ТЕХНИЧЕСКАЯ
КИБЕРНЕТИКА
№ 5 · 1993

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССУЖДЕНИЙ

УДК 519.68:510.66

© 1993 г. М. Е. СУЧАНСКИЙ, Е. А. ТЕРНОВСКАЯ

ЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ

Предложен логический формализм для представления параллельно происходящих действий, который позволяет выводить по умолчанию утверждения о результатах выполнения группы действий, содержащей действия, не описанные каузальными правилами. Подход несколько расширяет хорошо известный формализм ситуационного исчисления, существенно увеличивая его выразительность и обеспечивает основу для формализации рассуждений о динамических проблемных областях со многими агентами.

Введение. Возможность строить планы — последовательности или структуры действий, которые переводят данное состояние мира в другое (целевое) состояние — необходимое условие интеллектуального поведения. Например, мобильные роботы, действующие в некоторой среде, должны быть способны планировать и рассуждать о результатах своих действий для того, чтобы достичь свои цели.

Для адекватного понимания текстов на естественном языке необходимо, чтобы в базу знаний была заложена логическая теория изменений. В противном случае семантический анализ текста, содержащего сложное описание осуществляемых действий и протекающих процессов, невозможен. Об этом, в частности, свидетельствует опыт, накопленный в ходе работы по проекту «Текст — Рисунок» [1, 2]. Только в случае жестких ограничений на описание динамики, которое может содержаться в тексте на входе системы (разрабатываемой в рамках проекта), возможно эффективное использование простых планировщиков в стиле STRIPS. Дальнейший прогресс в этой области возможен только после теоретического анализа возникающих трудностей.

Актуальность разработки логической формализации рассуждений о параллельно происходящих действиях следует также из необходимости исследования путей разрешения конфликтных ситуаций. Именно логический подход позволяет объединить стратегический анализ интересов участников конфликта, входящий в область исследований традиционной теории игр [3], с анализом процессов обмена информацией о протекающей игре между ее участниками и с анализом аргументации, используемой участниками конфликта для его преодоления. Подобное объединение обеспечит проведение исследований на более совершенном уровне.

Нами разработан простой логический формализм для представления знаний об одновременно происходящих действиях. Используемые каузальные правила позволяют выводить утверждения о результате выполнения всей группы параллельных действий, которая может, в частности, содержать действия, не упомянутые ни в одном из каузальных правил. Такого рода выводы согласуются с естественной интуицией: осуществление (наряду с другими) действия, о влиянии которого на окружающий мир ничего не известно, по умолчанию, не меняет выводов о

результатах других действий. Предлагаемый подход позволяет неограниченно расширять группы одновременных действий введением в них неспецифицированных действий без какого-либо усложнения каузальных правил. Наше решение дает возможность несложным образом выводить все свойства нового состояния мира, возникающего после применения очередного действия (или группы действий), в том числе и свойства, на которые действия не влияют. В частности, все косвенные результаты действия могут быть получены не с помощью каузальных правил, а с помощью статических зависимостей между фактами. Найден несложный способ полного указания всех достаточных предусловий каждого действия.

Мы будем концентрировать наше внимание только на задаче предсказания, другими словами, нас интересуют результаты последовательного осуществления нескольких совокупностей параллельных действий. Структура дальнейшего изложения такова. В разд. 1 мы напоминаем исходные понятия ситуационного исчисления. В разд. 2 мы описываем проблемы, возникающие при построении теорий действий. Затем мы приводим основные определения и результаты, относящиеся к использованию очерчивания (circumscription) для рассуждений о действиях [4, 5]. Чтобы продемонстрировать трудности, с которыми сталкивается очерчивание (и немонотонная логика в целом) в [6] был сконструирован простой пример, получивший наименование «проблема Йельской стрельбы» (Yale Shooting Problem — YSP). Поэтому в заключение разд. 3 мы кратко объясняем суть YSP. После этого в разд. 4 мы даем краткий обзор публикаций, посвященных рассуждениям о параллельных действиях, и более подробно останавливаемся на работах, с которыми наш подход связан наиболее тесно. После строгого описания используемого в теории языка, в разд. 5 мы демонстрируем наш метод аксиоматизации одновременных действий. С целью упрощения нашего изложения мы рассматриваем этот метод не в общем случае, а на несколько измененном примере Йельской стрельбы. В разд. 6 мы приводим доказательство корректности нашего подхода. В предпоследнем разд. 7 мы сравниваем наш подход с другими известными нам методами формализации рассуждений о параллельных действиях и обсуждаем перспективы дальнейшего продвижения. В конце статьи подводится итог сделанному. В качестве введения в обсуждающуюся в нашей статье проблематику можно порекомендовать [8, 7].

1. Теории изменений и ситуационное исчисление. Ситуационная онтология [9] была первой по времени схемой, предназначенной для представления знаний о динамических явлениях. Другие онтологические схемы, предложенные в рамках направления исследований, известного под именем «качественная физика», рассматривались в обзоре [10]. Примитивами в ситуационной онтологии служат: ситуация — моментальный слепок мира в целом, и действия — элементы, благодаря которым происходит переход от одной ситуации к другой. Поскольку действия служат для отображения старой ситуации в новую, они были названы в [9] ситуационными флюентами. Считается, что после осуществления любого возможного действия порождается новая ситуация, даже если это действие ничего не изменило. Свойства, истинность которых меняется в зависимости от сложившейся ситуации, были названы пропозициональными флюентами. Пропозициональные флюенты можно рассматривать как унарные предикаты, аргументом которых является ситуация, но эти предикаты принято реефицировать * в виде объектных переменных. В ситуационном исчислении допустимы не только пропозициональные флюенты, например флюента, описывающая местоположение, но в большинстве работ, посвященных теории действий, они не рассматриваются.

Преимущества ситуационного исчисления — в его простоте и ясности. Кроме того, по нашему мнению, оно обладает хорошими перспективами развития, т. е. оно может быть использовано без существенного усложнения языка для пред-

* Дж. МакКарти в качестве неформального эквивалента термина «реефицировать» (reify) предложил слово «овеществлять» (thingify).

ставления временных отношений и непрерывных изменений (это входит в наши дальнейшие планы). В последнее время наблюдается значительный всплеск интереса к ситуационному исчислению со стороны исследователей, работающих над логиками действий и изменений [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Некоторое негативное отношение к ситуационному исчислению в предыдущие годы было вызвано, главным образом, невозможностью представлять параллельные действия. Наш подход устраняет этот недостаток.

2. Постановка задачи. Любой логический формализм, описывающий изменения, должен соответствовать некоторым критериям, в некотором смысле выражающим требования полноты. Ниже мы формулируем эти критерии, тем самым ставя перед собой задачу, чтобы наше представление параллельных действий им удовлетворяло.

