

ОТЗЫВ

члена 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 специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

Разработка методов предотвращения распространения заболеваний, приводящих к эпидемиям и пандемиям, является важным и приоритетным направлением научных исследований многих государств. Математическое моделирование развития эпидемий и распространения заболеваний в обществе является одним из инструментов, позволяющих строить прогнозы, изучать влияния различных факторов, влияющих на течение эпидемии. Построенные математические модели могут в дальнейшем верифицироваться на имеющихся статистических данных. Несомненно, различные заболевания распространяются в обществе по-разному, и рассмотренная в работе малярия также имеет свои особенности распространения, но результаты работы могут быть применены, как мне кажется, и для моделирования других заболеваний, передающихся через укусы насекомых. Актуальность данной работы особенно высока для районов Африки и Азии, в которых до сих пор сохраняется высокий уровень заболеваемости малярией (о чем говорится в работе со ссылкой на ВОЗ).

Кратко опишу содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 155 страниц. Все главы имеют схожую структуру: сначала приводится описание математической модели, далее формулируются и доказываются основные теоретические результаты, и в заключении проводится численное моделирование с подробным описанием полученных результатов. Первая глава посвящена математическому моделированию распространения малярии в обществе, которое представлено одной популяцией человека, в отличие от второй главы, где рассматривается динамика изменения двух популяций одновременно – человека и комара. В обеих главах рассматриваются модели в присутствии и отсутствии вакцинации. Также в первой и второй главах проводится схожий теоретический анализ моделей, а именно, находятся некоторые точки равновесия, изучается их устойчивость, находится базовое репродуктивное число, характеризующее течение эпидемии для каждого случая. В конце этих глав приводятся результаты численных экспериментов, где автор изменяет параметры, меняя, тем самым, значения базовых репродуктивных чисел и характер течения эпидемии.

В третьей главе автор предлагает две модели распространения малярии, которые строятся на основе имеющихся статистических данных о заболеваемости малярией в Сенегале. В этой главе используется балансовая

модель и балансовое уравнение, ранее не применявшееся к моделированию эпидемий заболеваний, передающихся насекомыми. В этой главе строятся прогнозы при различных параметрах построенных моделей, проводится сравнительный анализ прогнозов, полученных с помощью балансовой модели и упрощенной модели SIR.

В четвертой главе автор предлагает экономическую модель конкуренции и кооперации фирм-производителей вакцин. В основе модели лежит дифференциальная игра, для которой находятся равновесия по Нэшу при различных коалиционных структурах и кооперативное решение, когда все фирмы объединены в одну коалицию. Автором доказываются теоремы о необходимых условиях равновесий по Нэшу для игры трех лиц при различных коалиционных структурах, проводится анализ устойчивости этих структур. Численный пример показывает устойчивость гранд коалиции.

Теоретическая значимость работы заключается в предложенных автором моделях, в которых он учитывает ранее не рассматриваемые для данного класса моделей факторы или особенности течения и передачи заболевания в популяциях. Теоретическую значимость также имеет балансовая модель, адаптированная автором для случая «редких» данных, т.е. когда имеются ежегодные данные по заболеваемости и требуется построить по таким данным математическую модель и соответствующие прогнозы. Практическая значимость работы заключается в возможности применения всех предложенных моделей на практике для построения прогнозов и проведения имитационного моделирования эпидемий. Верификация построенных моделей, проведенная автором в третьей главе, демонстрирует возможности их применения на практике для прогнозирования.

Достоверность полученных научных результатов диссертации Ндиайе Серинь Моду обусловлена строгим доказательством всех сформулированных математических утверждений. Результаты диссертации доложены на нескольких российских и международных конференциях, семинарах. Основные результаты работы опубликованы в четырех статьях, три из которых - в журналах из списка ВАК, часть статей проиндексирована в Scopus и Web of Science.

Новизна результатов диссертационной работы заключается в предложенных автором моделях распространения малярии с новыми элементами течения эпидемии и передачи заболевания в популяции, когда учитываются изменения численностей субпопуляций в одной и двух популяциях одновременно. В данной работе впервые была предложена балансовая модель применительно к моделированию распространения малярии по имеющимся ежегодным данным заболеваемости. Ранее такая модель использовалась для построения прогнозов по ежедневным или еженедельным данным и ее адаптация и применение к ежегодным данным показали хорошие результаты на имеющихся статистических данных.

Диссертация хорошо написана, имеет четкую структуру. В случае необходимости автор приводит вспомогательный справочный материал в приложении, как, например, при описании способов вычисления базового

репродуктивного числа. Математические модели строго описаны, сформулированные теоретические результаты доказаны в работе, проведено численное моделирование, что особенно важно для дальнейшего возможного применения результатов работы на практике специалистами из других научных областей. У меня имеются вопросы, замечания и предложения о дальнейших исследованиях:

1. В первой и второй главах вакцинация учитывается как параметр модели, но, как мне кажется, было бы интересно рассмотреть эти же модели, в которых уровень вакцинации является управлением. Можно сформулировать функционал управляющего органа, который заинтересован в предотвращении распространения заболевания и уменьшении затрат на лечение и вакцинацию. Хотелось бы узнать мнение автора о возможности решения задачи в такой постановке.
2. Как написано во введении диссертационной работы, существуют методы воздействия на популяцию комаров, которые уменьшают ее численность и, тем самым, вероятность заражения человека малярией. Из описания модели во второй главе, эти меры учитываются при добавлении параметра σ в модель. Какие значения может принимать этот параметр для различных мер воздействия на популяцию комара, чтобы не нарушить баланс экологической системы региона? Есть ли информация об этом в литературе и каким образом выбирался этот параметр в проведенных численных экспериментах?
3. Непонятно, почему автором выбраны для анализа только две точки равновесия в каждой модели первой и второй глав. Почему именно они интересны? В чем причина того, что остальные точки равновесия не были найдены.
4. Объем выборки, используемой в 3 главе для построения прогнозов, является очень небольшим – 22 наблюдения. Можно ли в таком случае говорить о «хорошем» прогнозе? Автор не делает вывод о том, какая из двух построенных им моделей в 3 главе лучше для прогнозирования. Было бы хорошо узнать мнение автора об этом.
5. В теоремах 4.1, 4.2 и 4.3 не приводятся условия устойчивости найденных решений. Проверялись ли они в работе?

Данные замечания и вопросы в основном сформулированы как основа для дальнейшей работы в данной области. Они не влияют на общее положительное впечатление от диссертации, которая содержит новые и интересные модели в области математического моделирования распространения заболеваний, их подробный анализ, доведенный до серии численных экспериментов. Теоретические и практические результаты, представленные в данной работе, показывают высокую квалификацию автора. Ндияе Серинь Моду имеет несколько журнальных публикаций в ведущих российских научных журналах, включенных в перечень ВАК, некоторые из которых проиндексированы в наукометрической базе данных Scopus. Как отмечается автором, результаты работы были доложены на семинарах и

нескольких известных научных конференциях. Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика.

Диссертация Ндиайе Серинь Моду на тему: «Математическое и теоретико-игровое моделирование распространения малярии при отсутствии и наличии вакцинации» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 №11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а ее автор, соискатель Ндиайе Серинь Моду, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не установлены.

Член диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор Кафедры математического
моделирования энергетических систем,
Санкт-Петербургский государственный университет

О.Л. Петросян
17.01.2024

