ТРУДЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

П. А. Шапчиц

Логические средства представления времени: Обзор

Аннотация: В обзоре описаны основные логические методы представления времени и, в частности, длительности. Особое внимание уделено вопросам взаимодействия временной логики и грамматики. В первой части обзора рассматриваются такие проблемы представления времени, как выбор семантических примитивов, установление отношений между ними, выбор временной структуры. Представлены основные понятия, описывающие структуру времени.

Ключевые слова: временная логика, логика грамматических времен, временной примитив. точка, интервал, временные отношения, временные ограничения, структура времени, поток времени, ветвящееся время, циклическое время.

Abstract: The review presents a non-exhaustive inventory of logical methods for temporal representation, including that of duration. A special stress is made on the issues of tense logic and grammar interaction. The first part of the review discusses such problems of temporal representation as semantic primitives' choice, relations between them, temporal structure choice. The notions that are essential for temporal structure description are introduced.

Keywords: temporal logic, tense logic, temporal primitive, point, interval, temporal relations, temporal constraints, time structure, time flow, branching time, circular time.

Введение

В течение первой половины XX в. словосочетание «временная логика» многими логиками могло восприниматься как оксюморон: необходимым условием приведения высказывания к логической форме было изъятие параметра времени из рассмотрения. Последний либо присоединялся к предикату, либо становился одной из переменных наряду с другими.

Одним из вдохновителей такого подхода был Г. В. Лейбниц, дистанцировавшийся в своих исследованиях от грамматических аспектов времени, волновавших античных и средневековых логиков. Хотя он детально исследовал проблему времени (см., напр., его переписку с Кларком[1]), в его логических

[1] *Лейбниц Г.-В.* Соч.: В 4 т. Т. I. М., 1982. С. 430–568.

работах времени не отводилось места. Лейбниц хотел создать логику, приближенную к математике, а это заставляло его подходить к логике как к вневременной науке. Остром и Хасле[2] объясняют такое пренебрежение временем еще и философскими воззрениями Лейбница: полное понятие об индивидуальной субстанции, по Лейбницу, включает в себя все, что можно сказать о ней относительно прошлого, настоящего и будущего. Поскольку, например, единичному понятию «апостол Петр» присуще свойство «быть (там-то и тогда-то) отрекшимся от Христа», любое использование полных, совершенных понятий делает излишними всяческие отсылки ко времени. Мы можем сформулировать это иначе: логические сущности, по Лейбницу, претендуют на полноту описания, следовательно, на конкретность. Современная логика, наоборот, отказывается от презумпции всеведения и вынуждена иметь дело с односторонней или неполной информацией. Поэтому интерес логиков к временной логике как разделу, изучающему одну из сторон форм мысли и представления информации, совершенно естественен.

Временная информация, с которой имеет дело логик, не всегда представлена в виде явно датированных высказываний. Очень часто информация о времени представлена набором высказываний, принадлежащих к A- и B-рядам[3], нечетко или неполно, но тем не менее она требует обработки. Одной из целей современных логико-временных исследований является максимально возможное расширение типов приемлемой для анализа временной информации. Это ведет к увеличению разнообразия и выразительной силы временно-логических систем.

До начала 1970-х годов временная логика, возрожденная в работах А. Н. Прайора[4], с помощью модальных операторов выражала высказывания, истинные, по преимуществу, на точках, либо на лучах времени, направленных в прошлое или будущее. Вопрос о типах предикатов, которые могли выражаться такой логикой, ставился в основном лингвистами. Очевидно, что для выражения всего разнообразия глагольных предикатов потребовались бы развитые системы интервальных логик. Однако в прайоровской логике для задания временных интервалов требовались довольно сложные «дополнительные построения». Современные логики предлагают впечатляющий воображение арсенал предикатов, чувствительных к временно-аспектной характеристике глаголов (и шире — к группе сказуемого).

---

[2] *Øhrstrom P., Hasle P. F. V.* Temporal Logic from Ancient Ideas to Artificial Intelligence. Oxford, 1995. P. 116.

[3] О рядах подробнее см.: *McTaggart J. E.* The Unreality of Time // Mind: A Quarterly Review of Psychology and Philosophy. N 17 (1908). P. 456–473; *Prior A. N.* Papers on Time and Tense / Ed. by Per Hasle, Peter Øhrstrøm, Torben Braüner, Jack Copeland. Oxford, 2003; *Караваев Э. Ф.* Основания временной логики. Л., 1983; *Øhrstrom P., Hasle P. F. V.* Temporal Logic from Ancient Ideas to Artificial Intelligence.

[4] Об истории понятия мгновения см.: *Prior A. N.* Past, Present and Future. Oxford, 1967.

Если мы не оперируем заведомыми абстракциями (например, понятием мгновенной скорости) и не решаем философские проблемы, то высказывания о любых состояниях, процессах и событиях будут получать свое истинностное значение только на ненулевых временных интервалах[5]. Чарльз Л. Хэмблин критикует идею деления физического (phenomenal) времени на мгновения (instants of time), т. е. на фрагменты, не имеющие частей[6]. Он выдвигает два возражения против этой идеи. Во-первых, мгновения бессодержательны в том смысле, что для длительного опыта требуется много мгновения. Например, красная книга может позеленеть за полсекунды, но не может это сделать мгновенно. недлительно, оставаясь красной до и после этого мгновений. Иначе говоря, временной континуум богаче, чем нам это требуется для описания мира: он позволяет нам описывать физически невозможные положения вещей, например, такие, как «Моя книга должна быть красной во все рациональные моменты временной шкалы и зеленой — во все нерациональные»[7]. Во-вторых, если время состоит из мгновений, то мы не можем говорить о временных отношениях. К этому возражению примыкают возражения гештальтпсихологов: как возможно, воспринимая ноты, воспринимать их как единую мелодию? То есть требуется различение более ранних и более поздних событий некоторого интервала, хотя они могут восприниматься как одновременные. Кроме того, идея бесконечного разделения на мгновения несет на себе отпечаток геометризации времени. Сходные мысли высказывались и в работах Хоббса и Зиновьева[8]. В силу этих соображений проясняется вся важность понятия интервала для современной временной логики.

Поскольку наш обзор не может претендовать на полноту, мы решили сконцентрировать внимание на этих двух темах: на представлении длительности в логике и на взаимодействии логики и грамматики. Это продиктовало и структуру обзора: вначале мы вкратце обсудим проблему выбора семантического примитива для временно-логической системы, а затем — представление структуры времени и различные виды временных логик. В заключительной части мы представляем проблематику и некоторые результаты логики грамматических времен.

---

5 Об истории понятия мгновения см.: *Čapek M.* The Fiction of Instants // The Study of Time / Ed. by J. T. Fraser, F. C. Haber, G. H. Muller. New York, 1972. P. 332-344.

6 См.: *Hamblin C. L.* Instants and Intervals // The Study of Time / Ed. by J. T. Fraser, F. C. Haber, G. H. Muller. New York, 1972. P. 324–331; см. также: Studium Generale. N 27 (1971). P. 127–134.

7 *Hamblin C. L.* Instants and Intervals. P. 325.

8 См.: *Hobbs J. R.* Granularity // Proc. of the 9th IJCAI. 1985. P. 432–435; *Зиновьев А. А.* Основы логической теории научных знаний. М., 1967.

1. Временные примитивы

Для того, чтобы успешно формализовать тот или иной временной контекст, нам потребуются временные примитивы, т. е. такие элементы структуры времени, с которыми может быть ассоциирована истинность или ложность овремененных высказываний. Иногда на основе временных примитивов могут быть получены временные сущности, синтаксически более сложные в рамках данной теории. В качестве временных примитивов исследователи берут точки, интервалы (периоды), либо точки совместно с интервалами.

Перед тем как перейти к обзору временных примитивов, аргументов в пользу того или иного их выбора и способов порождения составных временных сущностей, отметим, что в некоторых временных логиках вопрос о примитивах может быть решен неявно. К таким логикам относятся модальные временные логики Прайора с операторами *P*, *F*, *H*, *G*. Базовые операторы *Pa* и *Fa* читаются как «было/будет так, что *a*», причем *a* истинно по крайней мере в одной точке в прошлом (в будущем). Производные операторы *Ha* и *Ga* читаются как «всегда было/будет так, что *a*», причем *a* истинно на соответствующем бесконечном временном интервале (временная ось, как правило, считается бесконечной в обе стороны). Истинность на ограниченных временных интервалах моделируется с помощью комбинации четырех операторов. В связи с тем, что в исследованиях Прайора значительное внимание уделялось решению философских и технических проблем, вопрос о том, какие типы высказываний мы можем подставлять вместо высказывательной переменной *a*, остался несколько в стороне. Дискуссия о временном примитиве, неизбежная при создании первопорядковых и овеществленных временных логик, связана также и с решением вопроса о типах формализуемых овремененных высказываний (о типах см. 5.2).

1.1. Точки. Представление о времени как о множестве временных точек имеет, пожалуй, исторический приоритет и может быть прослежено как минимум в апориях Зенона. В современной логике точечно-ориентированные семантики появились на рубеже 60–70-х годов в ситуационных исчислениях, в программе Бертрама Брюса «Chronos»[9], в системе Кана и Горри «Time specialist»[10] и по сей день продолжают развиваться.

Говоря о примитивах в системах представления временной информации, не следует смешивать примитив как синтаксическую основу для конструирования более сложных объектов (например, для построения интервалов из точек) и примитив как основной элемент временной структуры, на котором

---

[9] *Bruce B.* A Model for Temporal References and Its Application in a Question Answering Program // Artificial Intelligence. N 3 (1972). P. 1–25.

[10] *Kahn K., Gorry G.* Mechanizing Temporal Knowledge // Artificial Intelligence. N 9 (1977). P. 87–108.

получают свое истинностное значение формулы. Проиллюстрируем различие между синтаксической и семантической ролями точки в ранних точечно-ориентированных системах в зависимости от трактовки базовых понятий.

Базовыми понятиями ситуационного исчисления являются ситуация и действие. По Маккарти и Хэйсу[11], ситуация — это взятое в определенном ракурсе и исчерпывающе представленное состояние мира на данный момент, мгновенный «фотоснимок» действительности, поэтому временным примитивом — как в синтаксическом, так и в семантическом отношении — является точка. Поскольку действия в ситуационном исчислении — это функции из одного состояния в другое, теория «жизнеспособна» только в тех областях, где в одно время может происходить одно событие[12]. Кроме того, данный подход является прикладным и не может претендовать на философски адекватное представление действительности, так как любое, сколь угодно короткое событие имеет ненулевую длину, а стало быть, высказывания о событиях могут быть истинными лишь на интервалах, а не на точках[13]. В других определениях ситуация — это временной интервал между изменяющими мир действиями[14]. Поэтому необходимо введение временных интервалов, на которых могут получать истинностное значение события.

Весьма распространены системы, в которых высказывания истинны на ненулевых временных интервалах или на интервалах, к которым применены модальные операторы, но сами интервалы не являются изначально данными сущностями, а конструируются как пары временных точек, принадлежащих строго или нестрого упорядоченному множеству точек временной оси. Такие логики называют точечно-ориентированными интервальными логиками. Например, Хальперн и Шохэм в логике HS[15] трактуют упорядоченную пару точек $<s,t>$ как замкнутый интервал, состоящий из всех точек между s и t. Логику HS можно рассматривать как расширение точечной модальной временной логики, в которой понятие удовлетворения на состоянии ($s \models$) заменяется понятием удовлетворения на интервале, или упорядоченной паре состояний

---

[11] *McCarthy J., Hayes P. J.* Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence // Machine Intelligence. N 4 (1969). P. 463–502.

