

## Отзыв

председателя диссертационного совета на диссертацию Су Шимая на тему «Теоретико-игровые методы анализа устойчивости в задачах управления загрязнением окружающей среды», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика

**Актуальность темы исследования.** Диссертация посвящена анализу теоретико-игровых моделей управления загрязнением окружающей среды и поиску устойчивых союзов вовлеченных сторон (коалиций игроков) с учетом выполнения свойства индивидуальной рациональности. Тематика важна и актуальна в контексте международного сотрудничества для выработки долгосрочных экологических соглашений, устраивающих все вовлеченные стороны. Математическое моделирование ситуации в предположении двух типов сторон — развитых и развивающихся стран — отражает их разное отношение к решению проблемы загрязнения окружающей среды. В диссертации математически обосновывается необходимость согласованного подхода для решения этой задачи. Представленное в работе моделирование объемов загрязнения и его концентрации в окружающей среде демонстрирует не только существование устойчивых союзов, наиболее благоприятных по экологическому критерию, но и механизмов, которые обеспечивают устойчивость заданного сценария кооперации. Это особенно актуально для имплементации международного экологического соглашения с учетом интересов всех вовлеченных сторон.

**Научная новизна.** Диссертация содержит новые результаты, представляющие научный интерес для исследователей в области математического моделирования международных экологических соглашений, изучения типов поведения сторон (кооперативного, частично кооперативного и некооперативного) и анализа устойчивости союзов и, как следствие, экологического соглашения. В частности, в диссертации предлагается механизм компенсаций, широко применяемый в теории цепей поставок, как один из инструментов анализа устойчивости соглашения. Предлагаются и другие инструменты достижения устойчивого соглашения, как, например, система налогообложения с единым налогом или ограничение допустимых коалиций, что существенно расширяет множество устойчивых сценариев. Кроме того, анализируется неполнота информация в экологической модели и ее ценность и полезность, выраженная количественным показателем.

**Степень достоверности.** Теоретические результаты, изложенные в диссертации, приводятся с полными и строгими доказательствами. Основные результаты диссертации опубликованы в профильных научных журналах, в частности, *Operations Research Letters*, *Contributions to Game Theory and Management*. Основные результаты диссертации были представлены на 14-й и 16-й Международных конференциях «Теория игр и менеджмент» (GTM2021, GTM2023), Международной конференции «Теория игр и приложения», 21-й и 22-й Международных конференциях «Математическая теория оптимизации и исследование операций» (MOTOR 2022, MOTOR 2023).

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Диссертация вносит вклад в развитие механизмов достижения устойчивых соглашений в контексте задач защиты окружающей среды. Предложенные методы не ограничиваются этой областью и могут также применяться и в других практических областях, где требуется нахождение соглашения, отвечающего свойству индивидуальной рациональности. Помимо этого, предложенные

в диссертации механизмы достижения устойчивого соглашения могут быть использованы в теоретических исследованиях многих направлений теории игр. Весьма значимым результатом является разработка механизма, обеспечивающего устойчивость заданной коалиционной структуры. Этот механизм может применяться по-разному: с использованием трансферных платежей, системы налогообложения или же путем ввода ограничений на допустимые союзы. Практическая значимость работы состоит в демонстрации подходов к моделированию международных экологических соглашений, несомненно являющихся значимыми в последнее время.

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы.

В первой главе анализируется игра четырех лиц управления загрязнением окружающей среды с двумя типами игроков. В ней находится поведение игроков при некооперативном, кооперативном и частично кооперативном сценариях. Вводится два определения устойчивости коалиционной структуры — устойчивости по Нэшу и индивидуальной устойчивости. Последний тип устойчивости исключает вхождение игрока в состав коалиции, если выигрыш хотя бы одного игрока этой коалиции уменьшается. Разработаны механизмы, обеспечивающие устойчивость сценариев кооперации с применением трансферных платежей, системы налогообложения или же путем ввода ограничений на допустимые коалиции игроков.

Во второй главе делается акцент на устойчивости экологических соглашений в динамической постановке. Анализируется дифференциальная игра двух лиц управления загрязнением окружающей среды бесконечной продолжительности. Рассматривается некооперативный и кооперативный сценарии, а также находится равновесное поведение в сценарии с использованием механизма компенсаций. Проводится сравнительный анализ последнего сценария отдельно с некооперативным и кооперативным. Весьма интересным результатом этой главы является возможность снижения общего уровня загрязнения посредством механизма компенсаций в сравнении с кооперативным сценарием. Устойчивость соглашений обсуждается для дифференциальной игры трех лиц с двумя типами игроков, для которой характеризуются устойчивые по Нэшу и индивидуально устойчивые коалиционные структуры.

В третьей главе обсуждается ценность информации в дифференциальной игре управления загрязнением окружающей среды при различных сценариях неинформированности. Сначала анализируется эффект отсутствия информации о величине терминальных затрат на выигрыши. Далее выясняется ценность информации о верхней границе допустимого управления. Наконец, исследуется ценность информации о величине начального уровня загрязнения. Ценность информации характеризуется количественным (нормированным) относительным показателем, равным абсолютной величине отношения разности выигрышей игрока при наличии и отсутствии информации к его выигрышу в игре при полной информированности.