Теория изменений содержит, прежде всего, каузальные правила, выражающие знания о причинно-следственных зависимостях между предусловиями выполнения действия и результатом его осуществления. Теорией действий (изменений) мы называем конъюнкцию каузальных правил, некоторых вспомогательных аксиом, а также аксиом сценария. Сценарий включает, во-первых, аксиомы, описывающие, какие пропозициональные флюенты имеют место (или не имеют места) в начальной ситуации и, во-вторых, аксиомы, описывающие, какие группы действий включают последовательно осуществляемые операторы. Кроме того, теория действий может содержать некоторые логические взаимосвязи между фактами проблемной области. Таким образом, теория действий представляет собой всю совокупность фактов, известных о проблемной области и о действиях, которые могут быть осуществлены.

В любой теории изменений возникает следующая задача: все факты, описывающие положение вещей в мире после осуществления одного или группы действий, должны выводиться и, желательно, с наименьшей возможной сложностью (frame problem) *. Например, если в используемом формализме факты соотносятся с временем или с ситуацией, необходимо уметь выводить как свойства, не подверженные влиянию действия (они должны перенестись в следующую ситуацию), так и свойства, на которые действие влияет (они меняются в соответствии с каузальными правилами). Остовом или фреймом мы называем, следуя [18, 19] набор базовых или первичных флюентов, все допустимые комбинации которых задают соответствующие возможные состояния или положения вещей в мире. Примером невозможного состояния мира может быть кубик, расположенный в двух разных местах одновременно. Заметим, что следует различать понятия ситуации, как момента времени и состояния, как положения вещей. В. А. Лифшиц восстановил первоначальный замысел авторов ситуационного исчисления, введя унарный предикат Frame [19]. В экстенсионал этого предиката входят некоторые флюенты, выделяемые из содержательных соображений в качестве первичных. Значения остальных пропозициональных флюент могут быть выведены, только исходя из значений первичных. По аналогии с осями координат, первичные флюенты являются независимыми. Остальные флюенты связаны с первичными через аксиомы, выражающие статические закономерности мира. Поэтому мы будем говорить, что их значения получаются косвенным образом, а значения первичных флюент получаются непосредственно, с помощью динамических закономерностей мира (каузальных правил и фрейм-аксиом). Благодаря использованию понятия фрейм, мы можем говорить о состоянии как о некотором допустимом наборе флюент, входящих во фрейм.

В [20] было отмечено, что фрейм-проблема имеет две тесно взаимосвязанные стороны. Первая из них — это проблема одного действия и многих флюент, связанная с необходимостью получать значения всех первичных флюент, на которые совершаемое элементарное действие не влияет, после его осуществления.

* Термин «фрейм-проблема» на русский язык переводится иногда как проблема описания состояния, проблема разграничения или проблема остова.

Поэтому она названа фрейм-проблемой для флюент (ФПФ). Вторая, комплементарная, связана с тем, как находить значение первичной флюенты в ситуации, возникающей после осуществления произвольной комбинации действий и, соответственно, может быть названа фрейм-проблемой для действий (ФПД).

Точной формулировки критерия решенности фрейм-проблемы с 1969 года, когда на нее было указано в работе [9] не существует, хотя в каждой теории действий (изменений) она так или иначе решается. Нами предложен такой критерий, но изложение его требует предварительных рассмотрений, существенно выходящих за рамки данной статьи. Поэтому мы ограничимся интуитивным пониманием этой проблемы, изложенным выше.

Для ситуационного исчисления [9], которое выбрано в качестве основы для нашего решения, предложены несколько методов решения фрейм-проблемы для флюент. Первоначальное решение было предложено самими авторами ситуационного исчисления. Оно предполагало, что для каждого действия и для каждого свойства, входящего во фрейм и не изменяемого данным действием, в теорию включается аксиома, утверждающая переносимость этого свойства в новую ситуацию (фрейм-аксиома). Но поскольку таких аксиом будет $M \cdot N$, где M — число пропозициональных флюент в теории, N — общее число действий, такой способ решения излишне усложняет исходную теорию. Альтернативные способы решения этой проблемы в рамках логики первого порядка были предложены в статьях [12, 14, 16]. В нашей статье, как и в работе [5], ФПФ решается с помощью очерчивания [4]. При использовании очерчивания число фрейм-аксиом сокращается до одной — аксиомы инерции. Неформально, эта аксиома утверждает, что если флюента не является аномальной по отношению к осуществляемому действию в текущей ситуации, то ее значение сохраняется в следующей ситуации. Предполагается, что область истинности предиката аномальности должна быть минимально возможной. Этот результат достигается благодаря очерчиванию. Использование очерчивания, как, впрочем, и любого другого немонотонного подхода, может привести к тому, что теория будет иметь следствия, противоречащие интуиции. Этого надо стараться избегать.

По аналогии с фрейм-аксиомами, позволяющими решить ФПФ, в качестве решения фрейм-проблемы для действий можно было бы предложить большую совокупность дополнительных аксиом. Они должны были бы задавать наследование свойств элементарных действий глобальным действием, из которых оно состоит. При этом, надо было бы учесть, что некоторые из одиночных действий, при попытке их параллельного осуществления, могут препятствовать осуществлению друг друга [20]. Более того, если выполнению первого действия препятствует выполнение второго, оно, тем не менее, может быть выполнено, если параллельно осуществляемое третье действие помешает выполнению второго и не помешает первому действию, и так далее. Наш способ решения ФПД позволяет обойтись без включения в теорию такого рода аксиом наследования и аксиом взаимовлияний.

В большинстве работ, предлагающих то или иное решение фрейм-проблемы, принято подчеркивать меньшую сложность (в смысле количества фрейм-аксиом), экономность и естественность предлагаемого нового решения по сравнению с первоначальным, упомянутым выше. Тем не менее, ни в одной из этих работ не формулируется строго понятие сложности решения фрейм-проблемы. Мы ввели это понятие, но, к сожалению, объем статьи не позволяет нам затронуть этот вопрос.

В логической теории изменений требуется полностью учитывать все достаточные предпосылки каждого действия, причем предпочтение также отдается наиболее простому решению. Эта проблема в англоязычной литературе получила название qualification problem. Традиционно считалось, что надо указывать обстоятельства, препятствующие выполнению действия, поскольку, на первый взгляд, их число невелико. В частности, если не выполнены предусловия действия, то это препятствует его осуществлению. Все остальные факты обычно полагали не мешающими действию. Тем не менее, мы не видим разницы в том, перечислять ли, какие факты

препятствуют осуществлению действия, или указывать достаточные предусловия выполнения данного конкретного действия.

В теории действий не только прямые, но и косвенные изменения, вызванные каждым действием, должны быть отражены соответствующим формальным выводом в рассматриваемой теории. Задача экономной характеризации всех последствий действия получила название проблемы ветвления (ramification problem).