[12] *Allen J. F.* Maintaining Knowledge about Temporal Intervals // Communications of the ACM. 1983. November. Vol. 26. N 11. P. 833.

[13] См. исследования: *Capek M.* The Fiction of Instants. P. 332–344; *Magnan A.* Cinematographie jusqu'a 12000 vues par seconde (avec application au vol des insects). Paris, 1932.

[14] *Belleghem K., Denecker M, De Schreye D.* Combining Situation Calculus and Event Calculus // Proc. of the 12th International Conference on Logic Programming (ICLP). Kanagawa (Japan), 1995. P. 83–97; *Pinto J., Reiter R.* Temporal Reasoning in Logical Programming: a Case for the Situation Calculus // Proc. of the 10th International Conference on Logic Programming (ICPL) (June 21–24). Budapest. 1993. P. 203–221.

[15] *Halpern J. Y., Shoham Y.* A Propositional Modal Logic of Time Intervals // Journal of the ACM. 1991. Oct. N 38 (4). P. 935–962.

(<s,t> ⊧). В терминах соотношений пар точек, определяющих интервалы, описываются разнообразные отношения между интервалами (см. 2.3).

1.2. Интервалы. В некоторых представлениях временной информации точка отсутствует и как семантический, и как синтаксический примитив. Дж. Ф. Аллен приводит следующие аргументы в пользу чисто интервального подхода. Во-первых (об этом говорилось чуть выше), точки всегда являются абстракциями, и мгновенные события можно представить с помощью очень коротких интервалов. Во-вторых, временная информация не всегда является полной; в ежедневной практике она, как правило, представлена частично, а следовательно, логик вынужден вводить во временную характеристику события разнообразные «допуски». Наряду с высказываниями типа «Мы обнаружили письмо ровно в полдень» мы можем сказать и «Мы обнаружили письмо вчера». Если в первом случае мы имеем дело с временной точкой, то во втором — с довольно широким (относительно длительности самого события) интервалом с точно известными границами. Но нередко требуется записать временную информацию о событии, выраженную еще менее четко и/или относительно другого события. Например (примеры 2–3 принадлежат Дж. Ф. Аллену[16]):

Он мог заглянуть сюда в четверг после шести или сегодня утром.
Мы обнаружили письмо, пока Джон отсутствовал.
Мы обнаружили письмо после того, как он принял решение.
Студент может начать сдавать экзамен не раньше, чем преподаватель начнет его принимать.

Как видим, вне зависимости о того, является событие мгновенным или длительным, временная информация имеет интервальный характер. В силу этого Аллен предложил отказаться от введения большого количества переменных для возможных границ интервалов и оперировать с интервалами напрямую, определив на их множестве ряд отношений.

Наконец, в-третьих, введение точек в качестве примитива может повлечь нежелательные семантические затруднения, такие, как проблема разделяющего мгновения[17]. Ван Бентем указывает, что проблема возникает только на плотной (по Дедекинду) временной оси при условии введения означивания на точках наряду с интервалами[18]. Решение проблемы с помощью определения интервалов как упорядоченных четверок <p_1, p_2, l, r>, где p_1, p_2 — граничные

[16] *Allen J. F.* Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. P. 834.

[17] Подробнее о проблеме см.: *Benthem J. van.* Points on Time // Electronic News Journal on Reasoning about Actions and Change. Vol. 2 (1998); *Øhrstrom P., Hasle P. F. V.* Temporal Logic from Ancient Ideas to Artificial Intelligence; *Ma J., Hayes P.* Primitive Intervals versus Point-Based Intervals: Rivals or Allies? // The Computer Journal. 2006. Vol. 49. N 1. P. 32–41; *Шапчиц П. А.* Грамматический взгляд на проблему разделяющего мгновения // Логико-философские штудии. 2009. Вып. 6. С. 119–124.

[18] *Benthem J. van.* The Logic of Time. Reidel, 1982. C. 5.

точки, а l, r — типы (открытый или закрытый) соответственно левой и правой точек, предложили Ма и Хэйс[19]. В той же работе предлагается придать точкам и интервалам равный статус (так, точка определяется как интервал $<p_1, p_1, c, c>$ с совпадающими закрытыми границами).

Проблема представления точек в интервальных системах решается, как правило, определением точек как максимальных гнезд интервалов[20]. Например, точке начала и окончания интервала I сопоставляется максимальное множество всех интервалов, находящихся в любом из соответствующего набора интервальных отношений (например, «пересечения») к I.

2. Временны́е отношения и ограничения

2.1. Временны́е отношения. Опишем основные временны́е отношения между точками и/или интервалами, используемые для представления временной информации. Хорошо изучено отношение предшествования, определенное на множестве временны́х точек. Это отношение используется в системах Прайора и подавляющем большинстве последующих временно-логических систем (точечные системы описаны в 3.1). На множестве точек наряду с отношением «раньше/позже» может быть определено отношение неразличимости, которое в отличие от «раньше/позже» является нетранзитивным. Эти отношения предложены японским логиком С. Сираиси в его аксиоматической теории[21], направленной на преодоление апорий Зенона и проясняющей возможность непротиворечивого представления движения. Данная теория уточняется в работе А. А. Ивина[22].

В той же работе Ивин рассматривает возможные интервальные интерпретации отношения «раньше/позже»: сильное (или строгое), слабое и промежуточные отношения предшествования[23]. Строгой оценкой является высказывание «Сократ жил раньше Гегеля», так как каждый из моментов времени, прожитых Сократом, предшествовал каждому из моментов, прожитых Гегелем. Слабое предшествование менее информативно: событие A слабо предшествует событию B, если и только если существуют два момента времени a и b, такие, что $a < b$ и a принадлежит интервалу, на котором имеет место событие A, а b принадлежит интервалу, на котором имеет место стобытие B[24].

В системах планирования почти сто лет широко используются так называемые «*диаграммы Ганта*» (Gantt charts); на их основе создана известная

[19] *Ивин А. А.* Логические теории времени // Вопросы философии. 1969. № 3.
[20] *Allen J. F., Hayes P. J.* A Common-Sense Theory of Time // Proc. of the 9th IJCAI, 1985. P. 528–531.
[21] *Shiraishi S.* The Structure of Continuity of Psychological Experiences and Physical World // The Science of Thought (Tokyo). 1954. N 1.
[22] *Ивин А. А.* Логические теории времени.
[23] Там же. С. 119.
[24] Там же.

программа Microsoft Project. Диаграммы Ганта упорядочивают информацию о зависимостях процессов с помощью четырех типов связей между задачами:

1. Связь «окончание–начало» («finish-to-start», FS): задача B не может начаться до тех пор, пока не выполнена задача A. Это наиболее распространенный тип связи. В качестве примера приведем такой: для того, чтобы начать возводить стены дома (задача B), необходимо закончить устройство фундамента (задача A).

2. Связь «начало–начало» («start-to-start», SS): задача B не может начать реализовываться до тех пор, пока не началось осуществление задачи A. Например, студент не может начать сдавать экзамен до тех пор, пока экзаменатор не начнет его принимать.

3. Связь «окончание–окончание» («finish-to-finish», FF): задача B не может завершиться до тех пор, пока не завершится задача A. Например, отопительный сезон не может завершиться до тех пор, пока не потеплеет.

4. Связь «начало–окончание» («start-to-finish», SF): задача B не может закончиться до тех пор, пока не начнется решение задачи A. Этот тип связи вызывает некоторые вопросы. Очевидно, хорошим примером является такой: часовой не может оставить свой пост (завершить задачу B) до тех пор, пока его сменщик не заступит на дежурство (приступит к выполнению задачи A). Но тогда исключается возможность выполнения задачи A еще до выполнения задачи B или одновременно с ней, что не противоречило бы определению, но несовместимо с нашим примером.

Другая схема рассуждений о планах, PERT, позволяет вычислять критическое время выполнения того или иного процесса в рамках сложных взаимосвязанных программ. В сетях PERT (Program Evaluation and Review Technique) главным типом отношения между процессами является аналог отношения «start-to-start». В статье Дж. Ф. Аллена[25] рассматривается одна из модификаций метода PERT. Представления, базирующиеся на идее длительности, предполагают задание отношения частичного порядка в некруговом направленном графе, имеющем выраженные начало и конец. Процессы обозначаются дугами, а узлы, скрепляющие дуги, — это смены процессов. Дуги помечаются минимальной длительностью процессов, указанной в условных временн*ы*х единицах, которая и является нашей исходной информацией. Вычислив кратчайшее время выполнения всей программы, мы можем, осуществляя обратное движение, вычислить и максимально допустимое (не влияющее на время выполнения программы) время для каждого процесса.

2.2. Система временн*ы*х отношений. В целом связи между задачами не могут быть успешно выражены с помощью логических отношений между ин-

[25] *Allen J. F.* Time and Time Again: The Many Ways to Represent Time // International Journal of Intelligent Systems. 1991. N 6(4). P. 341–355.

тервалами, поскольку ориентированы в будущее и имеют динамический характер. Логические же отношения могут рассматриваться «sub specie aeternitate». Одной из первых полных систем временных отношений на интервалах стала система Бертрама Брюса, разработанная в статье «Модель временного отнесения и ее применение в программе для ответа на вопросы»[26]. В ней Брюс предложил три существенных новшества: 1) ввел полную систему точечно-интервальных отношений для временной логики; 2) эффективно формализовал схему Рейхенбаха для произвольного количества моментов отнесения; 3) предложил программу ввода-вывода временной информации «Chronos», написанную на языке Lisp. Хотя последняя программа была одной из первых и сыграла существенную роль в развитии логических методов в искусственном интеллекте[27], для нашего обзора она не так существенна, как первые два новшества. Формализация схемы Рейхенбаха будет рассмотрена в 5.1., посвященном логике грамматических времен; здесь же мы представим схему интервальных временных отношений[28].

Определение 1. *Временная система* — это упорядоченная двойка ($time$ $\leq$), где $time$ — это множество, элементы которого называются *временными точками*, а $\leq$ — это отношение частичного порядка, заданное на $time$.

Определение 2. *Прошедшее* и *будущее* — это функции из множества $time$ в подмножества множества $time$, определенные следующим образом:

прошедшее: past(x) = $\{z|z<x\}$;

будущее: future(x) = $\{z|z>x\}$.

Определение 3. *Цепь* — это множество S, такое, что для каждого x и y, принадлежащих S, имеет место $x\leq y$ или $y\leq x$. Это значит, что S линейно упорядочено, а любые два элемента цепи сравнимы. Множество, которое не упорядочено линейно, имеет *ветви*.

Определение 4. *Началом* подмножества множества $time$ является его наибольшая нижняя граница, *концом* подмножества множества $time$ является его наименьшая верхняя граница.

Подмножество множества $time$ необязательно имеет несколько нижних или верхних границ.

Определение 5. *Временной сегмент* $S\subseteq time$ — это цепь, такая, что для каждого $x\in time$, если существуют y, $z \in S$ такие, что $y\leq x$ и $x\leq z$, и если $\{x\}\cup S$ — это цепь, то $x\in S$.

---

26 *Bruce B.* A Model for Temporal References and Its Application in a Question Answering Program. P. 1–25.

27 *Pani A. K., Bhattacharjee G. P.* Temporal Representation and Reasoning in Artificial Intelligence: A Review // Mathematical and Computer Modelling. N 34 (2010). P. 66.

28 *Bruce B.* A Model for Temporal References and Its Application in a Question Answering Program. P. 5–7.

