

## Отзыв

председателя диссертационного совета на диссертацию Ндиайе Серинь Моду на тему «Математическое и теоретико-игровое моделирование распространения малярии при отсутствии и наличии вакцинации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности  
1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

**Актуальность темы исследования.** Диссертация посвящена теоретическому анализу математических моделей развития заболеваемости населения малярией и практической применимости этих моделей к построению прогнозов дальнейшего развития заболеваемости. Подобная проблема очень важна и актуальна для стран, находящихся в эндемичных по малярии регионах — экваториальных и субэкваториальных зонах. В диссертации математически обосновывается эффективность вакцинации против малярии как в одной популяции человека, так и в двух взаимосвязанных популяциях — человека и комара. Представленное в работе моделирование распространения заболевания демонстрирует то, как широта охвата вакцинацией населения влияет на скорость распространения малярийного паразита. В работе также исследуется взаимодействие производителей вакцин на рынке и те эффекты, к которым может приводить объединений некоторых производителей в коалиции. Это позволяет не только оценить эффективности стратегий участников рынка, но и проанализировать конечную для населения стоимость вакцины при различных сценариях кооперации производителей.

**Научная новизна.** Диссертация содержит новые результаты, представляющие научный интерес для исследователей в области математического моделирования эпидемий, поиска положений равновесия и их анализа на предмет устойчивости, а также в части теоретико-игрового моделирования взаимодействия производителей вакцин. В частности, предложены обобщенные модели распространения заболеваний, которые адаптированы к распространению малярии, учитывая не только специфику самого заболевания, но и возможность проведения вакцинации среди населения. В диссертации предложена модель развития малярии сразу в двух популяциях — человека и комара. Математическое моделирование распространения малярии проводится также с применением стохастической балансовой модели. Исследованы вопросы объединения конкурирующих производителей вакцин в коалиции, устойчивости подобных конфигураций и их влияния на конечную стоимость вакцин для населения.

**Степень достоверности.** Изложенные в диссертации теоретические результаты приводятся с полными и строгими доказательствами. Основные результаты опубликованы в профильных научных журналах, в частности, «Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления», «Математическая теория игр и ее приложения», Contributions to Game Theory and Management. Основные результаты диссертации были представлены на международных научных конференциях 16th International Conference on Game Theory and Management (GTM2023), «Процессы управления и устойчивость» (CPS'22, CPS'21).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Диссертация вносит вклад в понимание процесса распространения малярии в незамкнутой популяции и эффекта противомалярийных мероприятий по вакцинации населения на динамику заболеваемости. Особую ценность работы составляют эпидемические модели двух взаимосвязанных популяций —

человека и комара. Использование статистической информации по заболеваемости в Сенегале для валидации предложенных моделей, а также для построения прогнозов развития процесса и их высокая точность лишь подтверждают правильную спецификацию моделей и общую практическую значимость исследования. Показанная в теоретических моделях эффективность вакцинации населения при борьбе с распространением малярии стала основанием для теоретико-игрового анализа рынка производителей вакцин. Применительно к рассматриваемой области изучена возможность кооперации ряда производителей, найдены их устойчивые объединения и установлен эффект, который оказывает кооперация на стоимость вакцин.

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложений. В приложениях представлена справочная информация о малярии, ее лечении, противомалярийных вакцинах, описана методика определения базового репродуктивного числа и приведена статическая информации по заболеваемости малярией в Сенегале с 2000 по 2021 гг.

В первой главе на основе SEIR-модели предлагаются эпидемические модели распространения малярии в популяции человека при возможности вакцинации населения и без нее. Находятся и характеризуются положения равновесия, определяется базовое репродуктивное число как функция параметров эпидемической модели. Глава завершается численным моделированием распространения малярии в популяции человека, используя предложенные модели.

Во второй главе предлагается эпидемическая модель распространения малярии одновременно в двух популяциях — человека и комара. Глава имеет схожую с первой главой структуру: в ней находятся и характеризуются положения равновесия системы, определяется базовое репродуктивное число как функция параметров модели, и проводится численное моделирование распространения заболевания одновременно в двух популяциях на основе обсуждаемой здесь модели эпидемии трансмиссивной малярии.

В третьей главе демонстрируется возможность практического применения математического моделирования к описанию эпидемических процессов распространения малярии с использованием статистических данных по заболеваемости в Сенегале. Для прогнозирования течения эпидемии выбираются две модели: первая базируется на SIR-модели, а вторая — на балансовой модели.

В четвертой главе приводится теоретико-игровая модель долгосрочного взаимодействия фирм-производителей вакцин, допускающая возможность их кооперации — объединения в коалиции. С использованием аппарата дифференциальных игр с бесконечной продолжительностью находятся равновесия по Нэшу для заданной коалиционной структуры и обсуждаются устойчивые структуры.

В содержании и оформлении диссертации существенных недостатков нет. Работа содержит интересные и оригинальные результаты и выполнена на высоком математическом уровне. Приведу ряд **замечаний и комментариев**, которые могут быть учтены и использованы автором диссертации в своих будущих научных исследованиях.

1. Если в первых двух главах исследуются эпидемические SEIR-модели, то в основе третьей главы лежит SIR-модели (балансовая модель на основе процентного прироста относится к другому классу динамических моделей, поэтому о ней в этом замечании речь не идет). Для большей связности и целостности результатов, считаю, что прогнозирование эпидемии малярии по статистическим данным Сенегала за период с 2000 по 2016 гг. стоило выполнить для SEIR-модели. Это бы дополни-

тельно подчеркнуло ее состоятельность с учетом других теоретических результатов в первых двух главах.

2. В системах дифференциальных уравнений из второй главы неудачно выбрано обозначение параметра  $dv$ , который характеризует уровень вакцинации популяции.
3. Первые три главы работы касаются процессов развития эпидемии, а заключительная четвертая глава — конкуренции и кооперации производителей вакцин. Эти два направления рассматриваются отдельно друг от друга, хотя, как мне представляется, они могут быть объединены в единую модель, предполагая, что взаимодействие производителей вакцин может проходить не только при отсутствии массовой заболеваемости, но и в периоды ее подъема. Интересно проанализировать модельные объемы производства вакцин и их стоимость в такие периоды.
4. В работе стоило пояснить выбор бесконечного горизонта планирования в теоретико-игровой модели взаимодействия производителей вакцин, а также отсутствие каких-либо ограничений (внутренних, регуляторных и пр.) на кооперацию самих производителей.
5. Переменной состояния является стоимость вакцины, причем по предположению она одинакова у всех производителей. Это некоторое ограничение модели. В случае, когда производители вакцины устанавливают одну и ту же стоимость единицы, анализ поведения в классе позиционных стратегий становится весьма оправданным — все производители имеют полную информацию о текущем значении переменной состояния. Возможно, решения для такого класса стратегий могли привести к новым интересным эффектам.

С учетом всего вышесказанного **полагаю**:

Содержание диссертации Ндиайе Серинь Моду на тему: «Математическое и теоретико-игровое моделирование распространения малярии при отсутствии и наличии вакцинации» соответствует специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, либо изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения и разработки, имеющие существенное значение для развития страны.

Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук соискателем ученой степени мною не установлено.

Диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» и рекомендована к защите в СПбГУ.

Председатель диссертационного совета  
Доктор физико-математических наук, доцент,  
профессор Кафедры математической теории игр  
и статистических решений Санкт-Петербургского  
государственного университета



А.А. Седаков

25 января 2024 г.