLoS neglected tropical diseases. – 2013. – T. 7. – №. 7. – C. e2342.
45. Wang Y. C., Feng C. C., Sithithaworn P. Environmental determinants of *Opisthorchis viverrini* prevalence in northeast Thailand //Geospatial Health. – 2013. – T. 8. – №. 1. – C. 111-123.
46. Hay S. I., Snow R. W., Rogers D. J. From predicting mosquito habitat to malaria seasons using remotely sensed data: practice, problems and perspectives //Parasitology Today. – 1998. – T. 14. – №. 8. – C. 306-313.
47. Thomson M. C. et al. Mapping malaria risk in Africa: What can satellite data contribute? //Parasitology Today. – 1997. – T. 13. – №. 8. – C. 313-318.
48. Rogers D. J. et al. Satellite imagery in the study and forecast of malaria //Nature. – 2002. – T. 415. – №. 6872. – C. 710-715.
49. Smith M. W. et al. Incorporating hydrology into climate suitability models changes projections of malaria transmission in Africa //Nature communications. – 2020. – T. 11. – №. 1. – C. 1-9.
50. Mordecai E. A. et al. Thermal biology of mosquito-borne disease //Ecology letters. – 2019. – T. 22. – №. 10. – C. 1690-1708.
51. Stresman G. H. Beyond temperature and precipitation: ecological risk factors that modify malaria transmission //Acta tropica. – 2010. – T. 116. – №. 3. – C. 167-172.
52. Thomson M. C. et al. Mapping malaria risk in Africa: What can satellite data contribute? //Parasitology Today. – 1997. – T. 13. – №. 8. – C. 313-318.
53. Adigun A. B. et al. Malaria risk in Nigeria: Bayesian geostatistical modelling of 2010 malaria indicator survey data //Malaria journal. – 2015. – T. 14. – №. 1. – C. 1-8.
54. Alegana V. A. et al. Advances in mapping malaria for elimination: fine resolution modelling of *Plasmodium falciparum* incidence //Scientific reports. – 2016. – T. 6. – №. 1. – C. 1-14.
55. Davis J. K. et al. A genetic algorithm for identifying spatially-varying environmental drivers in a malaria time series model //Environmental Modelling & Software. – 2019. – T. 119. – C. 275-284.

56. Sewe M. O. et al. Using remote sensing environmental data to forecast malaria incidence at a rural district hospital in Western Kenya //Scientific reports. – 2017. – T. 7. – №. 1. – C. 1-10.

57. Bhatt S. et al. The effect of malaria control on Plasmodium falciparum in Africa between 2000 and 2015 //Nature. – 2015. – T. 526. – №. 7572. – C. 207-211.

58. Weiss D. J. et al. Re-examining environmental correlates of Plasmodium falciparum malaria endemicity: a data-intensive variable selection approach //Malaria journal. – 2015. – T. 14. – №. 1. – C. 1-18.

59. Gunderson A. K. et al. Malaria transmission and spillover across the Peru–Ecuador border: a spatiotemporal analysis //International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – T. 17. – №. 20. – C. 7434.

60. Ijumba J. N., Lindsay S. W. Impact of irrigation on malaria in Africa: paddies paradox //Medical and veterinary entomology. – 2001. – T. 15. – №. 1. – C. 1-11.

61. Santos-Vega M. et al. Population density, climate variables and poverty synergistically structure spatial risk in urban malaria in India //PLoS neglected tropical diseases. – 2016. – T. 10. – №. 12. – C. e0005155.

62. Hay S. I. et al. Urbanization, malaria transmission and disease burden in Africa //Nature Reviews Microbiology. – 2005. – T. 3. – №. 1. – C. 81-90.

63. Kar N. P. et al. A review of malaria transmission dynamics in forest ecosystems //Parasites & vectors. – 2014. – T. 7. – №. 1. – C. 1-12.

64. Vittor A. Y. et al. Linking deforestation to malaria in the Amazon: characterization of the breeding habitat of the principal malaria vector, Anopheles darlingi //The American journal of tropical medicine and hygiene. – 2009. – T. 81. – №. 1. – C. 5.

65. Afrane Y. A. et al. Deforestation and vectorial capacity of Anopheles gambiae Giles mosquitoes in malaria transmission, Kenya //Emerging infectious diseases. – 2008. – T. 14. – №. 10. – C. 1533.