Цепь является более абстрактным понятием, нежели временной сегмент, и позволяет анализировать «искусственные» последовательности, состоящие, к примеру, только из целочисленных временных точек. В целях формализации грамматических времен цепи не используются, поскольку длительность события может быть приписана временному сегменту, но не цепи.

На временных сегментах задаются отношения, с помощью которых могут быть выражены грамматические времена.

Определение 6. Пусть ***A*** и ***B*** — временные сегменты с началом и концом (a_1,a_2) и (b_1,b_2) соответственно, содержащиеся в линейно упорядоченном подмножестве ***T*** множества *time*. Тогда можно выразить следующие бинарные отношения на временных сегментах:

«до» — *before* (A, B) т. и т. т. $a_2 < b_1$,
«в течение» — *during* (A, B) т. и т. т. $b_1 \leq a_1 \wedge a_2 \leq b_2 \wedge \sim(a_1 = b_1 \wedge a_2 = b_2)$,
«одновременно» — *same-time* (A, B) т. и т. т. $a_1 = b_1 \wedge a_2 = b_2$,
«пересекается» — *overlaps* (A, B) т. и т. т. $a_1 < b_1 \wedge b_1 < a_2 \wedge a_2 < b_2$,
«после» — *after* (A, B) т. и т. т. *before* (B, A),
«содержит» — *contains* (A, B) т. и т. т. *during* (B, A),
«пересечено» — *overlapped* (A, B) т. и т. т. *overlaps* (A, B).

2.3. Интервальная логика. Данные временные отношения стали основой для интервальной логики Аллена. Хотя Аллен и поясняет смысл интервальных отношений в терминах граничных точек интервалов, базовыми понятиями выступают тем не менее сами интервальные отношения[29]. Выделим два отличия от системы Брюса: 1) отношение сформулировано только на интервалах (у Брюса — на точках и интервалах); 2) отношения Брюса «до» и «после» уточняются с помощью введения отношения «стыкуется» (*meets*), которое в терминах Брюса определим так: *meets* (A, B) т. и т. т. $a_2 = b_1$. Определение отношений «пересекается»/«пересечено» и «до»/»после» с использованием строгого предшествования точек не позволяет подвести отношение «стыкуется» ни под одно из этих отношений. На основе 13-интервальных отношений Аллена создавались и модальные временные логики, трактующие отношения как модальные операторы (сохраняющие «нечеткость» временной информации)[30]. Информация о соотношении интервалов представляется лленом в виде сети интервальных ограничений, содержащей информацию о том, какие отношения между интервалами возможны, а какие — нет. Сеть состоит из узлов (им соответствуют интервалы) и соединяющих их дуг, которым сопоставляются списки возможных интервальных отношений. Между

[29] *Allen J. F.* Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. P. 834–835.
[30] *Halpern J. Y., Shoham Y.* A Propositional Modal Logic of Time Intervals // Journal of the ACM. 1991. Oct. N 38:4. P. 935–962.

парами интервальных отношений вида $Rel_1(A,B)$ и $Rel_2(B,C)$, где Rel — тип отношения, а A, B, C — интервалы (узлы), возможны транзитивные отношения, на основании которых можно получить $Rel_3 \vee ... \vee Rel_n(A,C)$. Таблица, описывающая эти транзитивные отношения, и алгоритм расширения сети интервальных ограничений представлен Алленом в его статье.

Вилэн и Каутц применили алгоритм расширения ограничений также и к линейным временным структурам на точечной временной оси[31]. Они отталкивались от двух базовых отношений между точками — предшествования и равенства: before(p_1,p_2) и equals(p_1,p_2). По аналогии с предложенной Алленом таблицей транзитивности для определения новых отношений между интервалами Вилэн и Каутц вводят свою таблицу транзитивности для точек:

	before(y,z)	equals(y,z)	after(y,z)
«предшествует» — before(x,y), <	<	<	<,=,>
«равно» — equals(x,y), =	<	=	>
«следует за» — after(x,y), >	<,=,>	>	>

3. Структура времени[32]

3.1. Точечные структуры времени. Потоки времени[33]. Рассмотрим основные понятия и разновидности структур времени (для простоты — применительно к временной логике высказываний). В качестве семантического примитива мы возьмем точку. Интервальные структуры времени представлены в 4.2.

Временная модель, или *временная структура*, состоит из трех частей: множества временных точек; отношения порядка, структурирующего множество этих временных точек; означивания, приписывающего каждому высказыванию множество временных точек, на которых оно истинно. Первые два элемента часто называются *потоком времени*, а все три — *временной структурой*.

Потоком времени называется пара $(T,<)$, где T — это непустое множество, а $<$ — антирефлексивное и транзитивное бинарное отношение на T. T представляет собой множество временных точек, а $<$ — это отношение «раньше»/»позже», заданное на T.

Временная структура — это тройка $(T,<,h)$, где $(T,<)$ — поток времени, а h: $L \rightarrow \wp(T)$ — отображение из множества высказываний L в множество

[31] *Vilain M., Kautz H.* Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning // AAAI-86 Proceedings. 1986. P. 377–382.

[32] Общие проблемы построения временной структуры рассмотрены в статье Э. Ф. Караваева: *Караваев Э. Ф.* К вопросу о построении временной структуры // Вестн. СПб. гос. ун-та. Сер. 6. 1992. Вып. 4 (№ 27). С. 20–22.

[33] Будем придерживаться изложения Ходкинсона и Рейнолдса: *Hodkinson I., Reynolds M.* Temporal Logic // Handbook of Modal Logic / Ed. by P. Blackburn et al. Amsterdam; Boston, 2007. P. 656–668.

подмножеств T. При этом высказывание p истинно во время $t \in T$, если $t \in h(p)$ и ложно во время $t \in T$, если $t \notin h(p)$. Временная структура может быть рассмотрена как структура Крипке (возможным миром будет временная точка, а отношением достижимости — отношение «раньше»/»позже».

В зависимости от характера элементов множества T и свойств заданного на них отношения выделяются различные классы потоков времени. Поток времени $(T,<)$ называется *линейным*, если для любых двух временных точек истинно, что одна предшествует другой. Таким образом, $(T,<) \vDash$ «$x,y(x=y \vee x<y \vee y<x)$. Линейные потоки времени могут обладать рядом дополнительных свойств: дискретности, непрерывности, полноты по Дедекинду и т. д. Кроме того, множество временных точек T может быть принято изоморфным множеству натуральных, целых, рациональных или действительных чисел. На всех этих множествах может быть задано отношение строгого порядка.

Выделяются и нелинейные потоки времени. Поток времени $(T,<)$ называется *деревом*, если для каждого $t \in T$ множество $\{u \in T\colon u<t\}$ линейно упорядочивается отношением $<$. *Ветвью* дерева $(T,<)$ называется максимальное линейно упорядоченное подмножество T. В дереве прошлое любой временной точки линейно; однако будущее может быть и нелинейным, так как через любую временную точку могут проходить несколько ветвей.

3.2. Ветвящееся время. Термин «ветвящееся время» часто используется для транзитивных и антирефлексивных, но необязательно линейных потоков времени. Свойство линейности потока времени гарантирует сравнимость всех его временных точек, а шире — временных элементов, на которых задано это отношение. Отрицание линейности, возможно, при условии добавления других свойств, позволяет моделировать такие свойства времени, как параллельность историй или даже временные «петли».

Весьма распространенной является узкая и философски обоснованная трактовка термина «ветвящееся время». Она подразумевает ветвление времени в направлении будущего и сохранение линейности в прошлом (будущее «открыто» и может предоставлять различные варианты развития событий; прошлое же уже зафиксировано). Эта философская мотивация иногда выражается в том, что ветви потоков времени называются историями[34] (а также цепями[35], хрониками[36] и путями (paths)).

---

[34] *Bennett B., Galton A. P.* A Unifying Semantics for Time and Events // Artificial Intelligence. N 153 (2004). P. 13–48; *Sabbadin M., Zanardo A.* Topological Aspects of Branching-Time Semantics // Studia Logica. N 75 (2003). P. 271–286.

[35] *Bruce B.* A Model for Temporal References and Its Application in a Question Answering Program. P. 1–25.

[36] См.: *McDermott D.* A Temporal Logic for Reasoning about Processes and Plans. RR 196, Computer Science Department. New Haven, 1981; см. также: Cognitive Sci. 1982. N 6 (2).

Артур Прайор рассматривает семантику, позволяющую эффективно рассуждать о будущих случайных событиях и потому названную им оккамистской[37]. Особенность этой семантики заключается в том, что высказывания получают свое истинностное значение не на точках, а на парах (t,h), где t — временная точка, а h — история, которая содержит точку t. Временные операторы для будущего и для прошедшего интерпретируются как линейные временные операторы на рассматриваемой истории.

На языковом уровне идея временного ветвления может быть выражена посредством оператора возможности, который читается как «(высказывание истинно) в некоторой истории, проходящей через рассматриваемый момент»[38]. Эта идея выражается в предложенном Прайором разделении на локальное и нелокальное означивание. Допустим, $(T,<)$ — дерево. Тогда отображение h: $L \rightarrow \wp\,(T)$ называется *локальным* означиванием, а отображение h: $L \rightarrow \wp\,\{(b,x)|x\in b\in B(T,<)\}$ называется *нелокальным* означиванием.

Такие означивания обсуждаются с точки зрения наличия или отсутствия некоего «намека на будущее»[39]: должна ли истинность высказывания в некий данный момент зависеть от того, какой из возможных будущих сценариев наступает? Структуры с нелокальным означиванием позволяют высказываниям сохранять «связь» с будущим. Отметим, что данное различение в способе означивания может оказаться полезным и при исследовании логических свойств предикатов в продолженном времени английского глагола: высказывание «He is winning the race» («Он выигрывает гонку») получает свое истинностное значение только нелокально.

Вариантом семантики для неопределенности в будущем является семантика деревьев со связкой. В ней оператор возможности пробегает не по множеству всех историй, а по ограниченному их подмножеству (связке). Множество B ветвей дерева $(T,<)$ называется *связкой* (bundle) на $(T,<)$, если и только если для всех $x\in T$ имеется ветвь $b\in B$, такая, что $x\in b$. Если B — связка на дереве $(T,<)$, то $(T,<,\mathrm{B})$ называется *деревом со связкой* (или *фреймом*) и, если h — означивание, то $(T,<,\mathrm{B},h)$ — это структура со связкой. Если в связку входят все ветви дерева $(T,<)$, то такая связка называется *полной*[40].

На деревьях со связкой также могут быть определены разнообразные логики (они будут перечислены чуть ниже). Введение ветвления позволяет разграничивать два способа означивания высказываний в рамках некоторой временной

---

[37] *Prior A. N.* Past, Present and Future. Oxford, 1967.

[38] *Zanardo A.* Branching-Time Logics with Quantification over Branches: the Point of View of Modal Logic // The Journal of Symbolic Logic. Vol. 61. N 1. 1996. Mar. P. 1.

[39] Ibid.

[40] *Hodkinson I., Reynolds M.* Temporal Logic. P. 663.

структуры: на временн*ы*х точках, принадлежащих некоторой ветви, и просто на временн*ы*х точках. Понятно, что одна и та же временн*ая* точка, расположенная на разных ветвях, соответствует разным возможным мирам, а стало быть, в ней могут быть истинны или ложны различные высказывания. Поэтому для означивания необходима информация о ветви, которой принадлежит точка. В случае же последнего (независимого от ветви) способа означивания в рамках ветвящейся временн*ой* структуры удобно использовать введенное понятие связки.

В работе Саббадин и Занардо[41] свойства деревьев и деревьев со связками выражены в терминах топологии. Множеству историй древесной структуры $(T,<,h)$, трактуемых как максимальные линейно упорядоченные множества, сопоставлена топологическая структура. Доказано, что введенное в новое понятие топологической истинности для оккамовских временных формул оно эквивалентно понятию истинности на деревьях со связками.