Таким образом, в логических теориях действий (изменений) должны, как минимум, решаться следующие проблемы: фрейм-проблема для флюент (ФПФ); фрейм-проблема для действий (ФПД); проблема полной характеризации всех достаточных предусловий; проблема ветвлений. При этом решение должно быть минимально сложным и гарантировать отсутствие нежелательных следствий.

3. Очерчивание. В этом разделе мы введем понятие очерчивания * [4, 5, 21, 22, 23] и кратко объясним суть примера, демонстрирующего трудности, с которыми сталкивается очерчивание при формализации рассуждений о действиях.

Основная идея очерчивания — рассматривать вместо произвольных моделей данного множества аксиом, только модели, которые удовлетворяют некоторому условию минимальности на фиксированном универсуме. Модель M' меньше чем M, если экстенсионал очерчиваемого предиката в ней — собственное подмножество его экстенсионала в M. Если не существует модели, которая была бы меньше, чем модель $M_{\min}$, то говорят, что $M_{\min}$ — минимальная модель. Очерчивание позволяет из всех возможных моделей рассматриваемой теории выделить класс моделей, в которых экстенсионалы определенных предикатов минимальны (в смысле теоретико-множественного включения). Более формальная теоретико-модельная характеризация очерчивания приводится, например, в обзоре [7], а также в статьях [21, 23].

Строго очерчивание определяется как синтаксическая трансформация формул. Оно трансформирует предложение A в более сильное предложение A^*, такое, что модели A^* являются в точности минимальными моделями A. Очерчивание осуществляется путем добавления к формуле нового конъюнктивного члена, утверждающего, что в область истинности очерчиваемого предиката входят только те значения, которые там должны присутствовать, чтобы выполнялась формула, содержащая предикат [5, 21, 22]. Этот базовый вариант глобального очерчивания обозначается $\mathrm{Circum}(A;\ P)$, где A — это исходная формула, P — очерчиваемый предикат, входящий в эту формулу, и представляет собой формулу в языке второго порядка:

$$A\,(P)\ \&\ \neg\ \exists p\ (A\,(p)\ \&\ p < P), \tag{3.1}$$

где p — предикатная переменная, арность, которой совпадает с P и $p < P$ означает

$$\forall x\ (p\,(x) \supset P\,(x))\ \&\ \neg\ \exists x\ (P\,(x) \supset p\,(x)).$$

Необходимо подчеркнуть, что хотя эта формула является выражением в языке второго порядка, во многих содержательно интересных случаях формула, получающаяся как результат очерчивания предиката, может быть первопорядковой [5, 21, 23, 18]. Во всех случаях мы можем говорить о семантическом следовании формулы из теории с очерченными предикатами.

Если при очерчивании предиката P, входящего в формулу $A(P,\ Z)$, которая содержит, помимо P, вхождения других предикатных и функциональных констант из списка Z, разрешается произвольно менять значения этих констант, то такой вид глобального очерчивания P с варьированием Z обозначается $\mathrm{Circum}(A(P,\ Z);\ P;\ Z)$ и представляется формулой

$$A\,(P,\ Z)\ \&\ \neg\ \exists p,\ z\ (A\,(p,\ z)\ \&p < P), \tag{3.2}$$

где z — совокупность предикатных и/или функциональных переменных, арность

* Такой перевод на русский язык слова «circumscription» был предложен автором этого подхода Дж. МакКарти.

которых совпадает с Z. Эта формула утверждает, что экстенсионал P не может быть уменьшен даже ценою произвольного изменения интерпретаций символов, входящих в список Z.

В [22] было предложено новое понятие поточечного очерчивания, которое нам также потребуется для дальнейшего изложения. Это новое понятие предназначено для выражения минимальности предиката в каждой точке. Традиционно k-арный предикатный символ интерпретируется в модели, как подмножество U^k, где U — универсум модели. Этот подход отождествляет предикат с его экстенсионалом. Соответствующее понимание минимальности отражено в понятии глобального очерчивания. Но можно посмотреть на предикат как на булевозначную функцию, другими словами, как на семейство элементов упорядоченного множества {false, true}. Тогда мы можем говорить, что предикат становится «меньше» (или «строже») в некоторой точке $\xi \in U^k$, если его значение меняется с true на false в этой точке. Что касается его значений в остальных точках, то, во-первых, мы можем потребовать, чтобы они оставались без изменений (простейший случай), во-вторых, мы можем позволить им меняться произвольным образом, и, в-третьих, мы можем требовать, чтобы некоторые из них оставались постоянными, а другие — менялись.

Простейший вариант поточечного очерчивания представляет собой формулу первого порядка, которая обозначается $C_P(A(P))$:

$$A(P) \,\&\, \forall x \neg [P(x) \,\&\, A(\lambda y (P(y) \,\&\, x \neq y))]. \tag{3.3}$$

Моделью (3.3) является такая модель $A(P)$, которая не может быть преобразована в другую модель $A(P)$ путем изменения значения предиката P от true на false в одной точке. Квантор всеобщности утверждает, таким образом, минимальность значения P в каждой точке x. Из (3.1) и (3.3) следует, что $\mathrm{Circum}(A;\, P)$ влечет $C_P(A(P))$, обратное неверно [22]. Действительно, возьмем в качестве A формулу $P(a) \equiv P(b)$. Любая модель с тождественно ложным P удовлетворяет как $\mathrm{Circum}(A;\, P)$, так и $C_P(A(P))$. Однако любая модель A, в которой P истинно в точности в двух точках a и b, будет моделью поточечной версии очерчивания, но не будет моделью глобального очерчивания.

Вторым, из упомянутых вариантов для поточечного очерчивания, является поточечное очерчивание с произвольным варьированием параметров, входящих в список Z. Оно обозначается $C_P(A(P, Z);\, Z)$ и определяется аналогично (3.2):

$$A(P) \,\&\, \neg \exists\, x, z\, [P(x) \,\&\, A(\lambda y (P(y) \,\&\, x \neq y), z)].$$

Впоследствии нам понадобится более сложный вариант варьирования параметров, входящих в список Z, соответствующий третьей из упомянутых выше возможностей для поточечного очерчивания. В [22] был предложен способ явного задания для каждого предиката и функции той части их области определения, где мы можем варьировать их значения, имея в виду, что остальные значения остаются фиксированными. Мы будем использовать только случай, когда Z содержит только один предикатный символ. Пусть V есть λ — выражение $\lambda u V(u)$ той же арности, что и $Z(u)$, которое не имеет параметров и не содержит ни P, ни Z. Интуитивно, оно задает часть области Z, на которой Z можно варьировать. Поточечное очерчивание предиката P в теории $A(P, Z)$ с частичным варьированием предиката Z только на области V определяется формулой

$$A(P) \,\&\, \neg \exists x, z\, [P(x) \,\&\, \forall u (\neg V(u) \supset z(u) \equiv Z(u)) \,\&\, A(\lambda y (P(y) \,\&\, x \neq y), z)].$$

Заметим, что в этом определении область варьирования V не зависит от точки x, в которой минимизируется предикат P.

