



А. А. Ильченко

**К ВОПРОСУ АСИММЕТРИИ
В ТЕОРЕТИКО-ИГРОВОЙ СЕМАНТИКЕ**

Проводится анализ ключевых аспектов теоретико-игровой семантики и демонстрируются ее преимущества относительно отображения неполной информации и несовершенной памяти. Показываются недостатки теоретико-игровой семантики Я. Хинтикки относительно проблемы асимметрии в семантических играх. Представлен обзор характеристик параллельной теоретико-игровой семантики.

56

This article provides an analysis of the key aspects of game-theoretic semantics and demonstrates its advantages in presenting incomplete information and imperfect memory. The author identifies the limitations of J. Hintikka's game-theoretic semantics as to the problem of asymmetry in semantic games. The article provides an overview of concurrent game-theoretic semantics.

Ключевые слова: теоретико-игровая семантика, параллельная теоретико-игровая семантика, неполная информация, асимметрия.

Key words: game-theoretic semantic, concurrent game-theoretic semantic, imperfect information, asymmetry.

На данный момент развития логики теоретико-игровая семантика является одним из наиболее актуальных семантических подходов. Основным ее преимуществом считается возможность анализа игр с неполной информацией. Однако в последнее время все больше поднимается вопрос о бесконечных потоках информации и параллельных играх. К сожалению, эти концепции нельзя отобразить в теоретико-игровой семантике Я. Хинтикки. В связи с этим возникает потребность в разработке альтернативных семантических подходов.

Теоретико-игровая семантика рассматривается в работах многих логиков, в частности Я. Хинтикки (Ja. Hintikka), Г. Санду (G. Sandu), А. Пиетаринена (A. Pietarinen), В. Ходжеса (W. Hodges), А. Манна (A. Mann), М. Севенстера (M. Sevenster), Ю. В. Нечитайлова и др. Параллельные игры разрабатывались такими логиками, как С. Абрамски (S. Abramsky), П.-А. Меллиес (P.-A. Melliès), Р. Джагадисен (R. Jagadeesan) и др.

Задача данной статьи состоит в том, чтобы рассмотреть принципы параллельной теоретико-игровой семантики и показать ее преимущества в сравнении с теоретико-игровой семантикой Я. Хинтикки.

Основная идея семантической игры довольно проста: «ты и я противостоят друг другу, соблюдая ряд правил, которые говорят, какие ходы являются законными и с какой целью. Мы оба пытаемся выиграть игру, выиграв в любой операции, и если один из нас находит система-



тический способ сделать это, он или она имеет выигрышную стратегию. Набор правил игры фиксируется логически активными компонентами языка, который, в случае языков первого порядка, включает два квантора \forall , \exists и пропозициональные связки» [4, р. 67].

Связь языка и игры впервые была отмечена Л. Витгенштейном в «Философских исследованиях», он обращается к понятию игры, чтобы объяснить, как мы используем и изучаем язык. Слова и предложения приобретают смысл при применении их в различных языковых играх. Идея Витгенштейна была заимствована Я. Хинтичкой для логики первого порядка, где игроками выступают кванторы всеобщности и существования. Им был предложен метод анализа истинности предложений в форме игры, которую он назвал «игрой исследования мира» [1]. Он создал теоретико-игровую семантику в качестве альтернативы рекурсивному определению истины через понятие выполнимости Тарского. Истинность или ложность предложения непосредственно связывается с наличием выигрышной стратегии. Следует обратить внимание, что теоретико-игровая семантика — это одно из направлений логической семантики, которое обычно относится к философской логике. Целью Хинтички было не просто обеспечение альтернативной теории истинности для логики первого порядка, но и обоснование теории значения, используя идею «языковой игры» Л. Витгенштейна.

В основе теоретико-игровой семантики лежит экстенсивная форма игры (*extensive form of games*). Как отмечает А. Пиетаринен:

Оригинальный вклад теоретико-игровой семантики состоит в предоставлении альтернативного метода оценки высказываний в семантике Тарского для логики первого порядка и тем самым обеспечении понимания значения логических понятий. С технической точки зрения к играм часто обращаются, когда традиционные методы оценки трудно применять, например в случае логики с неполной информацией [5, р. 143–144].

Экстенсивные игры — особый вид в теории игр, позволяющий явно репрезентировать ряд важных аспектов: последовательность ходов игроков, их выбор в каждый момент принятия решения; возможность отображать информацию о ходе другого игрока (в том числе неполную), которую каждый игрок имеет, когда он принимает решение; представление о наградах при любых исходах игры. Экстенсивные игры также позволяют давать неполную информацию в виде случайных событий.