Хансом Кэмпом была предложена двухмерная структура для временн*ы*х ветвей[42]. *Фрейм Кэмпа* — это тройка $(K,<,\equiv)$, где K — множество точек, $<$ — союз линейных порядков на K, $\equiv$ — отношение эквивалентности точек, принадлежащих общим отрезкам различных историй.

Джоном Берджессом разработана семантика для выражения философского индетерминизма[43]. Индетерминисты признают одно прошлое и много равновероятных будущих времен, для них время подобно борхесовскому «саду ветвящихся тропинок». Так называемые «оккамисты» утверждают, что если высказывание p связано со случайностью в будущем, то Fp («будет так, что p») уже является истинным или ложным, однако мы не можем знать, по какому из возможных сценариев пойдет актуальное будущее. Необходимость будущего события понимается как его неотвратимость, т. е. независимость истинности высказывания об этом событии от сценария будущего.

Время традиционно отображается в виде дерева. *Дерево* — это антирефлексивный и транзитивный фрейм $\mathfrak{X} = (X, R)$, такой, что предшественники любого из элементов линейно упорядочены. Для $x \in X$ x-ветвь — это максимальная цепь (линейно упорядоченное подмножество) в $\{y: xRy\}$. Для x-ветви B и $y \in B$ *ограничение* B_y — это y-ветвь $\{z \in B: yRz\}$, а для yRx *расширение* By — это y-ветвь $B \cup \{x\} \cup \{z: yRz \ \& \ zRx\}$. $B \subseteq X$ — ветвь, если она x-ветвь для некоторого x; этот уникальный x может быть обозначен как x_B.

---

[41] *Sabbadin M., Zanardo A.* Topological Aspects of Branching-Time Semantics. P. 271–286.

[42] См.: *Thomason R.* Combinations of Tense and Modality // Handbook of Philosophical Logic / Ed. by D. M. Gabbay, F. Guenthner. Vol. II: Extensions of Classical Logic. Reidel; Dordrecht, 1984. P. 135–165; *Reynolds M.* Axioms for Branching Time // Journal for Logic and Computation. N 12 (2002). P. 679–697.

[43] *Burgess J. P.* Logic and Time // Journal of Symbolic Logic. N 44 (1979). P. 566–582.

Допустим, x представляет собой настоящий момент. Тогда множество x-ветвей — это множество возможных «будущих». Истинность высказывания о будущем зависит от того, какую из x-ветвей мы считаем реализуемой в будущем.

Означивание атомарных высказываний аналогично приведенному выше, для сложных высказываний оно индуктивно расширено в соответствии с семантикой логических союзов[44]. Формула a *выполнима*, если $V(\alpha)\neq\varnothing$ в некотором означивании V. Введенное выше понятие связки используется Берждессом для определения отношения понятия строгого выполнения. Формула α является *псевдовыполнимой*, если она выполнима на некоторой связке $\mathfrak{S}$. Формула α *сильно выполнима*, если ее отрицание не является, по меньшей мере, псевдовыполнимым. Для множества сильно выполнимых формул можно доказать разрешимость. Рекурсивная разрешимость индетерминистской («пирсовой») временной логики доказана Берджессом[45]. Вопрос о конечной аксиоматизируемости теории оставлен открытым[46] (она рекурсивно аксиоматизируема). Обсуждение работы Берджесса и проблем индетерминизма с языковой точки зрения содержится в диссертации Вернера[47].

3.3. Циклическое время. Некоторые авторы указывают на невозможность логического примирения идей цикла и порядка[48]. Однако нетрудно придумать модель времени, в которой сосуществовали бы эти две идеи: на такую возможность указывает существование календаря, где дни недели чередуются бесконечно и циклически, но сами недели могут быть упорядочены. Повседневно используемая нами система времени может быть геометрически ассоциирована с несколько раз свернутой в спираль нитью (первый «уровень» свертывания обозначает секунды, второй — минуты и т. д.). Формально такая временная метрика может быть представлена в виде упорядоченных n-ок временных аргументов, где n — количество уровней (или разрядов) времени. Циклический характер метрики будет проявляться в том, что за последним элементом области определения любого аргумента, кроме последнего, будет следовать первый элемент данного аргумента. В такой метрике количество значений каждого аргумента, за исключением последнего, будет конечным (например, 60 секунд, 60 минут, но бесконечное количество лет), а особое правило позволит переводить n-аргументную метрику в одноаргументную и обратно.

В рамках одноаргументной метрики циклическая временная логика будет неадекватной, поскольку в ней будут равно истинными несовместимые

[44] Ibid. P. 575.
[45] *Burgess J. P.* Decidability for Branching Time // Studia Logica. N 39 (1980). P. 203–218.
[46] *Burgess J. P.* Logic and Time. P. 576.
[47] *Werner T. A.* Deducing the Future and Distinguishing the Past: Temporal Interpretation in Modal Sentences in English: PhD diss. New Brunswick; New Jersey, 2003. May.
[48] *Анисов А. М.* Свойства времени // Логические исследования. 2001. № 8. С. 7.

утверждения о соотношении временных точек. Каждая временная точка *a* окажется и до, и после некоторой другой точки *b*. Любая точка *a* окажется после любой точки *b* (допустим, *a* раньше *b* внутри цикла; тогда *a* после или совпадает с первой точкой цикла, но она после последней точки цикла, а значит, и после *b*). Как видим, одной из причин тривиальности такой временной теории явилось использование принципа транзитивности.

Некоторые пути преодоления тривиальности циклической логики описаны в исследовании А. Н. Прайора[49]. В работе[50] представлена модель времени (T.ϕ), где T — множество временных точек, а ϕ — тернарное отношение «находиться между»; y находится между x и z тогда и только тогда, когда при движении по временной оси от x к y мы не встречаем z. Понятно, что вышеописанное парадоксальное рассуждение невозможно при замене бинарного отношения «раньше» тернарным «между»[51].

Вариант без введения тернарного отношения предложен в статье Рейнолдса[52]. Бинарное отношение $<$ предлагается рассматривать как нетранзитивное, а $y<x$ означает: «y имеет место несколько позже x, но не позже, чем на полукруг циклического времени». Благодаря замене свойства абсолютной транзитивности свойством транзитивности в будущем и транзитивности в прошлом логика циклического времени становится содержательно осмысленной. Свойства антирефлексивного, антисимметричного и нетранзитивного бинарного отношения $<$ задаются Рейнолдсом следующим образом:

линейный порядок: $\forall xy[(x<y)\vee(x=y)\vee(y<x)]$,
антисимметричность: $\forall xy\neg[(x<y)\wedge(y<x)]$,
транзитивность в будущем: $\forall xyzu[((x<y)\wedge(x<z)\wedge(x<u)\wedge(y<z)\wedge(z<u))\rightarrow(y<u)]$,
транзитивность в прошлом: $\forall xyzu[((y<x)\wedge(z<x)\wedge(u<x)\wedge(z<y)\wedge(z<u))\rightarrow(y<u)]$,
нетранзитивность: $\exists xyz[(x<y)\vee(y<z)\vee(z<x)]$.

Отметим также, что особый интерес представляет циклическая временная логика, в которой циклически повторяются не временные точки или возможные миры, а лишь отдельные события или процессы. Данное направление развивается преимущественно в рамках теории действия.

3.4. Интервальная структура времени. Об описанных выше линейных структурах можно рассуждать, приписывая высказываниям истинностные

[49] *Prior A. N.* Past, Present and Future. P. 59–76.

[50] *Huntington E. V.* A New Set of Postulates for Betweenness, with Proof of Complete Independence // Transactions of American Mathematical Society. N 26 (1924). P. 257–82.

[51] Этот подход и другие варианты представления отношения «между» и отношения сравнимости обсуждаются: *Düntsh I., Urquhart A.* Betweenness and Comparability Obtained from Binary Relations // Lecture Notes in Computer Science. Vol. 4136 (2006). S. 148–161.

[52] *Reynolds M.* Axiomatisation and Decidability of F and P in Cyclical Time // Journal of Philosophical Logic. N 23 (1994). P. 197–224.

значения не только на точках, но и на временных интервалах. Однако существует немало случаев, в которых для адекватного представления высказывания требуется исключительно интервальное означивание. Временно-логические системы, в которых представлены интервалы, можно условно разделить на три типа в зависимости от синтаксического примитива: точечно-ориентированные[53], чисто интервальные[54] и смешанные[55].

Помимо этих альтернатив при создании временной структуры потребуется осуществить выбор по стандартным параметрам: линейность или ветвление; дискретность или плотность; ограниченность или бесконечность. Наконец, интервальный характер логики требует ответа на следующие вопросы[56]. (1) Должны ли интервалы включать конечные точки (так как быть закрытыми или открытыми)? (2) Возможны ли неограниченные интервалы? (3) Допустимы ли точечные интервалы? (4) Каково отношение точек и интервалов (если мы допускаем такие объекты, как точки, в нашей интервальной системе)?

Традиционная «заготовка» для точечно-ориентированной интервальной системы представлена в работе Аллена[57]. Зададим строгое частично упорядоченное множество $\mathrm{D}=\langle D,<\rangle$. Тогда *интервалом* в D будет пара $[d_0,d_1]$, такая, что $<d_0,d_1>\in\mathrm{D}$ и $d_0 \leq d_1$ (отношение $d_0 \leq d_1$ определим как $d_0<d_1 \vee d_0=d_1$). $[d_0,d_1]$ называется *строгим интервалом*, если $d_0<d_1$. Интервалы вида $[d,d]$ называются *точечными интервалами.* Точка d принадлежит интервалу $[d_0,d_1]$, если $d_0 \leq d \leq d_1$ (так как конечные точки интервала включены в него).

В теоретико-множественном смысле множество временных точек D выступает как поле отношения «интервальности». Это отношение объемно соответствует множеству упорядоченных пар временных точек D. Выделим свойства бинарного отношения «интервальности». Как для строгих, так и для нестрогих интервалов справедливы свойства (1) рефлексивности (все упорядоченные пары временных точек вида $[d,d]$ являются временными интервалами); (2) транзитивности (из $<d_k,d_m>\in\mathrm{D}$ и $<d_m,d_r>\in\mathrm{D}$ следует $<d_k,d_r>\in\mathrm{D}$); (3) антисимметричности (для любых d_k, d_m из $<d_k,d_m>\in\mathrm{D}$ и $<d_m,d_k>\in\mathrm{D}$ следует $d_k=d_m$). Свойство симметричности, таким образом, справедливо только для точечных интервалов.

---

[53] *Halpern J. Y., Shoham Y.* A Propositional Modal Logic of Time Intervals. P. 935–962; *Bruce B.* A Model for Temporal References and Its Application in a Question Answering Program. P. 1–25.

[54] *Allen J. F.* Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. P. 832–843; *Benthem J. van.* The Logic of Time.

[55] *Ma J., Hayes P.* Primitive Intervals versus Point-Based Intervals: Rivals or Allies? P. 32–41.

[56] *Allen J. F.* Time and Time Again: The Many Ways to Represent Time. P. 13.

[57] Ibid. P. 341–355.