66. Shah H. et al. Agricultural land use and infectious disease risks in southeast Asia: a systematic review and meta analyses //The Lancet Planetary Health. – 2018. – T. 2. – C. S20.

67. Hoffman-Hall A. et al. Mapping remote rural settlements at 30 m spatial resolution using geospatial data-fusion //Remote Sensing of Environment. – 2019. – T. 233. – C. 111386.

68. Midekisa A., Senay G. B., Wimberly M. C. Multisensor earth observations to characterize wetlands and malaria epidemiology in Ethiopia //Water resources research. – 2014. – T. 50. – №. 11. – C. 8791-8806.

69. Cohen J. M. et al. Rapid case-based mapping of seasonal malaria transmission risk for strategic elimination planning in Swaziland //Malaria journal. – 2013. – T. 12. – №. 1. – C. 1-12.
70. de Oliveira E. C. et al. Geographic information systems and logistic regression for high-resolution malaria risk mapping in a rural settlement of the southern Brazilian Amazon //Malaria journal. – 2013. – T. 12. – №. 1. – C. 1-9.
71. Bui Q. T. et al. Understanding spatial variations of malaria in Vietnam using remotely sensed data integrated into GIS and machine learning classifiers //Geocarto International. – 2019. – T. 34. – №. 12. – C. 1300-1314.
72. Rakotoarison H. A. et al. Remote sensing and multi-criteria evaluation for malaria risk mapping to support indoor residual spraying prioritization in the central highlands of Madagascar //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 10. – C. 1585.
73. Adeola A. M. et al. Landsat satellite derived environmental metric for mapping mosquitoes breeding habitats in the Nkomazi municipality, Mpumalanga Province, South Africa //South African Geographical Journal. – 2017. – T. 99. – №. 1. – C. 14-28.
74. Hardy A., Oakes G., Ettritch G. Tropical wetland (TropWet) mapping tool: the automatic detection of open and vegetated waterbodies in Google Earth engine for tropical wetlands //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 7. – C. 1182.
75. Wulder M. A. et al. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat //Remote Sensing of Environment. – 2012. – T. 122. – C. 2-10.
76. Hansen M. C. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change //science. – 2013. – T. 342. – №. 6160. – C. 850-853.
77. Brock P. M. et al. Predictive analysis across spatial scales links zoonotic malaria to deforestation //Proceedings of the Royal Society B. – 2019. – T. 286. – №. 1894. – C. 20182351.
78. Chaves L. S. M. et al. Abundance of impacted forest patches less than 5 km² is a key driver of the incidence of malaria in Amazonian Brazil //Scientific reports. – 2018. – T. 8. – №. 1. – C. 1-11.
79. Hahn M. B. et al. Influence of deforestation, logging, and fire on malaria in the Brazilian Amazon //PloS one. – 2014. – T. 9. – №. 1. – C. e85725.
80. Frake A. N. et al. Leveraging big data for public health: Mapping malaria vector suitability in Malawi with Google Earth Engine //Plos one. – 2020. – T. 15. – №. 8. – C. e0235697.
81. Larsen D. A. et al. Leveraging risk maps of malaria vector abundance to guide control efforts reduces malaria incidence in Eastern Province, Zambia //Scientific reports. – 2020. – T. 10. – №. 1. – C. 1-12.