Пусть V есть λ-выражение $\lambda x u V(x, u)$, арность которого равна сумме арностей $P(x)$ и $Z(u)$. Интуитивно, здесь V представляет собой функцию, которая отображает каждое значение x в множество всех значений u, удовлетворяющих $V(x, u)$.

Поэтому обозначение V_x используется для $\lambda u V(x, u)$. Теперь мы можем рассмотреть еще более гибкую тактику очерчивания, позволяя x влиять на выбор той части области, на которой Z может варьироваться при минимизации предиката P в точке x (эта тактика обозначается $C_P\,(A\,(P, Z);\ Z/V)$):

$$A\,(P)\ \&\ \neg\ \exists x, z\ [P\,(x)\ \&\forall u\ (\neg V_x \supset z\,(u) \equiv Z\,(u))\ \&A\ (\lambda y\ (P\,(y)\ \&x \neq y),\ z)\,]. \qquad (3.4)$$

Если V тождественно истинно, тогда (3.4) совпадает с $C_P(A(P, Z); Z)$. Случай, когда V тождественно ложно, эквивалентен $C_P(A(P))$ из определения (3.3), т. к. Z становится параметром, который нельзя варьировать.

В последующем изложении нам понадобиться варьирование некоторых значений P в ходе его собственной минимизации. Пусть Z — пустой список. Такое поточечное очерчивание предикат с его частичным варьированием в остальных точках обозначается $C_P(A(P); P/V)$:

$$A\,(P)\ \&\ \neg\ \exists x, p\ [P\,(x)\ \&\neg\ p(x)\ \&\forall u\ (\neg\ V_x \supset p\,(u) \equiv P\,(u))\ \&A\,(p)\,]. \qquad (3.5)$$

Здесь p — предикатная переменная, арность которой совпадает с P; V есть λ — выражение $\lambda x u V(x, u)$, не имеющее параметров и не содержащее P. Второй член формулы (3.5) означает, что если имеет место $P(x)$, невозможно изменить его значение в точке x с true на false без потери свойства A, даже если при этом менять произвольно его значения на V_x. Данный вариант очерчивания предиката, вообще говоря, строже, чем базовый вариант поточечного очерчивания $C_P(A)$ и превращается в него при тождественно ложном V. Если V — тождественно истинно, то (3.5) строже, чем (3.1).

Формула B семантически следует из теории A с очерченными предикатами P, т. е. $\mathrm{Circum}(A(P, Z); P; Z) \models B$, тогда и только тогда, когда она выполняется в любой минимальной модели $A_{\min}$ этой теории A [21, 23].

Поскольку в дальнейшем мы будем рассматривать многосортный язык, необходимо отметить, что приведенные определения должны быть уточнены. В многосортных языках предикатная константа характеризуется не только своей арностью, но также и сортами своих аргументов (аналогичное замечание применимо и к функциональным константам, а также предикатным и функциональным переменным). Поэтому для того, чтобы формулы (3.1)—(3.5) были синтаксически корректны, переменная p должна иметь аргументы тех же сортов, что и соответствующие аргументы P; аналогичное ограничение необходимо наложить на выбор переменных z.

В формулировке теорий действий, использующих очерчивание для решения фрейм-проблемы и других проблем, существенную роль играет выбор порядка, в котором очерчиваются предикаты, входящие в теорию, и выбор предикатных и функциональных символов, которые разрешено варьировать в ходе этого очерчивания. Этот выбор осуществляется обычно с помощью метаматематических формул называемых тактикой (политикой) очерчивания в теории. Однако тактики очерчивания могут быть сформулированы в самой теории как аксиомы [23]. Основная трудность при использовании очерчивания, как, впрочем, и любого другого подхода немонотонной логики, для решения фрейм-проблемы — в том, что при неверно выбранной тактике очерчивания предикат «аномальности» может иметь несколько несовместных минимальных моделей, хотя интуитивно модель должна быть только одна. Такое возможное раздвоение моделей препятствует получению подразумеваемых в данной теории следствий о результате осуществления некоторой последовательности действий. Действительно, формулы выполнимые в одной минимальной модели и не выполнимые в другой не будут семантическими следствиями теории, полученной очерчиванием в ней некоторых предикатов. Упомянутая выше YSP представляет собой простой пример теории действий (содержащей всего три флюенты и два действия), в которой очерчивание предиката «аномальности» согласно тактике, предложенной Дж. МакКарти

[4, 5] приводит к появлению нескольких минимальных моделей. Подробное обсуждение как YSP, так и различных путей ее преодоления содержится в [11].

4. Предшествующие подходы. Существует несколько подходов к представлению параллельных действий [24, 25, 26, 27, 16, 17] в рамках теории действий. В статьях [27, 28] предлагается представление изменений с использованием как параллельных, так и последовательных действий. Но подход этих авторов слишком сложен из-за использования модальных операторов. В работе [26] предлагается двухступенчатый метод построения планов с параллельными действиями. Вначале строятся различные последовательные планы. После этого определяются наборы таких действий, которые могут выполняться одновременно. По предложенному там критерию, если результат не зависит от порядка выполнения действий, то они могут быть выполнены параллельно. Тем не менее, этого критерия еще не достаточно, чтобы выполнять действия одновременно. Авторы статьи [25] строят свою теорию действий на основе исчисления предикатов первого порядка, и при этом, также как и в вышеупомянутых работах, не используют ни один из немонотонных подходов. Комбинируя несколько действий в одно составное, они намеревались упростить последующий процесс рассуждений на основе т. н. метода дедуктивных таблиц для синтеза планов. Но эти авторы отказываются от рассмотрения фрейм-проблемы для теории с одновременными действиями.