Как было указано выше, отношения частичного порядка должны обладать свойством линейности интервалов (т. е. линейного упорядочения множества точек в интервалах). Запишем это свойство так:

$$\forall x\forall y(x<y\rightarrow\forall z_1\forall z_2(x<z_1<y\wedge x<z_2<y\rightarrow z_1<z_2\wedge z_1=z_2\vee z_2<z_1)).$$

Интервалы могут приниматься и в качестве объектов-примитивов. Дж. Ф. Аллен выделяет 13 базовых отношений на множестве ненулевых интервалов[58]. Поскольку его задачи по преимуществу лежали в области искусственного интеллекта, соответствующего исчисления предложено не было. Как правило же, структура представляет собой множество *I* абстрактных объектов, представляющих собой интервалы, и некоторое отношение на нем. Например, Ван Бентем[59] в качестве базовых отношений принимает '$i<j$' и '$i\sqsubseteq j$' и обратные им. Отношение '$i<j$' означает, что каждая точка из *i* предшествует любой точке из *j*; его можно назвать строгим отношением (соответствует определению Ивина[60]). Отношение '$i\sqsubseteq j$' означает, что каждая точка из *i* находится в *j*.

4. Виды временных логик

4.1. Первопорядковые временные логики. Метод временных аргументов. Принято выделять[61] следующие три типа временных логик (ВЛ): первопорядковые ВЛ, модальные ВЛ и овеществленные ВЛ. В естественнонаучных целях (например, в математических моделях физических процессов) времени часто не приписывается особой роли, и оно выражается лишь в качестве одной из переменных, наряду с пространственными координатами или иными переменными характеристиками объекта[62]. Поэтому первопорядковые ВЛ не всегда выделяются в особое направление во временной логике. Данный подход был первоначально введен в логику Расселом[63], а позднее длительное время использовался как средство представления временных отношений в базах данных[64].

В литературе первопорядковая временная логика также иногда называется *методом временных аргументов* (МВА). В своем обзоре Луис Вила указывает,

[58] *Allen J. F.* Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. P. 832–843.

[59] *Benthem J. van.* The Logic of Time.

[60] *Ивин А. А.* Логические теории времени. С. 119.

[61] См.: *Vila L.* A Survey on Temporal Reasoning in Artificial Intelligence // AI Communications. Vol. 7. Issue 1 (1994). P. 4–28; *Pani A.K., Bhattacharjee G. P.* Temporal Representation and Reasoning in Artificial Intelligence: A Review // Mathematical and Computer Modelling. N 34 (2010). P. 55-80; *Shoham Y.* Temporal Logics in AI: Semantical and Ontological Considerations // Artificial Intelligence. N 33 (1987). P. 89–104.

[62] *Haugh B. A.* Non-Standard Semantics for the Method of Temporal Arguments // Proc. of the 10^{th} IJCAI. Vol. 1 (1987). P. 449–455.

[63] *Russell B.* Principles of Mathematics. London, 1903.

[64] *Ahn I.* Towards an Implementation of Database Management Systems with Temporal Support // Proc. of International Conference on Data Engineering. IEEE Computer Society Press, 1986. P. 374–381.

что данный термин впервые был введен Брайаном Хо: метод заключается в использовании в предикатах дополнительных аргументов для времени и не сводится к какой-либо определенной логике[65]. Метод также допускает в качестве предикатов любые обычные свойства и отношения (например, «быть спящим» или «находиться между»), что предоставляет известную свободу действий для логика. Базовая логическая система для МВА может быть стандартной первопорядковой логикой, ограничением этой логики, логикой более высокого порядка или нестандартной логикой (например, многозначной). Семантические примитивы могут быть как интервалами, так и точками; они могут быть упорядочены различным образом: плотно или дискретно, с ветвлением (в прошлое или в будущее) или без. В МВА может вводиться константа t_0 для выражения настоящего времени. Иные альтернативные пути построения МВА представлены в статье Брайана Хо[66]. Если в МВА используются или определены такие временн*ы*е предикаты, как длительность, начало, окончание события, он может быть весьма выразительным. В то же время недостатком МВА считается то, что выразительной силы все же недостаточно для выражения временн*ы*х аспектов некоторых классов выражений[67]. Метод временн*ы*х аргументов обсуждается[68].

4.2. Модальные ВЛ. Связь времени с алетическими модальностями была замечена уже в античности стоиком Диодором Кроносом. Так называемый «аргумент Диодора», направленный, по-видимому, на поддержку детерминизма, представляет собой трилемму из трех несовместимых высказываний:

(1) Всякое высказывание о прошлом необходимо (истинно).
(2) Невозможное высказывание не может следовать из (или за) возможным.
(3) Существует возможное высказывание, которое не будет истинным ни сейчас, ни в будущем.

В обобщающей работе Острома и Хасле[69] приводятся и обсуждаются возможные реконструкции и решения данного аргумента. Одним из ключевых вопросов является трактовка возможного и необходимого. В основе формализации временн*о*й логики средствами семантики возможных миров лежит понимание возможного как «того, что есть или будет», а необходимого — как «того, что есть и будет всегда».

---

[65] *Vila L.* A Survey on Temporal Reasoning in Artificial Intelligence. P. 4–28.
[66] *Haugh B. A.* Non-Standard Semantics for the Method of Temporal Arguments. P. 451.
[67] *Vila L.* A Survey on Temporal Reasoning in Artificial Intelligence. P. 6.
[68] См.: *McCarthy J., Hayes P. J.* Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence. P. 463–502; *Haugh B. A.* Non-Standard Semantics for the Method of Temporal Arguments. P. 449–455; *Bacchus F., Tenenberg J., Koomen J. A.* A Non-Reified Temporal Logic // Artificial Intelligence. N 52 (1991). P. 87–108.
[69] *Øhrstrom P., Hasle P. F. V.* Temporal Logic from Ancient Ideas to Artificial Intelligence. P. 15–32.

Простейшей модальной ВЛ является пропозициональная модальная логика К4[70]. Он получается рекурсивным добавлением слабой модальности ($\Diamond$, «ромб») к формулам классической логики высказываний: если α и β — формулы, то $\neg\alpha$, $\alpha\wedge\beta$ и $\Diamond\alpha$ — тоже формулы. Формулы получают означивание на временных точках $t\in T$ в структурах $\mathcal{T}=(T,<,h)$, где $(T,<)$ — транзитивный антирефлексивный поток времени (о потоках времени см. 3.1), а $h\colon L \to \wp(T)$ — отображение из множества высказываний L в множество подмножеств T. Запись $\mathcal{T},t \vDash \alpha$ означает, что α истинно в точке t структуры $\mathcal{T}$. Тогда можно рекурсивно определить:

$\mathcal{T},t \vDash p$ т. и. т. т., когда $t\in h(p)$,
$\mathcal{T},t \vDash \neg\alpha$ т. и. т. т., когда $\mathrm{T},t \nvDash \alpha$,
$\mathcal{T},t \vDash \alpha\wedge\beta$ т. и т. т., когда $\mathcal{T},t$ ‘ α и $\mathcal{T},t$ ‘ β,
$\mathcal{T},t \vDash \Diamond\alpha$ т. и т. т., когда существует $s\in T$, такая, что $t<s$ и $\mathcal{T},s \vDash \alpha$.

В соответствии с определением $\Diamond\alpha$ читается как «когда-то будет так, что α».

«Темпоральная» трактовка отношения достижимости на возможных мирах Крипке естественна и продуктивна. Так, в семантике возможных миров можно выразить и «прайоровские» временные модальности[71]. В отличие от К4 «слабый» временной оператор, называемый также связкой (*connective*), будет использован не только для выражения будущего, но и для выражения прошлого:

$\mathcal{T},t \vDash F\alpha$ т. и т.т., когда существует $s\in T$ такая, что $t<s$ и $\mathcal{T},s \vDash \alpha$,
$\mathcal{T},t \vDash P\alpha$ т. и т.т., когда существует $s\in T$ такая, что $s<t$ и $\mathcal{T},s \vDash \alpha$.

Если отношение предшествования временных точек определить рефлексивно, то операторам F и P, определенным на антирефлексивном потоке времени, следует сопоставить их рефлексивные пары:

$\mathcal{T},t \vDash F_{\leq}\alpha$ т. и т.т., когда существует $s\in T$ такая, что $t\leq s$ и $\mathcal{T},s \vDash \alpha$,
$\mathcal{T},t \vDash P_{\leq}\alpha$ т. и т.т., когда существует $s\in T$ такая, что $s\leq t$ и $\mathcal{T},s \vDash \alpha$.

Понятно, что если $\mathcal{T},t \vDash \alpha$, то $\mathcal{T},t \vDash F_{\leq}\alpha$ и $\mathcal{T},t \vDash P_{\leq}\alpha$, так как $t\leq t$.

В качестве сокращений для выражений $\neg P\neg\alpha$ и $\neg F\neg\alpha$ А. Н. Прайор вводит «сильные» модальности $H\alpha$ и $G\alpha$ («всегда было так, что α» и «всегда будет так, что α»). Данные операторы позволяют моделировать не только мгновенные события, но и длительные процессы или состояния. Поскольку их можно трактовать как кванторы всеобщности над множествами точек в прошлом и будущем, для того, чтобы получить определения операторов H и G (и их рефлексивных «двойников» $H_{\leq}$ и $G_{\leq}$), достаточно заменить в приведенных выше определениях утверждение о существовании на утверждение о всеобщности.

Помимо операторов P, F, H, G в зависимости от свойств потока времени в систему могут вводиться и другие операторы, например, оператор следую-

[70] Изложим по: *Hodkinson I., Reynolds M.* Temporal Logic. P. 655–720.
[71] См.: *Prior A. N.* Past, Present and Future; *Караваев Э. Ф.* Основания временной логики.

щего момента. Джон Берждесс, следуя идеям неопубликованной диссертации Ханса Кэмпа, формулирует систему аксиом для временной логики с использованием операторов «since» («с тех пор, как») и «until» («до тех пор, как»)[72]. В другой работе описывается способ задания произвольных временных операторов посредством первопорядковых таблиц[73].

Модальными логиками являются и некоторые интервальные логики. Если в точечных временных логиках ключевым является понятие «настоящего момента», то интервальные модальные логики основываются на идее «данного интервала». Формулы интерпретируются на интервалах, а модальные операторы позволяют связывать данный интервал с другими. Структура времени для интервальных модальных логик представлена в 3.4. Здесь представим формальный синтаксис и семантику системы HS Хальперна–Шохэма[74].

Множество правильно построенных формул формируется из множества Φ_0 пропозициональных переменных, замкнутого относительно конъюнкции, отрицания и модальных операторов. Таким образом, если φ и ψ — формулы, то $\neg\varphi$, $\varphi\wedge\psi$, $\langle A\rangle\varphi$, $\langle B\rangle\varphi$, $\langle E\rangle\varphi$, $\langle Ai\rangle\varphi$, $\langle Bi\rangle\varphi$, $\langle Ei\rangle\varphi$ также являются формулами. Модальные операторы A,B,E соответствуют алленовским «позже», «начинает», «заканчивает»[75], а операторы с «i» в названии — обратным им.

Интерпретацией называется пара $\langle S,V\rangle$. S, это временная структура $\langle T,<\rangle$, где T — множество временных точек, и $<$ — отношение частичного порядка, заданное на T. V — это функция, приписывающая значение пропозициональным переменным, связывая каждую из них с множеством интервалов, на котором они (переменные) истинны. Единственным ограничением, накладываемым на $<$, является «линейность интервалов». В соответствии с этим ограничением для любых двух точек t_1 и t_2 таких, что $t_1<t_2$, множество точек $\{t\colon t_1<t<t_2\}$ является строго упорядоченным. Иными словами, если $t_1<t_3$, $t_1<t_4$, $t_3<t_2$ и $t_4<t_2$, то тогда либо $t_3<t_4$, либо $t_4<t_3$. Приняв это ограничение, можно рассматривать пару $\langle t_1,t_2\rangle$ как закрытый интервал, состоящий из точек, лежащих между t_1 и t_2.