82. Guillevic P. C. et al. Validation of Land Surface Temperature products derived from the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) using ground-based and heritage satellite measurements //Remote Sensing of Environment. – 2014. – T. 154. – C. 19-37.
83. Skakun S. et al. Transitioning from MODIS to VIIRS: an analysis of inter-consistency of NDVI data sets for agricultural monitoring //International journal of remote sensing. – 2018. – T. 39. – №. 4. – C. 971-992.
84. Bridges D. J. et al. Accuracy and impact of spatial aids based upon satellite enumeration to improve indoor residual spraying spatial coverage //Malaria journal. – 2018. – T. 17. – №. 1. – C. 1-8.
85. García G. A. et al. Mapping and enumerating houses and households to support malaria control interventions on Bioko Island //Malaria journal. – 2019. – T. 18. – №. 1. – C. 1-10.
86. Shields T. et al. Spatial and temporal changes in household structure locations using high-resolution satellite imagery for population assessment: an analysis of household locations in southern Zambia between 2006 and 2011 //Geospatial health. – 2016. – T. 11. – №. 2. – C. 410.
87. Kabaria C. W. et al. Mapping intra-urban malaria risk using high resolution satellite imagery: a case study of Dar es Salaam //International journal of health geographics. – 2016. – T. 15. – №. 1. – C. 1-12.
88. Valle D. et al. Abundance of water bodies is critical to guide mosquito larval control interventions and predict risk of mosquito-borne diseases //Parasites & vectors. – 2013. – T. 6. – №. 1. – C. 1-2.
89. Malarvizhi K., Kumar S. V., Porchelvan P. Use of high resolution Google Earth satellite imagery in landuse map preparation for urban related applications //Procedia Technology. – 2016. – T. 24. – C. 1835-1842.
90. Ricotta E. E. et al. Evaluating local vegetation cover as a risk factor for malaria transmission: a new analytical approach using ImageJ //Malaria journal. – 2014. – T. 13. – №. 1. – C. 1-7.
91. Xie C. et al. A novel water index for urban high-resolution eight-band WorldView-2 imagery //International journal of digital earth. – 2016. – T. 9. – №. 10. – C. 925-941.
92. Nouri H. et al. High spatial resolution WorldView-2 imagery for mapping NDVI and its relationship to temporal urban landscape evapotranspiration factors //Remote sensing. – 2014. – T. 6. – №. 1. – C. 580-602.
93. Belgiu M., Drăguț L. Comparing supervised and unsupervised multiresolution segmentation approaches for extracting buildings from very high resolution imagery //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – T. 96. – C. 67-75.

94. Qian Y. et al. Comparing machine learning classifiers for object-based land cover classification using very high resolution imagery //Remote Sensing. – 2015. – T. 7. – №. 1. – C. 153-168.
95. Shi Y. et al. Partial least square discriminant analysis based on normalized two-stage vegetation indices for mapping damage from rice diseases using PlanetScope datasets //Sensors. – 2018. – T. 18. – №. 6. – C. 1901.
96. Mishra V. et al. Evaluating the performance of high-resolution satellite imagery in detecting ephemeral water bodies over West Africa //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2020. – T. 93. – C. 102218.
97. Yang X. et al. Urban surface water body detection with suppressed built-up noise based on water indices from Sentinel-2 MSI imagery //Remote sensing of environment. – 2018. – T. 219. – C. 259-270.
98. Malahlela O. E. et al. Integrating geostatistics and remote sensing for mapping the spatial distribution of cattle hoofprints in relation to malaria vector control //International Journal of Remote Sensing. – 2019. – T. 40. – №. 15. – C. 5917-5937.
99. Diuk-Wasser M. A. et al. Patterns of irrigated rice growth and malaria vector breeding in Mali using multi-temporal ERS-2 synthetic aperture radar //International journal of remote sensing. – 2006. – T. 27. – №. 3. – C. 535-548.
100. Olson S. H. et al. Links between climate, malaria, and wetlands in the Amazon Basin //Emerging infectious diseases. – 2009. – T. 15. – №. 4. – C. 659.
101. Hardy A. et al. Automatic detection of open and vegetated water bodies using Sentinel 1 to map African malaria vector mosquito breeding habitats //Remote Sensing. – 2019. – T. 11. – №. 5. – C. 593.
102. Catry T. et al. Wetlands and malaria in the Amazon: Guidelines for the use of synthetic aperture radar remote-sensing //International journal of environmental research and public health. – 2018. – T. 15. – №. 3. – C. 468.
103. Flores-Anderson A. I. et al. The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation //SERVIR Global Science Coordination Office. – 2019. – C. 307.
104. McNally A. et al. Evaluating ESA CCI soil moisture in East Africa //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2016. – T. 48. – C. 96-109.
105. Du J. et al. A global satellite environmental data record derived from AMSR-E and AMSR2 microwave Earth observations //Earth System Science Data. – 2017. – T. 9. – №. 2. – C. 791-808.

106. Chuang T. W. et al. Satellite microwave remote sensing for environmental modeling of mosquito population dynamics //Remote sensing of environment. – 2012. – T. 125. – C. 147-156.

107. Carrasco-Escobar G. et al. High-accuracy detection of malaria vector larval habitats using drone-based multispectral imagery //PLoS neglected tropical diseases. – 2019. – T. 13. – №. 1. – C. e0007105.