Наша работа опирается на метод Дж. Вебера [17]. Суть предложенной им идеи состоит в том, что динамическая составляющая ситуационной схемы должна быть представлена двумя разными онтологическими примитивами. Первую из этих сущностей мы называем действием, а вторую мы будем называть оператором. Интуитивно, оператор есть одновременно осуществляемые действия, но, тем не менее, он является самостоятельной сущностью. Это позволяет, например, упростить аксиоматизацию, поскольку при таком взгляде на динамику нет необходимости включать в теорию аксиомы о наследовании свойств элементарных действий оператором, который из них образован. Оператор соотносится с одновременно происходящими действиями, которые его образуют, с помощью бинарного предиката Type. Этот предикат входит в каузальные правила и в сценарий. Предикат Type очерчивается, чтобы предотвратить нежелательную инициацию каузальных правил. Без такого очерчивания нельзя гарантировать, что во всех возможных моделях операторы, охарактеризованные в сценарии, не содержат, помимо желания автора сценария, не относящиеся к ним действия. Дж. Вебер рассматривает несколько возможных способов решения фрейм-проблемы. Вначале он предлагает сформулировать закон инерции пропозициональных флюент: если свойства не являются аномальными по отношению к оператору, они переносятся в следующую ситуацию. Традиционный подход минимизации аномальности также применим к каузальным правилам с операторами. Однако, как указал автор, этот подход как и в обычном случае сталкивается с проблемой «Йельской стрельбы», решения которой Дж. Вебер не предложил. Поэтому он решал фрейм-проблему, используя метод, предложенный Л. Шубертом [16], т. е. добавляя несколько т. н. аксиом исчерпывающего объяснения (англ. explanation closure axioms). Но поскольку этот метод применим только при наличии полной каузальной теории проблемной области, мы считали целесообразным поиск альтернативного решения фрейм-проблемы с помощью очерчивания, но, при этом,— решения свободного от парадоксов типа YSP.

В статьях [11, 29] предложено решение YSP для стандартного ситуационного исчисления, основывающееся на идее, что аномальность в ситуации не должна зависеть от информации о том, как ситуация исторически возникла. В их работах введено важное понятие состояния, которое имеет вневременный характер. Именно поэтому минимизация аномальностей относительно состояний свободна от парадоксов в духе YSP. Мы применяем их подход для ситуационного исчисления с операторами, включающими параллельные действия. Таким образом, мы решаем фрейм-проблему в ситуационном исчислении с параллельными действиями с помощью очерчивания аномальности в стиле подхода [11, 29]. Делая это, мы

следуем работе В. А. Лифшица [19], вводя в аксиому инерции унарный предикат Frame.

Работа [20], посвященная представлению параллельных действий в ситуационном исчислении, появилась практически одновременно с первоначальным вариантом этой статьи [30]. Детальный анализ их способа решения обнаруживает наличие ряда недостатков, в сравнении с нашим подходом. Подробное сравнение наших методов представления параллельных действий будет дано в предпоследнем разделе, посвященном обсуждению работ. Здесь мы отметим лишь, что их решение фрейм-проблемы, также основанное на использовании очерчивания, могло бы быть применено и в нашем случае, т. к. оно свободно от парадоксов типа YSP [31]. Тем не менее, мы считаем, что минимизация «аномальности», основанная на понятии состояния [11, 29], представляет больший интерес, ввиду важной роли, которую играет это понятие в формулировке строгого критерия решенности фрейм-проблемы и в оценке сложности конкретного решения. Кроме того, это понятие, несомненно, обогащает первоначальную онтологическую схему ситуационного исчисления.

5. Язык и аксиоматизация. Аксиомы нашей теории будут сформулированы на многосортном языке первого порядка *. Мы используем объектные переменные пяти сортов: для ситуаций (s), для истинностно-значных флюент (f), для операторов (o), для действий (a) и для состояний (c). Ситуацию мы фактически понимаем как момент времени, оператор — как действия, осуществляемые одновременно. В каждой ситуации флюенты делятся на два подмножества: свойства, которые имеют место в данной ситуации, и свойства, которые не выполняются в этой ситуации. Каждое состояние — это множество флюент, которые имеют место, то есть обозначает отображение флюент в истинностные значения. Объектные константы в нашем примере следующие: ситуация S_0; флюенты Loaded (ружье) и Alive (Фред); операторы O_1, O_2; состояния C_1, C_2, C_3, C_4 для различных комбинаций значений констант сорта флюенты; и действия Shoot, Trigger, Aim, Wait.

Мы используем (стандартный для ситуационного исчисления) бинарный функциональный символ Res (s, o), отображающий свои аргументы — терм сорта ситуация и терм сорта оператор — в терм сорта ситуация, а также новый унарный функциональный символ St (s), который отображает ситуацию в соответствующее состояние. Язык содержит стандартную бинарную предикатную константу Holds(f, s), выражающую наличие свойства f в ситуации s, и новый бинарный предикатный символ Type (o, a), который означает, что действие a является составной частью оператора o. Кроме того, мы будем использовать унарную предикатную константу Frame (f), чтобы выразить, что f принадлежит к фрейму (множеству первичных флюент), и тернарную предикатную константу Ab (f, o, c) (от англ. «Abnormal»), указывающую, что флюента f изменяется после выполнения оператора o в состоянии c (и в этом смысле является «аномальной»). Всякий раз, при формулировке той или иной тактики очерчивания, мы предполагаем, что арность предикатных переменных, значения которых варьируются в ходе очерчивания, совпадает с арностью соответствующих предикатных констант. Далее мы покажем, что результат очерчивания нашей теории эквивалентен включению в нее нескольких первопорядковых формул.

Мы подразделяем аксиомы на несколько групп. Одновременно обсуждается общий случай и конкретный пример.

Первая группа содержит единственную аксиому инерции с предикатом аномальности относительно состояния. Эта аксиома обеспечивает инерцию для значений флюент, входящих в экстенсионал предиката Frame:

$$\text{Frame}\ (f)\ \&\ \neg\ Ab\ (f, o, St\ (s)) \supset (\text{Holds}\ (f.s) \equiv \text{Holds}\ (f.\text{Res}\ (o, s)). \qquad (5.1)$$

* Имена переменных начинаются с маленькой буквы. Имена предикатных, функциональных и объектных констант начинаются с большой буквы. Свободные переменные всюду предполагаются связанными квантором всеобщности.

Вторая группа включает аксиомы, описывающие первичные флюенты. В нашем примере мы имеем:

$$\text{Frame(Alive)} \tag{5.2}$$

$$\text{Frame(Loaded)}. \tag{5.3}$$

В. А. Лифшиц в [19] доказывает, что если убрать предикат Frame из (5.1), как это было в ранних версиях ситуационного исчисления, то это может привести к парадоксальным заключениям. Предикат Frame должен очерчиваться в первую очередь.