В содержании и оформлении диссертации нет существенных недостатков. Работа содержит интересные и оригинальные результаты и выполнена на высоком математическом уровне.

Отмечу ряд замечаний и комментариев.

1. Мне представляется, что при квадратичных функциях выигрыша и линейной связи между общим уровнем загрязнения и суммарным объемом выбросов теорию устойчивых соглашений для одновременной игры четырех лиц в главе 1 и динамической

игры трех лиц в главе 2 можно было бы построить в более общем случае, наделив каждого игрока персональным параметром  $\beta_i$ . Далее, например, в игре четырех лиц, положив  $\beta_1 = \beta_2 = 0$  и  $\beta_3 = \beta_4 = \beta$  можно прийти к утверждениями 1.1–1.3 как частным случаям. Более общая модель допустила бы и другие конфигурации типов стран, как одна развитая и три развивающиеся, одна развивающаяся и три развитые. Кроме того, есть определенная разнородность моделей в первых двух главах в части количества участников. Три сценария (механизм компенсаций в динамической игре, устойчивость в динамической игре и одновременная игра) представлены для двух, трех и четырех игроков, соответственно. Было бы весьма интересно рассмотреть все эти сценарии для одинакового числа игроков.

2. В (1.2) и (1.3) выписаны оптимизационные задачи, допускающие лишь положительные объемы выбросов, в то же время при доказательстве утверждений 1.1 и 1.2 допускаются неотрицательные объемы выбросов. Подобное встречается в других местах в тексте: см. (2.2)–(2.5), стр. 51 в русскоязычной версии, (2.8)–(2.9), (2.19), (2.23), (2.25).
3. Следствие 1.1 утверждает, что при кооперативном сценарии, т. е. при формировании коалиционной структуры  $\{\{1, 2, 3, 4\}\}$  общий уровень загрязнения будет наименьшим. Несмотря на это, устойчивость экологического соглашения основывается на сравнении выигрышей игроков в различных коалиционных структурах, оставляя величину общего уровня загрязнения без внимания, приводя, возможно, к худшему уровню загрязнения. Более того, если коалиционную структуру можно сделать устойчивой при внедрении специальных механизмов, например, на основе трансферных платежей или схемы налогообложения, то почему не уделить внимание устойчивости коалиционной структуры, приводящей к наименьшему общему уровню загрязнения?
4. Стр. 25, строка 7 снизу в русскоязычной версии: фраза «...игрок 1 может получить максимальную прибыль, когда...» не совсем корректна. Прибыль этого игрока зависит также от стратегий других игроков, которыми он не управляет.
5. Стр. 26, строка 10 сверху в русскоязычной версии: при кооперативном сценарии оптимальность стратегий (1.7) гарантирует отрицательная определенность гессиана  $W$ , а не отрицательный знак вторых производных  $W$  по каждому  $e_i$ . Вероятно, такой вывод делается из-за специального вида функций выигрыша.
6. Учитываются ли в утверждении 1.6 условия (1.15) и (1.16)?
7. Применение схемы налогообложения для достижения устойчивости выбранной коалиционной структуры подразумевает величину налога, зависящую от самой структуры. Если ли объяснение подходу, в котором «единая» величина налога зависит от сформированных союзов, а не, например, от объемов выбросов игроков?
8. На стр. 52 русскоязычной версии анализируется сценарий с использованием механизма компенсаций в динамической игре двух лиц. Предполагается, что игроки договариваются о двух параметрах:  $\tau$  и  $\theta$ . Если игроки имеют возможность договариваться о параметрах, почему они сразу не могут договориться о выбираемых стратегиях? Утверждение 2.3, описывающее равновесие по Нэшу, предполагает, что стратегии выбираются одновременно и независимо друг от друга, несмотря на координацию игроков по выбору  $\tau$  и  $\theta$ .

9. Глава 3 диссертации решает задачу ценности информации в кооперативной и некооперативной дифференциальных играх, не рассматривая возможность образования коалиционных структур, как это предполагается в моделях из глав 1 и 2, и анализа их устойчивости. В модели из разделов 3.1 и 3.2 затраты игрока выбираются в линейном по объему загрязнения виде, а не в квадратичном, как это было в тексте до этого. Модель из раздела 3.3 качественно отличается от рассмотренных ранее.
10. Утверждение 3.3 автоматически следует из утверждения 3.2 и не требует отдельного доказательства. Предположение о неизвестности игроку терминальных издержек на самом деле предполагает, что игрок считает их нулевыми. Неопределенность об изменении верхней границы допустимого управления выглядит искусственно, как если бы игрок не имел представления о своем множестве допустимых управлений, что довольно странно в контексте задачи выбора объема загрязнения.
11. В (3.25) не учитывается ограничение на допустимые объемы выбросов. В (3.31)–(3.35) не учитывается ограничение неотрицательности объема выбросов.

Диссертация Су Шимая на тему: «Теоретико-игровые методы анализа устойчивости в задачах управления загрязнением окружающей среды» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Су Шимай 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 обнаружены.

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

 А. А. Седаков

26 апреля 2024 г.