108. Thomas S. et al. Microclimate variables of the ambient environment deliver the actual estimates of the extrinsic incubation period of Plasmodium vivax and Plasmodium falciparum: a study from a malaria-endemic urban setting, Chennai in India //Malaria journal. – 2018. – T. 17. – №. 1. – C. 1-17.

109. Hast M. et al. The use of GPS data loggers to describe the impact of spatio-temporal movement patterns on malaria control in a high-transmission area of northern Zambia //International journal of health geographics. – 2019. – T. 18. – №. 1. – C. 1-18.

110. Liu Y. et al. Software to facilitate remote sensing data access for disease early warning systems //Environmental Modelling & Software. – 2015. – T. 74. – C. 247-257.

111. Acker J. et al. Use of the NASA Giovanni data system for geospatial public health research: example of weather-influenza connection //ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2014. – T. 3. – №. 4. – C. 1372-1386.

112. Ceccato P. et al. Data and tools to integrate climate and environmental information into public health //Infectious diseases of poverty. – 2018. – T. 7. – №. 1. – C. 1-11.

113. Potapov P. et al. Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 3. – C. 426.

114. Dwyer J. L. et al. Analysis ready data: enabling analysis of the Landsat archive //Remote Sensing. – 2018. – T. 10. – №. 9. – C. 1363.

115. Tatem A. J. WorldPop, open data for spatial demography //Scientific data. – 2017. – T. 4. – №. 1. – C. 1-4.

116. Gong P. et al. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018 //Remote Sensing of Environment. – 2020. – T. 236. – C. 111510.

117. Funk C. et al. A high-resolution 1983–2016 T max climate data record based on infrared temperatures and stations by the Climate Hazard Center //Journal of Climate. – 2019. – T. 32. – №. 17. – C. 5639-5658.

118. Funk C. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes //Scientific data. – 2015. – T. 2. – №. 1. – C. 1-21.

119. Gorelick N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone //Remote sensing of Environment. – 2017. – T. 202. – C. 18-27.

120. Tamiminia H. et al. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – T. 164. – C. 152-170.

121. Hardy A., Oakes G., Ettritch G. Tropical wetland (TropWet) mapping tool: the automatic detection of open and vegetated waterbodies in Google Earth engine for tropical wetlands //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 7. – C. 1182.

122. Gomes V. C. F., Queiroz G. R., Ferreira K. R. An overview of platforms for big earth observation data management and analysis //Remote Sensing. – 2020. – T. 12. – №. 8. – C. 1253.

123. Merkord C. L. et al. Integrating malaria surveillance with climate data for outbreak detection and forecasting: the EPIDEMIA system //Malaria journal. – 2017. – T. 16. – №. 1. – C. 1-15.

124. Guerra C. A., Snow R. W., Hay S. I. Mapping the global extent of malaria in 2005 //Trends in parasitology. – 2006. – T. 22. – №. 8. – C. 353-358.

125. Oesterholt M. et al. Spatial and temporal variation in malaria transmission in a low endemicity area in northern Tanzania //Malaria Journal. – 2006. – T. 5. – №. 1. – C. 1-7.

126. Saxena R. et al. A spatial statistical approach to analyze malaria situation at micro level for priority control in Ranchi district, Jharkhand //The Indian journal of medical research. – 2012. – T. 136. – №. 5. – C. 776.

127. Bautista C. T. et al. Epidemiology and spatial analysis of malaria in the Northern Peruvian Amazon //The American journal of tropical medicine and hygiene. – 2006. – T. 75. – №. 6. – C. 1216-1222.

128. Reid H. et al. Mapping malaria risk in Bangladesh using Bayesian geostatistical models //The American journal of tropical medicine and hygiene. – 2010. – T. 83. – №. 4. – C. 861.

129. Caprarelli G., Fletcher S. A brief review of spatial analysis concepts and tools used for mapping, containment and risk modelling of infectious diseases and other illnesses //Parasitology. – 2014. – T. 141. – №. 5. – C. 581-601.

130. Gwitira I. et al. Application of GIS to predict malaria hotspots based on Anopheles arabiensis habitat suitability in Southern Africa //International journal of applied earth observation and geoinformation. – 2018. – T. 64. – C. 12-21.