Формулы интерпретируются на парах $\langle t_1,t_2\rangle$, таких, что $t_1,t_2\in T$ и $t_1<t_2$. В интерпретации **M** и на интервале $\langle t_1,t_2\rangle$ формула φ либо истинна, что записывается как $\mathbf{M},<t_1,t_2>\models\varphi$, либо ложна. Истинностные значения формул определяются семантическими правилами, данными ниже (будем опускать обозначение модели **M**). Для удобства определим строгий (т. е. иррефлексивный) вариант отношения $<$: $t_1<t_2=t_1\leq t_2\wedge\neg(t_2\leq t_1)$.

[72] *Burgess John P.* Axioms for Tense Logic I. «Since» and «Until» // Notre Dame Journal of Formal Logic. 1982. Oct. Vol. 23. N 4. P. 367–374.

[73] *Hodkinson I., Reynolds M.* Temporal Logic. P. 672.

[74] Излагаем ее по статье: *Halpern J. Y., Shoham Y.* A Propositional Modal Logic of Time Intervals. P. 935–962.

[75] *Allen J. F.* Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. P. 832–843.

1. Для всех $\varphi \in \Phi_0$, $\langle t_1,t_2\rangle \models \varphi$ тогда и только тогда, когда $\langle t_1,t_2\rangle \in V(\varphi)$.
2. $\langle t_1,t_2\rangle \models \neg\varphi$ т. и т.т., когда неверно, что $\langle t_1,t_2\rangle \models \varphi$.
3. $\langle t_1,t_2\rangle \models \varphi \wedge \psi$ т. и т.т., когда $\langle t_1,t_2\rangle \models \varphi$ и $\langle t_1,t_2\rangle \models \psi$.
4. $\langle t_1,t_2\rangle \models \langle A\rangle\varphi$ т. и т.т., когда существует t_3, такая, что $t_2<t_3$ и $\langle t_2,t_3\rangle \models \varphi$.
5. $\langle t_1,t_2\rangle \models \langle B\rangle\varphi$ т. и т.т., когда существует t_3, такая, что $t_1<t_3$, $t_3<t_2$ и $\langle t_1,t_3\rangle \models \varphi$.
6. $\langle t_1,t_2\rangle \models \langle E\rangle\varphi$ т. и т.т., когда существует t_3, такая, что $t_1<t_3$, $t_3<t_2$ и $\langle t_3,t_2\rangle \models \varphi$.
7. $\langle t_1,t_2\rangle \models \langle Ai\rangle\varphi$ т. и т.т., когда существует t_3, такая, что $t_3<t_1$ и $\langle t_3,t_1\rangle \models \varphi$.
8. $\langle t_1,t_2\rangle \models \langle Bi\rangle\varphi$ т. и т.т., когда существует t_3, такая, что $t_2<t_3$ и $\langle t_1,t_3\rangle \models \varphi$.
9. $\langle t_1,t_2\rangle \models \langle Ei\rangle\varphi$ т. и т.т., когда существует t_3, такая, что $t_3<t_1$ и $\langle t_3,t_2\rangle \models \varphi$.

Формула φ называется выполнимой на классе временных структур $\boldsymbol{A}$, если в некоторой интерпретации $\langle\langle T,<\rangle,V\rangle$, такой, что $\langle T,<\rangle$ принадлежит A, имеет место $\langle t_1,t_2\rangle \models \varphi$ для некоторых $t_1,t_2 \in \mathrm{T}$, таких, что $t_1 \leq t_2$. Формула φ называется истинной на классе временных структур A, если $\neg\varphi$ не является выполнимой на $\boldsymbol{A}$.

На основе введенных в п. 1–9 операторов можно определить, по аналогии с модальной логикой, ряд соответствующих «сильных» операторов по принципу $[X]\varphi = \neg\langle X\rangle\neg\varphi$. Например, если $\langle B\rangle\varphi$ означает, что φ истинна на каком-то начальном интервале, то $[B]\varphi$ означает, что φ истинна на всех начальных интервалах. Тогда $[B]\varphi$ тривиально истинно на точечных интервалах вида $\langle s,s\rangle$, так как у точечных интервалов нет строгих начальных интервалов. Тогда формула [B]false истинна только на точечных интервалах.

С помощью последней формулы мы можем дать определение последним двум операторам:

$[[BP]]\varphi = ((\varphi \wedge [B]\mathrm{false}) \vee \langle B\rangle(\varphi \wedge [B]\mathrm{false})$ — начальная точка интервала;

$[[EP]]\varphi = ((\varphi \wedge [E]\mathrm{false}) \vee \langle E\rangle(\varphi \wedge [E]\mathrm{false})$ — конечная точка интервала.

На базе логики HS можно построить интересное представление множества интервалов в виде пространственной двумерной структуры[76].

Пусть $\mathrm{F}=(T,<)$ — временная структура, где T — множество временных точек, а $<$ — строгое отношение частичного порядка на T. Множество интервалов структуры F — это множество INT(F) всех закрытых интервалов $[s,t]=\{x \in T \mid s \leq x \leq t\}$ в T.

Поскольку любой интервал полностью определяется его началом и концом, то можно породить изоморфизм между INT(F) и $\mathrm{F}^{2NW}=\{(x,y) \in \mathrm{F}^2 \mid x \leq y\}$, где F^2 — Декартово произведение временных точек, упорядоченных по возрастанию. Это значит, что мы можем пространственно представить временную структуру как «северо-западный полуплан» FxF, благодаря чему появля-

[76] *Venema Y.* Expressiveness and Completeness of an Interval Tense Logic // Notre Dame Journal of Formal Logic. 1990. Fall. Vol. 31. N 4. P. 530–532.

ется возможность и пространственной интерпретации операторов. Например, $\langle B \rangle \varphi$ — это «φ истинно в точке, расположенной прямо *над* данной». Иными словами, каждому интервалу (поскольку он определяется лишь двумя точками) можно поставить в соответствие точку на Декартовой координатной плоскости.

В отличие от МВА внедрение модальных ВЛ затруднялось сложностью доказательства теорем[77]. Работы по усовершенствованию техники доказательства отдельно посвящались модальным логикам[78].

4.3. Овеществленные ВЛ. Третьим типом ВЛ являются овеществленные ВЛ, широко распространившиеся в 80–90-е годы (они описаны в работе Дж. Ма и Б. Найта[79]). Идея данного подхода заключается в «овеществлении» овремененных высказываний (т. е. в придании им статуса объектов и соответственно в обозначении таких высказываний с помощью имен для индивидных констант). Эти высказывания подставляются в качестве аргументов в определенные предикаты, выражающие утверждения о том, что данное высказывание имеет место в определенное время или в определенном временном интервале. Примерами овеществленных ВЛ являются ситуационное исчисление[80], логика Мак-Дермотта[81], интервальная логика Аллена[82], исчисление событий (Ковальский и Серго, Шанахан[83]), «time map manager»[84], логика Шохэма[85].

4.3.1. Привлекательность данного подхода в значительной степени объясняется возможностью именовать действия, события, свойства и состояния, оставаясь при этом в пределах логики первого порядка. Это невозможно в рамках мето-

---

[77] *Haugh B. A.* Non-Standard Semantics for the Method of Temporal Arguments. P. 450.

[78] См.: *Fisher M.* A Resolution Method for Temporal Logics // Proc. IJCAI-91. 1991. P. 99–104; *Gabbay D.* Modal and Temporal Logic Programming // Temporal Logics and their Applications / Ed. by A. Galton. London, 1987. P. 197–236.

[79] *Ma J., Knight B.* Representing the Dividing Instant // The Computer Journal. 2003. Vol. 46. N 2. P. 213–222.

[80] См.: *McCarthy J., Hayes P. J.* Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence. P. 463–502; *Pirri F., Reiter R.* Some Contributions to the Metatheory of the Situation Calculus // Journal of the ACM. 1999. N 46(3). P. 325–361; *Shanahan M. P.* Explanation in the Situation Calculus // Proceedings IJCAI-93. 1993. P. 160–165.

[81] *McDermott D.* A Temporal Logic for Reasoning about Processes and Plans; см. также: Cognitive Sci. 1982. N 6 (2).

[82] *Allen J. F.* Towards a General Theory of Action and Time // AI. N 23 (2). 1984. July. P. 123–154.

[83] См.: *Kowalski R., Sergot M.* A Logic-Based Calculus of Events // New Generation Computing. N 4 (1986). P. 67–95; см. также: The Language of Time: A Reader / Ed. by I. Mani, J. Pustejovsky. 2005. P. 217–240; *Shanahan M. P.* A Circumscriptive Calculus of Events // Artificial Intelligence. N 77 (1995). P. 249–284.

[84] *Dean T., McDermott D. V.* Temporal Data Base Management // Artificial Intelligence. N 36 (1987). P. 375–399.

[85] *Shoham Y.* Temporal Logics in AI: Semantical and Ontological Considerations // Artificial Intelligence. N 33 (1987). P. 89–104.

да временных аргументов или в рамках модальной ВЛ. Введение переменных для действий, событий и т. д. позволяет квантифицировать их, а стало быть, выражать такие высказывания, как «Всякий раз после дождя Анна открывала окно» или «Следствия всегда следуют за причинами»[86].

Вместо того чтобы вводить сложные многоаргументные предикаты (например, *on*(*A*,*B*,*I*) — «Предмет *A* находится на предмете *B* на протяжении интервала *I*»), Аллен предлагает разделить временную и пропозициональную информацию, выражая ту же мысль формулой *HOLDS*(*on*(*A*,*B*,),*I*)[87].

Однако главное преимущество такого подхода в другом: он позволяет вводить различные предикаты для истинности на интервалах. В статье «К общей теории действия и времени»[88] Аллен вводит три таких типа без определений, с помощью наборов соответствующих аксиом (мы представляем здесь только три главные «аксиомы-определения»):

$$HOLDS(p,T)\leftrightarrow(\forall t(IN(t,T)\rightarrow HOLDS(p,T)));$$
$$OCCUR(e,t)\&IN(t',t)\rightarrow\sim OCCUR(e,t');$$
$$OCCURRING(p,t)\rightarrow\exists t'(IN(t',t)\&OCCURRING(p,t')).$$

Предикат *HOLDS* выражает истинность состояния, *OCCUR* — события, *OCCURRING* — процесса на некотором интервале, *IN* — это отношение подинтервальности. Аксиома для *HOLDS* постулирует гомогенность состояний: некоторое высказывание *p* о состоянии истинно на интервале *T* т. и т. т., когда на всяком подинтервале *t* данного интервала *T* также истинно высказывание *p*. Аксиома для *OCCUR* указывает на то, что если событие *e* произошло на интервале *t*, то этот интервал является наименьшим, на котором могло произойти событие *e*, иначе говоря, у данного интервала *t* нет такого подинтервала *t'*, на котором истинно *e*. Аксиома для *OCCURRING* представляет собой ослабленную «прямую» часть аксиомы для *HOLDS*: истинность процесса *p* на интервале *t* гарантирует нам истинность того же процесса *p* на некотором его подинтервале *t'* (а возможно, и на всех). Алленовское представление свойств, событий и процессов критиковалось с разных позиций, стимулируя дальнейшие исследования. Андрэ Трюдель, указывая на расплывчатость представления процессов у Аллена, предлагает оригинальный формализм с использованием интегралов для уточнения понятия процесса (им предлагаются восемь трактовок данного понятия)[89].

---

[86] *Bacchus F., Tenenberg J., Koomen J. A.* A Non-Reified Temporal Logic // Artificial Intelligence. N 52 (1991). P. 87–108.