Семантические игры рассматриваются как игры с экстенсивной формой в смысле классической теории игр. Это означает, что такие логические игры можно было бы исследовать исключительно в терминах того, каким образом происходит переход информационного потока в формуле от одного компонента к другому, и изучать различные способы, которыми этот поток можно контролировать и регулировать. А. Пиетаринен пишет:



Эта точка зрения не ограничивается функциональной зависимостью, и, следовательно, каждый в состоянии сказать что-то большее о теоретико-игровой интерпретации логики, чем было бы возможно, используя лишь наличие выигрышных стратегий [4, p. 69].

Игры в экстенсивной форме выходят за рамки нормальной (стратегической) формы, то есть если нормальные формы удобно применять, для того чтобы показать, какие стратегии являются выигрышными для каждого игрока, в играх с экстенсивной формой стратегии игры генерируются при ходе самой игры.

Структуру любой семантической игры в понятиях Хинтикки можно описать следующим образом. Во-первых, это игра двух игроков: Элоизы (ее начальная задача обоснование) и Абеляра (его начальная задача опровержение). Истинность предложения φ в модели M соответствует существованию выигрышной стратегии для Элоизы в семантической игре $G(\varphi, M)$ относительно φ и выполняется в M . Ложности φ соответствует существование выигрышной стратегии для Абеляра. Таким образом, интуитивно Элоиза может рассматриваться как защитник « φ истинно в M » против любых попыток опровержения данного утверждения Абеляром. Аналогичным образом Абеляр отстаивает требование « φ ложно в M » против любой попытки опровержения этого требования Элоизой. Игры $G(\varphi, M)$ определены так, что φ действительно является истинным (ложным) в M , если существует стратегия Элоизы (Абеляра), которая позволяет выиграть, несмотря на всю остальную последовательность ходов Абеляра (Элоизы). Учитывая семантическую игру $G(\varphi, M)$, наличие или отсутствие существования выигрышной стратегией для любого игрока является объективным фактом о модели M . Следует отметить, что любая игра в теоретико-игровой семантике конечна и антагонистична по своей сущности, то есть в каждой игре обязательно должен быть победитель и проигравший.

Изначально Хинтикка рассматривал игры с полной информацией и нулевой суммой, иными словами, в каждый момент игры каждый игрок имеет доступ к «истории» ходов игры и знает, в каком именно «месте» он находится. В играх с нулевой суммой общая выгода для всех игроков в игре, для каждой комбинации стратегий всегда равна нулю, таким образом, мы имеем дело с играми *win-lose* (выигрыш-проигрыш).

Однако проблема возникает при моделировании и анализе игр с неполной информацией. Под неполной информацией в теории игр понимается ограниченность доступа игроков к истории игры. В первую очередь проблему отображения неполной информации на языке логики первого порядка Хинтикка связывает с зависимостью кванторов в первопорядковой логике Фреге – Рассела. Одним из вариантов отображения неполной информации в семантических играх выступает изменение языка логики первого порядка, а именно переосмысление природы кванторов и введение идеи информационной независимости кванторов. В результате чего возникает IF (*independence friendly*) логика Я. Хинтикки.

При появлении понятия информационной независимости и переходе к логике IF обнаруживается необходимость разъяснения некото-



рых аспектов ее теоретико-игровой семантики: «...определим семантическую игру для формулы IF как экстенсивную игру с неполной информацией за счет ограничения доступа игроков к текущему приписыванию значения» [2, р. 62]. Таким образом, игрок может быть принужден к выбору действия без знания всей истории игры.

А. Манн, Г. Санду и М. Севенстер отмечают, что «ограниченность информации, доступной игрокам, не влияет на его или ее возможность выполнять какое-либо конкретное действие. Это просто препятствует использованию определенной стратегии» [2, р. 63]. Также следует добавить, что идея информационной независимости кванторов в логике IF оказывается ее огромным преимуществом по сравнению с классическим языком логики, поскольку в ней становится возможным отображение разветвляющихся кванторов (*branching quantifier*) Л. Хенкина (L. Henkin).

Традиционные формы игровых семантик, которые возникли в логике и информатике, были последовательными в формате: игра оформляется как последовательность ходов. Ключевой особенностью этого формата является последовательное существование глобального графика: в каждой (конечной) позиции наступает очередь хода именно одного из игроков. Однако у такого последовательного формата есть ряд ограничений при его использовании для моделирования или доказательства. В своей статье «Параллельные игры и исчерпывающая полнота» С. Абрамски и П.-А. Меллиес указывают на следующие ограничения:

- Ограничение моделирования. Последовательные игры могут быть использованы для моделирования последовательных вычислений, но не дают модели параллельных вычислений естественным образом.
- Математическое ограничение. Несмотря на очевидную присущность играм двойственности (смена ролей игроками), компактность размещения является препятствием для моделирования логики в классическом формате» [3, р. 432].