Третья группа включает следующую аксиому существования состояний:

$$\left.\begin{array}{l} s\{((C_1 = St\,(s)) \equiv \text{Holds (Alive}, s) \;\&\; \text{Holds (Loaded}, s)) \\ \&\; ((C_2 = St\,(s)) \equiv \neg\,\text{Holds (Alive}, s) \;\&\; \text{Holds (Loaded}, s)) \\ \&\; ((C_3 = St\,(s)) \equiv \text{Holds (Alive}, s) \;\&\; \neg\,\text{Holds (Loaded}, s)) \\ \&\; ((C_4 = St\,(s)) \equiv \neg\,\text{Holds (Alive}, s) \;\&\; \neg\,\text{Holds (Loaded}, s)) \end{array}\right\}. \tag{5.4}$$

Далее мы сформулируем аксиому, которая устанавливает уникальность имен для флюент (т. е. Alive $\neq$ Loaded). Аксиома (5.4) гарантирует, что для каждой из четырех возможных комбинаций констант сорта «флюента» существует одно соответствующее состояние C такое, что в каждой ситуации S, которую функция St (s) отображает в состояние C, именно эта комбинация имеет место. Причина, по которой требуется введение подобной аксиомы, была указана в работах [11, 29]. Но в отличии от этих работ, мы явно вводим объектные переменные для состояний, оставаясь при этом в рамках языка первого порядка. Альтернативный способ формулировки этой аксиомы в языке второго порядка был предложен в [19, 18].

Четвертая группа аксиом содержит каузальные правила с предикатом Type. Выполняемые операторы будут охарактеризованы в сценарии посредством задания типов каждого оператора, другими словами, в сценарии указывается какие параллельные действия включены в каждый из выполняемых операторов. Затем предикат Type должен очерчиваться, чтобы гарантировать, что в конкретные операторы не входят никакие другие действия, кроме указанных в сценарии. Стратегия очерчивания описана в конце этого раздела. В нашем примере мы используем одно каузальное правило: (заметим, что мы намеренно опускаем действие Shoot):

$$\text{Holds(Loaded}, s)\;\&\; \text{Type}(o, \text{Trigger})\;\&\; \text{Type}(o, \text{Aim}) \supset \neg\,\text{Holds (Alive, Res}(o, s)) \tag{5.5}$$

Остановимся подробнее на следующем важном вопросе: как наш способ задания каузальных правил позволяет учесть запрещенные комбинации несовместимых действий. Этот вопрос не возникает в теориях, допускающих только последовательное выполнение действий. При одновременном осуществлении группы действий мы должны разделять следующие случаи.

1. Все действия элементарные (т. е. производят некоторый результат поодиночке) и независимые друг от друга.

2. Некоторые действия имеют совместный результат, невозможный при их одиночном осуществлении (например, действия Trigger и Aim), но при этом никакие действия не мешают выполнению друг друга.

3. Некоторые действия — элементарные, некоторые действия имеют совместный результат, но имеется действие (подгруппа действий), при выполнении которого невозможно либо осуществление некоторого другого элементарного действия, либо появление совместного результата некоторой подгруппы действий.

Реальность всех разобранных случаев легко подтверждается на примере взаимодействия агентов с частичным конфликтом интересов: при кооперации и/или при непротиводействии агентов мы имеем дело с первыми двумя случаями, при

противодействии одного из агентов другому (или группе других агентов) мы имеем дело с последней из упомянутых возможностей. Достоинством нашего способа представления параллельных действий является легкость задания каузальных правил во всех возможных случаях. Так, если мы знаем, что некоторое элементарное действие может быть осуществлено, только при условии, что некоторые другие действия $\{A_1, \ldots A_n\}$ не выполняются одновременно, нам достаточно в левую часть каузального правила добавить конъюнктивные члены вида $\neg\mathrm{Type}(o, A_i)$ $(i = 1, \ldots, n)$, указывающие, какие действия не должны входить в осуществляемый оператор. Каузальные правила, описывающие результат совместного выполнения совокупности действий, должны быть уточнены аналогичным образом. Заметим, что проблема, вызванная необходимостью учета в каузальных правилах взаимопрепятствующих действий, решается в статье [20] принципиально другим, намного более сложным образом (см. разд. 7).

Пятая группа содержит аксиомы уникальности имен:

$$\mathrm{Wait} \neq \mathrm{Shoot} \neq \mathrm{Aim} \neq \mathrm{Trigger}, \tag{5.6}$$

$$O_1 \neq O_2, \tag{5.7}$$

$$\mathrm{Avive} \neq \mathrm{Loaded}, \tag{5.8}$$

где O_1 и O_2 — конкретные константы сорта оператор из сценария. Аксиома $f = \mathrm{Alive} \vee f = \mathrm{Loaded}$, гарантирующая ограниченность области интерпретации флюент интерпретациями двух упомянутых констант, занимала центральное место в доказательстве корректности подхода, основанного на минимизации аномальности в состояниях [11, 29]. Поскольку в аксиоме (5.1), инерции подвержены только флюенты, включенные во фрейм, мы эту вспомогательную аксиому можем не формулировать.

Шестая группа аксиом включает аксиомы сценария:

$$\mathrm{Holds}\ (\mathrm{Alive},\ S_0) \tag{5.9}$$

$$\mathrm{Holds}\ (\mathrm{Loaded},\ S_0) \tag{5.10}$$

$$\mathrm{Type}\ (O_1,\ \mathrm{Wait}) \tag{5.11}$$

$$\mathrm{Type}\ (O_2,\ \mathrm{Trigger})\&\mathrm{Type}\ (O_2,\ \mathrm{Shoot})\&\mathrm{Type}\ (O_2,\ \mathrm{Aim}). \tag{5.12}$$

Стратегия очерчивания такова. Прежде всего мы очерчиваем предикат Frame при варьировании предиката Ab, согласно (3.2). Это означает, что минимизация предиката Frame имеет больший приоритет, чем очерчивание Ab [21, 18, 5]. Действительно, нам хотелось бы считать фиксированной совокупность первичных флюент (т. е. экстенсионал предиката Frame), когда мы описываем результаты действий. Затем в полученной теории поточечно очерчивается предикат Type в соответствии с (3.5) при одновременном варьировании его же на всей остальной области. Далее, на полученной теории очерчивается предикат Ab при одновременном варьировании предиката Holds. Формально,

$$\mathrm{Circum}(A;\ \mathrm{Frame};\ Ab) = A', \tag{5.13}$$

$$C_{\mathrm{Type}}(A';\ \mathrm{Type}/V_1) = A'', \tag{5.14}$$

$$\mathrm{Circum}(A'';\ Ab;\ \mathrm{Holds}), \tag{5.15}$$

где A — конъюнкция аксиом (5.1)—(5.12), и V_1 — это тождественно истинное выражение.

Очерчивание предиката Type устраняет все нежелательные характеризации операторов, а именно, гарантирует, что в группу действий, обозначенную оператором O_1 не входят ни одно из действий Trigger, Shoot, Aim, а в группу

действий, обозначенную оператором O_2 не входит элементарное действие Wait. Без такого уточнения экстенсионала предиката Type мы не могли бы гарантировать, что осуществление O_1 не приведет к активизации каузального правила (5.5).