[87] *Allen J. F.* Towards a General Theory of Action and Time. P. 123–154.

[88] Ibid.

[89] *Trudel A.* Representing Allen's Properties, Events and Processes // Applied Intelligence. N 6 (1996). P. 59–65.

4.3.2. Для нужд искусственного интеллекта (представления действий и изменений) было разработано ситуационное исчисление[90]. Ситуация *s* — это полное состояние мира в момент времени; поскольку мир слишком велик для того, чтобы его полностью описать, моделирование мира заключается в указании на существенные факты, в том числе и гипотетические, которые имеют отношение к ситуациям. В ситуационном исчислении осмысленная (частичная) информация о ситуациях передается с помощью *флюент* (от англ. *fluent* — переменная величина, функция). Флюента — это функция, областью значения которой является множество ситуаций *Sit*. Мак-Карти и Хэйс различают пропозициональные флюенты (их область значений — это {*И*, *Л*}) и ситуационные флюенты (их область значений — множество ситуаций *Sit*). В основном пропозициональные флюенты — это значения функций. Например, *raining*(*x*) — это пропозициональная флюента, такая, что *raining*(*x*,*s*) — функция, принимающая значение «истина», если в месте *x* в ситуации *s* идет дождь, и «ложь» — в противоположном случае. Воздействие события на ситуацию описывается посредством ситуационной флюенты *result*(*p*,*a*,*s*): ее значение — это ситуация, представляющая собой результат выполнения агентом *p* действия *a* в ситуации *s*. В последующих версиях ситуационного исчисления информация об агенте стала включаться в информацию о выполняемом действии[91]. Время представлено особой флюентой *time*(*s*), ассоциирующей некоторое время с ситуацией s (приписывание времени ситуации может оказаться необходимым в том случае, если потребуется смоделировать результаты альтернативных цепочек событий). Ма и Найт указывают, что ситуационное исчисление Мак-Карти и Хэйса использует метод временн*ы*х аргументов[92]; это так, но с оговоркой, что овремененными являются не высказывания, а ситуации. С помощью своего языка Мак-Карти и Хэйс выражают операторы, используемые Прайором, и показывают, что ситуационное исчисление богаче, чем любая из рассматриваемых Прайором временн*ы*х логик[93].

4.3.3. Исчисление событий было введено Ковальским и Серго для представления событий и их последствий и рассуждений о них[94]. Авторы использовали термин «исчисление событий», чтобы указать на связь с ситуационным

[90] *McCarthy J., Hayes P. J.* Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence. P. 463–502. Подробное описание ситуационного исчисления на русском языке можно найти в главах 7–9 работы: *Девятков В. В.* Системы искусственного интеллекта. М., 2001.

[91] *Chittaro L., Montanari A.* Temporal Representation and Reasoning in Artificial Intelligence: Issues and Approaches // Ann. Math. Artif. Intell. 2000. N 28 (1–4). P. 6.

[92] *Ma J., Knight B.* Reified Temporal Logics — an Overview // Artificial Intelligence Review. N 15 (2001). P. 190.

[93] *McCarthy J., Hayes P. J.* Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence. P. 463–502.

[94] См.: *Kowalski R., Sergot M.* A Logic-Based Calculus of Events. P. 67–95; см. также: The Language of Time: A Reader. P. 217–240.

исчислением Мак-Карти и Хэйса. Главное различие состоит в том, что ситуационное исчисление имеет дело с «глобальными» положениями дел, а исчисление событий — с «локальными» событиями и периодами времени[95]. (Эммон Бах ввел схожий термин «алгебра событий» в своей одноименной статье[96], посвященной формальному представлению событий, процессов и состояний.) Как и исчисление высказываний, ситуационное исчисление может быть формализовано с помощью хорновских предложений (клауз), обогащенных немонотонным правилом вывода отрицания (не-p) из невозможности вывода p[97].

Базовыми понятиями модели времени в исчислении событий являются событие и свойство. *Свойства* — это флюенты, которые имеют место на протяжении периодов времени, ограниченных *событиями*. Предикат *initiates*(e, p) используется для указания на то, что событие e вызывает появление свойства p.

Аксиоматизация исчисления событий для классической логики предложена и обобщена в работах Р. Миллера и М. Шанаана[98].

4.3.4. Овеществленные логики критикуются с онтологических позиций: общим недостатком овеществленных формализмов является необходимость введения «сортов» для термов, так как следует различать термы, обозначающие реальные объекты, и термы, обозначающие высказывания[99]. Э. Гальтон называет овеществленные логики «философски подозрительными и технически избыточными», поскольку они оправдывают введение в временн*ы*х типов в онтологию[100]. В своей работе Гальтон предлагает процедуру превращения овеществленных теорий в неовеществленные. Часть потерянной выразительной силы может быть возвращена в рамках первопорядковой схемы посредством замены овеществленных типов овеществленными знаками (tokens) для событий и состояний. Если типы являются универсальными понятиями, то знаки лишь указывают на длительность событий или состояний. Подход Гальтона развивается Вила и Рейхгельтом[101].

[95] The Language of Time: A Reader. P. 217.

[96] *Bach E.* The Algebra of Events // Linguistics and Philosophy. N 9 (1986). P. 5–16.

[97] *Kowalsky R.* Logic for Problem Solving. New York, 1979.

[98] *Shanahan M. P.* Solving the Frame Problem. London, 1997; *Miller R., Shanahan M.* The Event Calculus in Classical Logic — Alternative Axiomatisations // Linkoeping Electronic Articles in Computer and Information Science. 1999. N 4(16).

[99] *Chittaro L., Montanari A.* Temporal Representation and Reasoning in Artificial Intelligence... P. 47–106 (5).

[100] *Galton A.* Reified Temporal Theories and How to Unreify Them. Sidney (Australia), 1991. P. 1177.

[101] *Vila L., Reichgelt H.* The Token Reification Approach to Temporal Reasoning // Artificial Intelligence. 1996. N 83(1). P. 59–74.

Недостатком овеществленных логик Аллена[102] и Мак-Дермотта[103] считается отсутствие специальной формальной семантики, описывающей временные свойства соответствующих первопорядковых логик[104]. К числу недостатков этих овеществленных ВЛ относят и невозможность получения результатов по непротиворечивости и полноте для временного аспекта этих логик[105]. Непротиворечивость и полнота доказываются только в общем, первопорядковом, смысле, и это не гарантирует недоказуемости интуитивно неприемлемых временных формул, а равно и доказуемости всех интуитивно приемлемых.

В некоторых случаях, например овеществленной логики Шохэма, выразительная сила новой системы не превышает выразительную силу значительно более простого метода временных аргументов, например Баккуса[106]. В тех же случаях, когда преимущество в выразительности очевидно, овеществленные логики могут оказаться чересчур сложными[107].

5. Логика грамматических времен

5.1. Вклад О. Есперсена и Г. Рейхенбаха. Словосочетание «временная логика» переводится на английский язык двояко: как «temporal logic» и как «tense logic». Два этих термина, которые могут быть объединены под названием «логика времени», отражают два пласта изучения времени: соответственно времени как оно есть, метафизического времени, с одной стороны, и времени как оно нам дано в языке, дискурсивного времени — с другой. Й. ван Бентем разделяет материал на две части: «Временная онтология» и «Временной дискурс», в которых с разных позиций обсуждаются временные теории[108]. Часто в русскоязычных логических текстах «tense logic» переводится как «логика грамматических времен»; при этом следует иметь в виду, что сегодня термин «tense logic» не только указывает на отношение к грамматическим временам, но и обозначает прайоровские модальные временные логики (в отличие, скажем, от первопорядковых или овеществленных).

---

[102] *Allen J. F.* Maintaining Knowledge about Temporal Intervals. P. 832–843; *Allen J. F.* Towards a General Theory of Action and Time. P. 123–154.

[103] *McDermott D.* A Temporal Logic for Reasoning about Processes and Plans; см. также: Cognitive Sci. 1982. N 6 (2).

[104] Handbook of Temporal Reasoning // Artificial Intelligence / Ed. by M. Fisher, D. M. Gabbay, L. Vila. N I (2005). P. 175; *Haugh B. A.* Non-Standard Semantics for the Method of Temporal Arguments. P. 449.

[105] *Haugh B. A.* Non-Standard Semantics for the Method of Temporal Arguments. P. 449.

[106] *Bacchus F., Tenenberg J., Koomen J. A.* A Non-Reified Temporal Logic // Artificial Intelligence. N 52 (1991). P. 87–108.

[107] Handbook of Temporal Reasoning. P. 175.

[108] *Benthem J. van.* The Logic of Time.

Основоположником формализации грамматических времен следует считать Отто Есперсена, который разрабатывал так называемую «систематическую грамматику» в качестве системы методов анализа естественных языков. Есперсен указывает на случаи, в которых возможно установить прочные связи между грамматическими и философскими категориями. Поскольку к таким случаям относится и категория времени в грамматике и философии, Есперсен предпринимает попытку строгого анализа грамматического времени, разработав, отталкиваясь от латинской грамматики Мадвига, «систему семи грамматических времен»[109]. В рамках данной системы времена однозначно характеризуются с использованием осевой диаграммы, отражающей свойства и соотношение момента речи и момента события. Для обозначения грамматических времен Есперсен вводит два ряда буквенных обозначений. Первый ряд обозначений (*A*,*B*,*C*) отражает главное, естественное (прошедшее, настоящее, будущее) подразделение времени. Второй ряд (*a*,*b*,*c*) отражает подразделение времен относительно других событий (до, одновременно, после). Комбинациями этих букв обозначаются грамматические времена. Например, *Cc* — это «послебудущее время», а *Ab* — это простое прошедшее время.

Ганс Рейхенбах предложил более общий метод логического различения грамматических времен на основе использовавшихся О. Есперсеном моментов речи и события[110]. Наряду с понятиями *момента речи* и *момента события* Рейхенбах ввел понятие *точки референции* (reference point) для выражения специфики сложных, перфектных времен. Поскольку в русском языке перфектные значения выражаются лексически, обратимся за примером к английскому языку:

I daresay you'll have gone to bed by the time I've finished.
(Рискну предположить, что ты уже заснешь, когда я закончу).

Мы видим, что момент события («ты уже будешь спать») задан относительно точки отнесения («я закончу»). В будущем перфектном времени (future perfect tense), с помощью которого выражено событие «ты уже будешь спать», момент события предшествует точке референции. То же относится и к другим перфектным временам. Разделение времен на настоящие, будущие и прошедшие определяется соотношением момента речи и точки референции, а разделение на перфектные и простые — соотношением точки референции и момента события.

Дополнительные ограничения, накладываемые на интервалы между точками и моментами, помогают отразить специфику нестандартных глагольных времен, например, французского *le plus-que-parfait immediat* («немедленного» плюсквамперфекта). Введение трехэлементной системы отображения времен

---

[109] *Есперсен О.* Философия грамматики. М., 1958. С. 297–301.
[110] *Reichenbach H.* Elements of Symbolic Logic. Berkeley, 1947.

и возможность введения нескольких точек референции позволяет выражать не только существующие, но и искусственные времена. Эффективную формализацию схемы Рейхенбаха для произвольного количества точек референции предложил Бертрам Брюс[111]. Используемые определения временного сегмента, а также точечно-интервальных отношений *after*, *same-time* и *before* введены нами ранее в 2.2.

Время (tense) — это *n*-арное отношение на временных сегментах, определенное утверждением об отношениях (relational statement) вида

$$\bigwedge_{i=1}^{n-1} R_i(S_i,S_{i+1}),$$

где каждый S_i — это временной сегмент, и каждое R_i — это бинарное отношение порядка на временных сегментах S_i и S_{i+1}. Время можно также рассматривать как множество *n*-ок, удовлетворяющих данному утверждению об отношениях.