Хотя экстенсивные формы имеют ограничения, они все же выражают то, с чем логический механизм не готов справиться:

...в деревьях игры множества информации могут включать в себя только некоторые узлы в какой-то определенной степени, следовательно, неопределенность может быть создана «условно», ограничена некоторыми частными выборами в дереве, и непонятно, чему это будет соответствовать в логических языках [7].

Однако в логике существует такое понятие, как совершенно неограниченный поток информации, который может быть двунаправленным или даже циклическим, но для семантического отображения этой концепции экстенсивная форма игры оказывается неподходящей. Соответственно, возникает необходимость в разработке альтернативных моделей игры, например параллельной модели.

А. Пиетаринен настаивает на наличии других ограничений, по которым экстенсивная форма игр ограничена в своей выразительной



мощности. Безусловно, в таких играх существует возможность повторения решения, понятие, которое говорит, что набор информации может содержаться более чем в одном узле в любой конкретной ветке дерева. Другими словами, во время одной игры один и тот же набор информации можно получить более одного раза. «Гипотеза о неповторении была сделана в оригинальном определении игр с экстенсивной формой, и в теории игр почти не присутствуют игры с повторениями» [7]. Тем не менее ограничения экстенсивной формы в семантических играх не позволяют решать классические задачи из области теории игр. Таким образом, в связи с вышеуказанными ограничениями вопросы, касающиеся рациональности предположения игроков или результатов игр, и последующее ветвление в случайные и чистые стратегии в поиске равновесия исключаются из проблематики теоретико-игрового подхода. Кроме того, можно было бы вместить в эту парадигму и игры с повторяющимися ходами.

Как это часто бывает, в игровые модели для логики с неполной информацией приходится включать также игры и с несовершенной памятью, то есть забывание игроками истории игры. В данном случае это класс игр, которые не обязательно задают неповторяющиеся состояния. Однако поскольку существует альтернативный и, очевидно, более естественный и простой способ смоделировать несовершенную память, «мульти-я» игрока (игроков), повторяющиеся игры не являются существенным компонентом игры с неполной информацией, несмотря на их потенциал определения понятия несовершенной памяти.

Следует указать на еще одно ограничение экстенсивных форм, которое вызвано проявлением «лесоводства» традиционной теории игры. Неотъемлемой характеристикой «деревьев» выступает то, что они последовательны: как только вы достигли крайнего узла ветки, вы не можете вернуться обратно (без введения цикла), как только вы выбрали путь, вы не можете перейти к другой ветке, делая выбор, вы не можете видеть ничего в последующей части текущих локализованных вариантов, то есть впереди для каждого игрока неопределенность.

В действительности семантические игры могут быть освобождены от этих ограничительных аспектов экстенсивных форм. Один из альтернативных вариантов — параллельная теоретико-игровая семантика, которая позволяет отображать игры не в экстенсивной форме. Это дает возможность рассматривать параллельные семантические игры, или оценочные игры, которые происходят в непоследовательной форме. Как отмечает А. Пиетаринен: «В таких играх можно играть до N -го количества игр параллельно, в соответствии с N логически активными компонентами в формуле» [7]. Эта игровая модель решает проблему полностью неограниченного потока информации в формулах, которая возникает в случае, когда синтаксически создается циклическая зависимость между компонентами. Она также освобождает семантические игры от фундаментального ограничения, а именно то, что все игровые модели считались до сих пор асимметричным, поскольку кто-то всегда должен сделать первый шаг. На самом деле оказывается, что в семантических играх асимметрии может и не быть, однако в таком случае вста-



ет вопрос о выражении симметрии в теоретико-игровой семантике. Проблема асимметрии особенно важна при изучении ветвящихся кванторов, когда становится неясно, с какого именно квантора следует начинать игру. Можно допустить ситуацию, при которой у нас две параллельные формулы начинаются с одинакового квантора, но относительно разных переменных. В этом случае у нас есть два варианта начала игры, однако мы не можем рассмотреть параллельность данной ситуации в теоретико-игровой семантике. Очевидным решением кажется применение параллельной игры, а соответственно, и параллельной теоретико-игровой семантики.

Наиболее важным изменением в параллельной теоретико-игровой семантике является то, что базовая модель игры больше не рассматривается в экстенсивной форме. Практически всегда в теории семантических игр последние описываются либо в экстенсивных, либо в нормальных формах, которые традиционно основываются на предположении асимметрии. При параллельных играх, однако, асимметрия больше не удерживается, то есть игроки могут делать одновременные выборы или начать игру в одно и то же время с другим игроком.