131. Alimi T. O. et al. Predicting potential ranges of primary malaria vectors and malaria in northern South America based on projected changes in climate, land cover and human population //Parasites & vectors. – 2015. – T. 8. – №. 1. – C. 1-16.

132. Elith J., Leathwick J. R. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time //Annual review of ecology, evolution, and systematics. – 2009. – T. 40. – C. 677-697.
133. Syfert M. M., Smith M. J., Coomes D. A. The effects of sampling bias and model complexity on the predictive performance of MaxEnt species distribution models //PloS one. – 2013. – T. 8. – №. 2. – C. e55158.
134. Phillips S. J., Dudík M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation //Ecography. – 2008. – T. 31. – №. 2. – C. 161-175.
135. . Kaewwaen W., Bhumiratana A. Landscape ecology and epidemiology of malaria associated with rubber plantations in Thailand: integrated approaches to malaria ecotoping //Interdisciplinary perspectives on infectious diseases. – 2015. – T. 2015.
136. Salahi-Moghaddam A. et al. Spatial changes in the distribution of malaria vectors during the past 5 decades in Iran //Acta tropica. – 2017. – T. 166. – C. 45-53.
137. Fèvre E. M. et al. Human African trypanosomiasis: epidemiology and control //Advances in parasitology. – 2006. – T. 61. – C. 167-221.
138. Rogers D. J. Satellites, space, time and the African trypanosomiasis //Advances in parasitology. – 2000. – T. 47. – C. 129-171.
139. Franco J. R. et al. Epidemiology of human African trypanosomiasis //Clinical epidemiology. – 2014. – T. 6. – C. 257.
140. Batchelor N. A. et al. Spatial predictions of Rhodesian Human African Trypanosomiasis (sleeping sickness) prevalence in Kaberamaido and Dokolo, two newly affected districts of Uganda //PLoS neglected tropical diseases. – 2009. – T. 3. – №. 12. – C. e563.
141. Wardrop N. A. et al. Bayesian geostatistical analysis and prediction of Rhodesian human African trypanosomiasis //PLoS Neglected Tropical Diseases. – 2010. – T. 4. – №. 12. – C. e914.
142. Matawa F., Murwira K. S., Shereni W. Modelling the distribution of suitable *Glossina* spp. habitat in the north western parts of Zimbabwe using remote sensing and climate data //Geoinform Geostast Overv. – 2013. – C. 1-9.
143. Dicko A. H. et al. Using species distribution models to optimize vector control in the framework of the tsetse eradication campaign in Senegal //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2014. – T. 111. – №. 28. – C. 10149-10154.
144. Simarro P. P. et al. Risk for human African trypanosomiasis, Central Africa, 2000–2009 //Emerging infectious diseases. – 2011. – T. 17. – №. 12. – C. 2322.

145. Simarro P. P. et al. The Atlas of human African trypanosomiasis: a contribution to global mapping of neglected tropical diseases //International journal of health geographics. – 2010. – T. 9. – №. 1. – C. 1-18.
146. Fenwick A., Rollinson D., Southgate V. Implementation of human schistosomiasis control: challenges and prospects //Advances in parasitology. – 2006. – T. 61. – C. 567-622.;
147. Colley D. G. et al. Human schistosomiasis //The Lancet. – 2014. – T. 383. – №. 9936. – C. 2253-2264.
148. Lai Y. S. et al. Spatial distribution of schistosomiasis and treatment needs in sub-Saharan Africa: a systematic review and geostatistical analysis //The Lancet infectious diseases. – 2015. – T. 15. – №. 8. – C. 927-940.
- 149/ Manyangadze T. et al. Application of geo-spatial technology in schistosomiasis modelling in Africa: a review //Geospatial health. – 2015. – T. 10. – №. 2.
150. Simoonga C. et al. Remote sensing, geographical information system and spatial analysis for schistosomiasis epidemiology and ecology in Africa //Parasitology. – 2009. – T. 136. – №. 13. – C. 1683-1693.
151. Slater H., Michael E. Mapping, Bayesian geostatistical analysis and spatial prediction of lymphatic filariasis prevalence in Africa //PloS one. – 2013. – T. 8. – №. 8. – C. e71574.
152. Cano J. et al. The global distribution and transmission limits of lymphatic filariasis: past and present //Parasites & vectors. – 2014. – T. 7. – №. 1. – C. 1-19.
153. Moraga P. et al. Modelling the distribution and transmission intensity of lymphatic filariasis in sub-Saharan Africa prior to scaling up interventions: integrated use of geostatistical and mathematical modelling //Parasites & vectors. – 2015. – T. 8. – №. 1. – C. 1-16.
154. Simonsen P. E., Mwakitalu M. E. Urban lymphatic filariasis //Parasitology research. – 2013. – T. 112. – №. 1. – C. 35-44.
155. Gyapong J. O. et al. The use of spatial analysis in mapping the distribution of bancroftian filariasis in four West African countries //Annals of Tropical Medicine & Parasitology. – 2002. – T. 96. – №. 7. – C. 695-705.
156. Slater H., Michael E. Predicting the current and future potential distributions of lymphatic filariasis in Africa using maximum entropy ecological niche modelling //PloS one. – 2012. – T. 7. – №. 2. – C. e32202.
157. Slater H., Michael E. Mapping, Bayesian geostatistical analysis and spatial prediction of lymphatic filariasis prevalence in Africa //PloS one. – 2013. – T. 8. – №. 8. – C. e71574. Stanton M. C. et al. Baseline drivers of lymphatic filariasis in Burkina Faso //Geospatial health. – 2013. – T. 8. – №. 1. – C. 159-173.