Пусть $(S_1,S_2,...S_m)$ — элемент времени. Будем называть S_1 моментом речи, каждый $S_i(i=2,3...,n-1)$ — точкой референции, и каждый S_n — точкой события.

Время является *прошедшим*, если истинно *after*(S_1,S_2), *настоящим*, если истинно *same-time*(S_1,S_2), *будущим*, если истинно *before*(S_1,S_2).

Время является *перфектным*, если истинно *after*(S_{n-1},S_n), и при этом n>3.

5.2. Типология глагольных предикатов. Мысли Аристотеля и средневековых логиков, исследования Есперсена и Рейхенбаха, наконец, основополагающая статья Финдли, в которой он провозгласил возможность создания формализованного исчисления грамматических времен[112], легли в основу работ А. Н. Прайора[113]. Одной из главных установок Прайора было требование максимального внимания к интуициям, касающимся времени и укорененным в практике повседневного общения. Несмотря на этот интерес, работы Прайора в целом ограничивались рассмотрением технических проблем представления грамматических времен и не проводили никакой дифференциации между глаголами в зависимости от их видовременных свойств. Между тем отсутствие наблюдений за совместимостью глаголов и грамматических времен и возможностью осуществления тех или иных выводов из овремененных высказываний существенно затрудняло дальнейшее развитие логики грамматических времен.

Для создания модальной логики, чувствительной к временным и аспектным характеристикам высказываний, необходима типология глагольных пре-

---

[111] *Bruce B.* A Model for Temporal References and Its Application in a Question Answering Program. P. 7–9.

[112] *Findlay J. N.* Time: a Treatment of Come Puzzles // Australasian Journal of Philosophy. N 19:3 (1941). P. 233.

[113] Подробнее о предшественниках Прайора см.: *Прайор А. Н.* Предтечи временной логики (фрагмент из книги «Прошлое, настоящее, будущее») / Пер. Т. Вартаняна // Логос. 2000. № 2. С. 6–29 и сл.

дикатов. Первую такую типологию предложил Зено Вендлер[114]. В качестве обозначения совокупности отношений глагола и времени Вендлер использует понятие *временной схемы* глагола. Все временные схемы Вендлер делит на допускающие и не допускающие употребления в продолженном времени. Первый тип схем делится, в свою очередь, на *деятельности* (activities) и *свершения* (accomplishments). Деятельности в отличие от свершений не обладают завершенностью и отвечают на вопрос «как долго?» (например, «бегал по стадиону»), а свершения — «за какое время?» (например, «пробежал стометровку»). Деятельности гомогенны, свершения — нет.

Второй тип схем, не допускающий использования продолженного времени, подразделяется на *состояния* (states) и *достижения* (achievements). Высказывания о достижениях могут быть истинны относительно моментов, а состояния — относительно временных интервалов. Не следует отождествлять достижения и свершения на том основании, что обе временные схемы предполагают результативность обозначаемого глаголом действия.

Схема Вендлера критиковалась с различных позиций. Первое основание деления (использование продолженных времен) критикуется Александром Морелатосом и другими авторами[115], в статьях которых предлагаются контрпримеры и способы преодоления затруднений. Несмотря на то, что при классифицировании видовременных схем глаголов мы имеем дело с лингвистическими явлениями, при создании классификаций требуется различение лингвистических и логических критериев; отсутствие такого разделения также можно поставить в упрек Вендлеру.

Несколькими годами позже и независимо от Вендлера свою типологию разработал Энтони Кенни[116]. Кенни предложил более формализованный и лишенный апелляций к интуиции способ разбиения на типы. Во-первых, он обращает внимание на такие грамматически «второстепенные» вещи, как обстоятельства времени или образа действия. Во-вторых, он предлагает использовать своего рода тесты для определения принадлежности глагола к одному из трех типов. Для этого нужно построить формальное следствие из анализируемого предложения и, в зависимости от истинности этого следствия, сделать вывод о типе глагольного сказуемого.

По Кенни, глаголы состояния (static verbs) имеют следующие свойства:

(1) обычно не используются в продолженном времени («'A is φing' not used»);

---

[114] *Vendler Z.* Verbs and Times // Philosophical Review. Vol. 66 (1957). № 2. P. 143–160. Позднейшая версия: Linguistics in Philosophy. Ch. 4. Ithaca; New York, 1967. P. 97–121.

[115] См.: *Mourelatos A. P. D.* Events, Processes and States // Linguistics and Philosophy. N 2 (1978). P. 415–438; см. также: Syntax and Semantics / Ed. by P. Tedeschi, A. Zaenen. New York, 1981. P. 191–212; *Verkuyl H.* Aspectual Classes and Aspectual Composition // Linguistics and Philosophy. N 12 (1989). P. 39–94.

[116] *Kenny A.* Action, Emotion and Will. 1st ed. New York; London, 1963; 2nd ed. New York, 2003.

(2) не совместимы с такими наречиями, как «часто» («'A φs' not frequentative»);

(3) если предложение с данным глаголом истинно при использовании времени present perfect, то также истинно предложение с этим же глаголом в настоящем времени («'A φs' if 'A has φd'»).

Помимо глаголов состояния Кенни вводит классы глаголов, выражающих результативные события (kinesis) и процессы (energeia). Эти два класса переосмысляют соответственно «осуществления» и «движения», о которых говорит Аристотель в девятой книге «Метафизики» (1048b, 18–37). Глаголы, выражающие результативные события и процессы, обладают, по Кенни, следующими тремя общими свойствами:

(1) они совместимы с такими наречиями, как «часто» («'A φs' frequentative»);

(2) предложение с данным глаголом в настоящем продолженном времени истинно только тогда, когда истинно предложение в настоящем перфектном продолженном времени («'A is φing' only if 'A has been φing'»);

(3) предложение с данным глаголом в простом настоящем времени истинно только тогда, когда истинно предложение в настоящем перфектном времени («'A φs' only if 'A has φd'»); при этом предложение с данным глаголом в настоящем перфектном времени истинно не только тогда, когда истинно предложение в простом настоящем времени («'A has φd' not only if 'A φs'»).

Важность работы Кенни заключается еще и в том, что он впервые определил на своих классах отношение частичного порядка. Это позволило дать более четкие, чем у Вендлера, формулировки[117]:

Φ — состояние, т. и т. т., когда $(t \in I \wedge true(\Phi,t)) \leftrightarrow \forall t'(t' \subset t \rightarrow true(\Phi,t'))$;

Φ — процесс, т. и т. т., когда

$true(,t) \rightarrow (t \in I \wedge \exists t' \in I_{of}(t' \subset t \wedge true(\Phi,t'))) \wedge \forall t''(t'' \subset t \rightarrow true(\Phi,t''))$;

Φ — результативное событие, т. и т. т., когда

$true(\Phi,t) \rightarrow (t \in I \wedge \neg \exists t'(t' \subset t \wedge true(\Phi,t')))$.

В данных выражениях I — это множество интервалов ненулевой длины, I_{of} — множество интервалов ненулевой длины с открытыми границами, $true(\psi,t)$ — отношение истинности на интервале или точке[118].

Схема Вендлера–Кенни развивалась в нескольких направлениях: на ее основе создавались иные, как более чувствительные к английскому языку, так и, наоборот, более универсальные схемы; на основе временных схем Вендлера–Кенни и их критиков вводились модальные операторы и появлялись

[117] Приведены по: *Taylor B.* Tense and Continuity // Linguistics and Philosophy. N 1 (1977). P. 199–220.

[118] Подробный разбор типологии Кенни см. также: *Verkuyl H.* Aspectual Classes and Aspectual Composition. P. 39–94.

первые интервальные временные логики[119]. Помимо этого расширялся арсенал критериев и «тестов» для формального различения глаголов, функционирующих в соответствии с разными схемами. Так, Тайлор ввел критерий для дополнительного разделения процессов на гомогенные («падать», «двигаться») и гетерогенные («ходить», «говорить»)[120].

Александр Морелатос наряду с предлагаемой им оригинальной схемой[121], совмещающей достоинства подходов Кенни и Вендлера, вводит два взаимосвязанных критерия для событий. Событие может быть отличено от состояний и процессов, во-первых, потому, что любое высказывание о событии *A* эквивалентно высказыванию «Как минимум один раз имело место *A*», а во-вторых, высказывания о событиях допускают наречия «трижды», «однажды» и т. д.

Моэнс и Стидман предлагают отказаться от лингвистических оснований деления в пользу более однозначных логических. Все глагольные предикаты они делят на состояния («понимать», «любить») и события. Оснований деления два: противопоставление точечных и длительных событий, а также наличия или отсутствия у них последствий[122]. Таким образом, все события могут быть либо атомарными, либо длительными, либо результативными, либо нерезультативными. Членами деления являются *кульминации*, *процессы с кульминацией*, *точечные события* и *процессы*. Примеры четырех типов событий приведены в таблице:

Таблица

	Атомарные	Длительные
Результативные	Кульминация («узнать», «победить в гонке»)	Процесс с кульминацией («построить дом», «съесть яблоко»)
Нерезультативные	Точечное событие («икнуть», «моргнуть»)	Процесс («бегать», «плавать»)

Моэнс классифицирует не глаголы, а базовые формы высказываний (например, «Макс, бежать!» — это процесс). В зависимости от типа базовой формы высказывания с помощью модальных операторов времени и аспекта можно сконструировать различные выражения базового языка, например:

$$past(progressive(process(MaxRun))),$$

[119] *Dowty D. R.* Toward a Semantic Analysis of Verb Aspect and the English 'Imperfective' Progressive // Linguistics and Philosophy. N 1 (1977). P. 45–77.
[120] *Taylor B.* Tense and Continuity // Linguistics and Philosophy. N 1 (1977). P. 199–220.
[121] *Mourelatos A. P. D.* Events, Processes and States // Linguistics and Philosophy. N 2 (1978). P. 415–438; см. также: Syntax and Semantics / Ed. by P. Tedeschi, A. Zaenen. P. 191–212.
[122] *Moens M., Steedman M.* Temporal Ontology and Temporal Reference // Computational Linguistics. Vol. 14. 1988. June. N 2. P. 15–28.

где *past* — оператор прошедшего времени, а *progressive* — оператор продолженного аспекта. Однако тип базовой формы высказывания (или *аспектный класс*, по Моэнсу) не является жестко фиксированным: при соблюдении условий, заданных так называемой *аспектной сеткой* (aspectual network), возможен перевод из одного класса в другой[123].

Условия перевода основываются на анализе структуры событий и процессов, предпринимаемом Моэнсом. Важнейшими элементами этой структуры являются: (1) подготовительный процесс, (2) связанная с ним кульминация и (3) последующее состояние, вместе составляющие *ядро* (nucleus).

Формальное представление такого ядра предлагается в работе Лейта и Каннингэма[124], опирающееся на идеи Моэнса и Стидмена наряду с другими работами[125].

---

[123] *Moens M.* Tense, Aspect and Temporal Reference: Ph. D. thesis. Edinburgh, 1987.

[124] *Leith M., Cunningham J.* Aspect and Interval Tense Logic // Linguistics and Philosophy. N 24 (2001). P. 331–381.

[125] См.: *Lascarides A.* A Formal Semantic Theory of the Progressive: Ph. D. thesis. Edinburgh, 1988; *Kent S.* Modelling Events from Natural Language: Ph. D. thesis. London, 1993; *Verkyul H.* A Theory of Aspectuality. Cambridge, 1993.