Поскольку в экстенсивных формах существует заранее заданный порядок ходов начиная с начала игры (обязательно один из игроков должен делать первый шаг), то в таких играх несимметричная параллельная ситуация недопустима. Для классической семантической игры достаточно действовать под асимметрией, так как синтаксический вид формулы полностью определяет ход игры. Однако асимметрия не всегда дает возможность моделировать реальные ситуации, и у нас возникает потребность в альтернативном варианте теоретико-игровой семантики. Основная идея параллельной теоретико-игровой семантики и ее основные теоремы были изложены в работе «Направления в теоретико-игровой семантике» А. Пиетариненом, который указывает, что наиболее важное отличие параллельных игр от игр с экстенсивной формой заключается в проведении игры в форме частичных порядков, а не просто деревьев:

Так как в частичных порядках не может быть много максимальных элементов, все они соответствуют первым ходам в игре. Эти первые ходы влияют на циклический фрагмент формулы так, что каждый компонент в цикле связан с первым ходом в максимальном узле игры. Игра продолжается вдоль цепочек в частичном порядке, и там может быть переключение между цепями. Такие переключатели являются точками слияния некоторых двух элементов в игре частичного порядка, назовем их точками ожидания. Когда игрок попадает в такую точку ожидания, он или она не может продолжать действия до получения информации о выборе, сделанном оппонентом в другом элементе соединения. Мы можем, например, предусмотреть, что в точке ожидания игрок сделает пустой ход. Когда сведения о ходе оппонента достигнут соединения, первый игрок может продолжать движение [7].

Это и есть базовая схема структуры параллельной игры. Из-за этих переключений между параллельными играми могут возникать ситуа-



ции, в которых игроки пытаются привлечь один и тот же элемент из области структуры или выбрать одно и то же соединение, более того, такие действия возможны одновременно во время игры. Таким образом, параллельные семантические игры оказываются симметричными в том смысле, что ни один игрок не получает дискриминации противника, в таких играх отсутствует преимущество первенства для любого игрока.

Как отмечают Г. Санду и А. Пиетаринен:

Сегодня остается по большому счету неизвестно, что такое истинная логика параллелизма. Более того, если мы хотим строго моделировать знания и информацию в многоагентных (многопроцессорных) системах передачи сообщений, то полученные языки представления знаний, кажется, не обеспечивают достаточной экспрессивности, чтобы захватить все интересные конфигурации, которые могут возникать в таких системах. Но теперь у нас есть логика, которая содействует информационной независимости [6, р. 123 – 124].

Следует добавить, что параллельные игры как структуры событий были введены в качестве предварительной новой основы для формальной семантики параллельных систем и языков программирования.

Таким образом, проблема анализа игр с неполной информацией была преодолена при помощи изменения языка логики первого порядка на язык IF. Однако экстенсивная форма игры, которая лежит в основе теоретико-игровой семантики Хинтикки, не дает возможность рассматривать ассиметричные игры. Для преодоления данной проблемы была предложена параллельная теоретико-игровая семантика. Поскольку в ее основе лежит не экстенсивная форма игры, а игры с частичными порядками, то ее использование позволяет моделировать и анализировать симметричные игры, что придает такому семантическому подходу большую силу экспрессивности.

Список литературы

1. Хинтикка Я. Логико-эпистемологические исследования. М., 1980.
2. Mann A.L., Sandu G., Sevenster M. Independence-Friendly Logic a Game-Theoretic Approach. Cambridge, 2011.
3. Melliès P.-A., Abramsky S. Concurrent Games and Full Completeness // Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Logic in Computer Science. Computer Science Press of the IEEE, 1999. P. 431 – 442.
4. Pietarinen A. Semantic Games in Logic and Epistemology // Logic, Epistemology and the Unity of Science. 2004. Vol. 1. P. 57 – 103.
5. Pietarinen A., Sandu G. Games in philosophical logic // Nordic Journal of Philosophical Logic. 1999. Vol. 4, №2. P. 143 – 173.
6. Pietarinen A., Sandu G. If Logic, Game-Theoretical Semantics, and the Philosophy of Science // Logic, Epistemology and the Unity of Science. 2009. Vol. 15. P. 105 – 138.
7. Pietarinen A. Directions In Game-Theoretic Semantics. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.50.2509&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения: 19.03.2014).



Об авторе

Анна Александровна Ильченко – асп., Киевский национальный университет им. Т. Шевченко, Украина.

E-mail: ilchenkoganna@gmail.com

About the author

Anna Ilchenko, PhD student, Taras Shevshenko National University of Kyiv, Ukraine.

E-mail: ilchenkoganna@gmail.com