158. Mwase E. T. et al. Mapping the geographical distribution of lymphatic filariasis in Zambia // *PLoS neglected tropical diseases*. – 2014. – Т. 8. – №. 2. – С. e2714.
159. De'Ath G. Boosted trees for ecological modeling and prediction // *Ecology*. – 2007. – Т. 88. – №. 1. – С. 243-251.
160. Sinka M. E. et al. The dominant Anopheles vectors of human malaria in Africa, Europe and the Middle East: occurrence data, distribution maps and bionomic précis // *Parasites & vectors*. – 2010. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-34.
161. Moraga P. et al. Modelling the distribution and transmission intensity of lymphatic filariasis in sub-Saharan Africa prior to scaling up interventions: integrated use of geostatistical and mathematical modelling // *Parasites & vectors*. – 2015. – Т. 8. – №. 1. – С. 1-16.
162. Caprarelli G., Fletcher S. A brief review of spatial analysis concepts and tools used for mapping, containment and risk modelling of infectious diseases and other illnesses // *Parasitology*. – 2014. – Т. 141. – №. 5. – С. 581-601.
163. Brooker S. et al. Rapid mapping of schistosomiasis and other neglected tropical diseases in the context of integrated control programmes in Africa // *Parasitology*. – 2009. – Т. 136. – №. 13. – С. 1707-1718.
164. Brooker S. et al. An updated atlas of human helminth infections: the example of East Africa // *International journal of health geographics*. – 2009. – Т. 8. – №. 1. – С. 1-11.
165. Goovaerts P. Geostatistical analysis of disease data: estimation of cancer mortality risk from empirical frequencies using Poisson kriging // *International Journal of Health Geographics*. – 2005. – Т. 4. – №. 1. – С. 1-33.
166. Sun D. et al. Spatio-temporal interaction with disease mapping // *Statistics in medicine*. – 2000. – Т. 19. – №. 15. – С. 2015-2035.
167. Hall, A. and Holland, C. (2000). Geographical variation in *Ascaris lumbricoides* fecundity and its implications for helminth control. *Parasitology Today* 16, 540–544.
168. Jackson, C., Best, N. and Richardson, S. (2008). Hierarchical related regression for combining aggregate and individual data in studies of socioeconomic disease risk factors. *Journal of the Royal Statistical Society A* 171, 159–178.
169. Wakefield, J. (2009). Multi-level modelling, the ecologic fallacy, and hybrid study designs. *International Journal of Epidemiology* 38, 330. doi: 10.1093/ije/dyp179.
170. Глотов А.А. Медицинская геоинформатика. Как оценить здоровье региона. 2013. URL: https://www.cnews.ru/articles/meditsinskaya_geoinformatika_kak_otsenit.

171. Дубянский В.М. Совершенствование эпидемиологического надзора за инфекционными болезнями с использованием геоинформационных систем/ В.М. Дубянский, А.Н. Куличенко, О.В. Семенко, О.В. Малецкая, В.М. Мезенцев //Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии.- 2014.-№1.- С. 85-91.