Результат очерчивания (5.13)—(5.15) при изложенной выше стратегии очерчивания эквивалентен добавлению к аксиомам (5.1)—(5.12) следующих формул:

$$F_1 = \{\text{Frame}\ (f) \equiv [f = \text{Avive} \vee f = \text{Loaded}]\} \tag{5.16}$$

$$F_2 = \{\text{Type}\ (o, a) \equiv [o = O_1 \& a = \text{Wait} \vee o = O_2 \& a = \text{Trigger} \vee o = O_2 \& a = \text{Aim} \vee o = O_2 \& a = \text{Shoot}]\} \tag{5.17}$$

$$F_3 = \{Ab\ (f, o, c) \equiv [f = \text{Alive}\ \& o = O_2 \& c = C_1]\} \tag{5.18}$$

Таким образом

$$A' = \text{Circum}\ (A;\ \text{Frame};\ Ab) = A \& F_1, \tag{5.19}$$

$$A'' = C_{\text{Type}}\ (A';\ \text{Type}/V_1) = A' \& F_2, \tag{5.20}$$

$$\text{Circum}\ (A'';\ Ab;\ \text{Holds}) = A'' \& F_3. \tag{5.21}$$

Доказательство (5.19) очевидно (см., например, [21, 23]). Доказательство (5.21) мы приводим в следующем разделе, тем самым следуя сложившейся традиции доказывать отсутствие нежелательных следствий, характерных для YSP. Доказательство (5.20) может быть проведено аналогичным образом, при этом минимальность экстенсионала очерчиваемого предиката должна пониматься не в смысле включения множеств, а поточечно, как изменение его значения в каждой точке от true к false. Обозначим конъюнкцию аксиом (5.16)—(5.18) через W. Тогда для произвольной формулы B мы можем сказать, что Circum (A''; Ab; Holds) $\models B$ тогда и только тогда, когда $A \& W \models B$.

Перед тем, как обратиться к доказательству корректности нашего подхода, сделаем небольшое отступление. Нам хотелось бы привести дополнительные аргументы, демонстрирующие гибкость и эффективность нашего способа представления знаний о параллельных действиях, а именно, показать, что проблема характеризации всех предусловий действий может быть решена с помощью незначительного усложнения аксиоматизации. Поскольку простота примера, выбранного нами в качестве основы изложения, мешает пониманию этой проблемы, рассмотрим временно несколько измененную версию нашего примера. Предположим, что вместо аксиомы (5.10) мы включили бы в сценарий аксиому $\neg$Holds(Loaded, S_0). В этом случае оператор O_2 даже будучи осуществленным в первую очередь, не привел бы к активизации каузального правила (5.5), и следствие $\neg$Holds(Alive, Res(O_2, S_0)), не могло бы быть получено. Очевидно, что в этом случае очерчивание предиката аномальности Ab (f, o, $St(s)$) сводится к утверждению о пустоте его экстенсионала. Поэтому, согласно аксиоме инерции, мы получили бы, что

$$\neg\ \text{Holds}\ (\text{Loaded}, \text{Res}\ (O_2, S_0)),$$

$$\text{Holds}\ (\text{Alive}, \text{Res}\ (O_2, S_0)).$$

Теперь обратим внимание, что выведенные в таком случае формулы были бы бессодержательны: они соотносят флюенты с ситуацией, образовавшейся после выполнения оператора, который не может быть выполнен ввиду отсутствия предусловий для осуществления. Поэтому, в заключение этого раздела, нам хотелось бы предложить метод избавления от такого рода парадоксальных выводов. С этой целью введем новый бинарный предикатный символ Possible(a, $St(s)$),

аргументами которого являются переменная a сорта действие и состояние, соответствующее ситуации s. Этот предикат следует читать так: в состоянии, соответствующем ситуации s возможно осуществление действия a. При формулировке каузальной теории мы должны разбить каждое правило на две части, например:

$$\text{Holds (Loaded, } s) \supset \text{Possible (Trigger, } St\,(s)) \;\&\; \text{Possible (Aim, } St\,(s))$$

$$\text{Possible (Trigger, } St\,(s)) \;\&\; \text{Possible (Aim, } St\,(s))$$

$$\&\; \text{Type } (o, \text{Trigger}) \;\&\; \text{Type } (o, \text{Aim}) \supset \neg\, \text{Holds (Alive, Res } (o, s)).$$

Кроме того, мы должны добавить седьмую группу аксиом, утверждающую безусловную возможность каждого из действий, не упомянутых в каузальных правилах:

$$\text{Possible (Shoot, } St(s))$$

$$\text{Possible (Wait, } St(s)).$$

И, наконец, мы должны несколько видоизменить аксиому инерции:

$$\text{Frame } (f) \;\&\neg\, Ab\,(f, o, St(s)) \;\&\text{Type } (o, a) \;\&\; \text{Possible } (a, St\,(s))$$

$$\supset (\text{Holds } (f, s) \equiv \text{Holds } (f, \text{Res } (o, s))).$$

Теперь она применима только в случае, когда все действия, образующие оператор, индивидуально возможны.

Предикат Possible должен поточечно очерчиваться в теории A'', полученной в (6.19), при одновременном варьировании предиката Holds на области $V_2 = \lambda f, s'\,(s' \neq s)$, зависящей от точки очерчивания $(a, St(s))$, т. е. на таких значениях ситуаций s', которые отличаются от ситуации s соответствующей текущему состоянию $St(s)$. Результат этого очерчивания $C_{\text{Possible}}(A''; \text{Holds}/V_2)$, соответствующего формуле (3.4), обозначим через A'''. Затем, как и ранее, на полученной теории A''' очерчивается предикат Ab при варьировании Holds. Однако нам хотелось бы ограничиться в этой статье более простым случаем и не рассматривать далее предикат Possible.

6. Доказательство корректности. Основное утверждение, которое мы хотим доказать, состоит в том, что результатом очерчиваний (5.13)—(5.15) будет теория, имеющая единственную модель, в которой экстенсионал предиката Ab минимален.

Мы хотим показать, что после выполнения оператора O_1 и затем оператора O_2 Фред не будет жив, т. е. формула

$$\neg\, \text{Holds (Alive, Res } (O_2, (\text{Res } (O_1, S_0))) \tag{6.1}$$

выполнима в любой минимальной модели, которая соответствует очерчиванию Circum$(A''; Ab; \text{Holds})$, где A'' — теория, полученная в (5.20). Достаточно доказать, что

$$Ab\,(\text{Alive}, O_2, St\,(S_0)) \tag{6.2}$$

истинно в любой минимальной модели. В частности, будет показано, что никакие другие кортежи не входят в экстенсионал предиката Ab. Наше доказательство — это прямое обобщение [11, 19].