172. Ефимов Е.И. Использование геоинформационных технологий в практике противоэпидемической работы/Е.И. Ефимов, В.И. Ершов, Г.Н. Никитин // Инфекция и иммунитет. 2012. – Т.2.-№1-2. –С. 81-82. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-geoinformatsionnyh-tehnologiy-v-praktike-protivoepidemicheskoy-raboty>.

173. Гузеева, Т. М. Оптимизация эпидемиологического надзора за биогельминтозами.: дис. на соискание уч. степени доктора мед. наук: 03.02.11, 14.02.02/ Гузеева Татьяна Михайловна.- Москва,2012.-234 с.

174. Воловикова С.В. Использование ГИС-технологий для мониторинга заболеваемости особо опасными инфекциями/ С.В. Воловикова, С.И. Стенина, С.Ю. Водяницкая, А.С. Водопьянов //Материалы XII Ежегодного Всероссийского интернет-конгресса по инфекционным болезням с международным участием.- 2020. -С.49-50.

175. Симонова Е.Г. Применение геоинформационных технологий для оценки эпизоотологической и эпидемиологической ситуации по сибирской язве/ Е.Г. Симонов, А.А. Шабейкин, С.Р. Раичич, М.Н. Локтионова, С.А. Сабурова, М.А. Патяшина и др. // Анализ риска здоровью.- Пермь.-2019.-№ 3.-С. 74-82.

176. Лукьяненко Н. В. Методологический подход использования ГИС-технологий в эпиднадзоре за сибирской язвой на территории Алтайского края и республики Алтай / Н.В. Лукьяненко, Г.Х. Базарова, Т.В. Сафьянова, В.В. Шевченко, С.В. Широкоступ и др. // Медицинский альманах.-2016.-№3(43).- С.103-108.

177. Манин Е.А. Совершенствование эпидемиологического надзора за бруцеллезом с использованием ГИС-технологий/ Е.А. Манин, Г.И. Лямкин, Н.И. Тихенко, Д.В. Русанова, А.Д. Антоненко и др. //Проблемы особо опасных инфекций. – С.,2012.-№114.-С.26-28.

178. Белименко В.В. Риск - ориентированный мониторинг антропоозоозных цестодозов на основе геоинформационных систем/ В.В. Белименко, Н.А. Самойловская, Е.В. Новосад, П.И. Христиановский // Российский паразитологический журнал. – М., 2016 – Т.38. – Вып.4. – С.

179. Сыздыков М.М. Адаптация географических информационных технологий к нуждам эпидемиологического надзора за описторхозом/ М.М. Сыздыков, А.Н. Кузнецов, А.С. Кусаинова, Б.Н. Кошера //Казахский

научный центр карантинных и зоонозных инфекций имени Масгута Айкимбаева, Алматы.

180. Павленко А.Л. Методологический подход использования ГИС - технологии в эпиднадзоре на примере лептоспироза/ А.Л. Павленко, И.С. Коваленко, А.Б. Хайтович //Проблемы особо опасных инфекций,. – 2014. – №2. – С. 62-65.

181. Турбабина Н. А. Оценка влияния климатических факторов на риск заражения аскаридозом в России.: автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата мед.наук: 03.02.11/ Турбабина Наталья Александровна. – Москва,2019. – 24 с.

182. Манин Е.А. Совершенствование эпидемиологического надзора за бруцеллезом с использованием ГИС-технологий/ Е.А. Манин, Г.И. Лямкин, Н.И. Тихенко, Д.В. Русанова., А.Д. Антоненко, Г.Д. Брюханова //Проблемы особо опасных инфекций.м2012. – № 114. – С.26-28.

183. Ефимов, Е.И. Использование геоинформационных технологий в практике противоэпидемической работы / Е.И. Ефимов, В.И. Ершов, П.Н. Никитин//Инфекция и иммунитет. – 2012. – Т.2. – №1-2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-geoinformatsionnyh-tehnologiy-v-praktike-protivoepidemicheskoy-raboty> (дата обращения: 30.03.2021).

184. Романова Е.М. ГИС - мониторинг нематодозов крупного рогатого скота на территории ульяновской области/ Е.М. Романова, Т.Г. Баева, В.В. Романов, Т.М. Шленкина //Материалы международной научно-практической конференции. – Ульяновск, 2015. – С. 80-83.