Пусть M — любая модель (5.1)—(5.12), определяемая универсумом, состоящим из следующих областей: область ситуаций $|M|_s$; область действий $|M|_a$, область состояний $|M|_c$, область флюент $|M|_f$, область операторов $|M|_o$; интерпретации констант: $M\,[[S_0]] \in |M|_s$, $M\,[[O_1]] \in |M|_o$, $M\,[[O_2]] \in |M|_o$, $M\,[[C_1]] \in |M|_c$, $M\,[[C_2]] \in |M|_c$, $M\,[[C_3]] \in |M|_c$, $M\,[[C_4]] \in |M|_c$, $M\,[[Wait]] \in |M|_a$, $M\,[[\text{Shoot}]] \in |M|_a$, $M\,[[\text{Aim}]] \in |M|_a$, $M\,[[\text{Trigger}]] \in |M|_a$, $M\,[[\text{Alive}]] \in$ $\in |M|_f$, $M\,[[\text{Loaded}]] \in |M|_f$, интерпретации отношений $M\,[[\text{Holds}]] \subset$

$\subset |M|_f \times |M|_s$, $M\,[[Ab]] \subset |M|_f \times |M|_0 \times |M|_c$, $M\,[[\text{Type}]] \subset |M|_0 \times |M|_a$; интерпретации функций:

$$M\,[[\text{Res}]] \subset |M|_0 \times |M|_s \to |M|_s,\ M\,[[St]] \subset (|M|_s \to |M|_c).$$

Для простоты записи вместо интерпретаций констант мы будем писать сами имена констант. Мы хотим показать, что $\langle \text{Alive}, O_2, St(S_0)\rangle$ единственная аномальность. Заметим, что несмотря на то, что область флюент не обязательно ограничивается флюентами, включенными во фрейм, достаточно просмотреть только восемь вариантов (четыре возможных состояния и два возможных оператора). Это следует из того, что инерция применяется только к первичным флюентам в соответствии с аксиомой (5.1) и предикат Frame очерчивается. Таким образом, если в некоторой модели «аномальными» будут непервичные флюенты, мы сможем найти другую модель, в которой область истинности предиката Ab меньше. Уникальность имен флюент следует из (5.8). Следовательно, без потери общности, мы можем рассматривать только те состояния, в которых известно, имеют ли место флюенты Loaded и Alive.

Рассмотрим оператор O_2. Пусть $C_1 \in |M|_c$ — состояние, соответствующее любой ситуации, в которой имеют место Alive и Loaded.

$$\langle \text{Alive}, S_1\rangle \in M\,[[\text{Holds}]]$$

$$\langle \text{Loaded}, S_1\rangle \in M\,[[\text{Holds}]]$$

$$M\,[[St]](S_1) = C_1.$$

Пусть ситуация S_2 — результат выполнения O_2 в ситуации S_1. Из каузального правила (5.5) следует, что Alive не имеет места в $\text{Res}(O_2, S_1)$. Единственный вопрос — имеет ли место Loaded (интуитивно, это так, т. е. нет аксиом, утверждающих, что ружье разряжается во время стрельбы, или во время прицеливания, или во время нажатия на курок). Предположим, что в S_2 ружье разряжено: $\neg\text{Holds}(\text{Loaded}, \text{Res}(O_2, S_2))$. Согласно аксиоме инерции (5.1), мы имеем:

$$\langle \text{Loaded}, O_2, C_1\rangle \in M\,[[Ab]]. \tag{6.3}$$

Покажем, что в этом случае M не минимальна. Аксиома (5.4) гарантирует, что существует состояние, в котором имеет место Loaded и не имеет места Alive. Таким образом, экстенсионал предиката Ab может быть уменьшен с помощью варьирования Holds так, чтобы Loaded имело место в результирующей ситуации (состоянии).

Для этого определим другую модель M' теории (5.1)—(5.12) в точности совпадающей с M за исключением

$$\langle \text{Loaded}, S_2\rangle \in M'\,[[\text{Holds}]]$$

$$M'\,[[St]](S_2) = C_2$$

$$M'\,[[Ab]] = M\,[[Ab]] - \langle \text{Loaded}, O_2, C_1\rangle.$$

Это устраняет аномальность (6.3), так как предикат Ab в качестве своего аргумента имеет состояния, а не ситуации. Важно заметить, что модель M' может быть построена без каких-либо других аномальностей. Действительно, если в модели M' пара, образованная некоторой третьей (не принадлежащей к фрейму) флюентой и ситуацией S_1 (отображаемой в состояние C_1), входит в $M'[[\text{Holds}]]$, но пара, образованная этой же флюентой и ситуацией S_2 (отображаемой в состояние C_2) не входит в $M'[[\text{Holds}]]$, то это не приведет к появлению новой аномальности, так как в экстенсионал предиката Frame входят только две флюенты и закон инерции применяется только к этим флюентам. Следовательно, модель M не минимальна.

Рассмотрим результаты выполнения оператора O_2 в трех других состояниях. В каждом из этих случаев оператор O_2 не влияет на значение ни одной флюенты, так как ни одно каузальное правило не применимо. Следовательно, все аномальности могут быть устранены по аналогии с предыдущим случаем.

Рассмотрим оператор O_1. Он не влияет ни на одно значение флюенты ни в одном состоянии. Все аномальности могут быть устранены. Поскольку не существует модели, в которой область истинности предиката Ab была бы меньше, полученная модель является минимальной и, следовательно, (6.2) — единственная аномальность. Итак, (6.1) выполняется в этой единственной минимальной модели (т. е. Фред умрет).

7. Обсуждение. Можно было бы ввести параллельные действия в ситуационное исчисление с помощью функции Compose (отображающей пару действий в действие):

$$\text{Holds (Loaded, } s) \supset \neg \text{ Holds (Alive, Res (Compose (Aim, Trigger), } s)).$$

Подобный подход используется в [25]. Но тогда, если рассматриваются комбинации действий, включающие действие, которое не меняет никакие факты, требуется включать в теорию большое количество новых каузальных правил. Например, в качестве возможной вариации на тему YSP вообразим себе множество свидетелей, наблюдающих (watch) убийство Фреда. Ни одно из watch действий ничего не меняет. Но чтобы учесть результаты всех действий, объединенных функцией Compose, требуется гораздо больше каузальных правил, чем число потенциальных наблюдателей, в противном случае необходимые следствия не могут быть выведены.

Согласно методу, предложенному Л. Шубертом [16], действия a_1, a_2 объединяются функцией Costart (a_1, a_2). Однако ему удается преодолеть упомянутую только что трудность, благодаря тому, что инерция флюент обеспечивается специальными аксиомами объяснения. Ни очерчивание, ни какой-либо другой немонотонный подход не используется. Но отслеживание изменений при его подходе слишком усложнено, так как он добавляет в левую часть каузальных правил предикат Compatible(a, p), где a обозначает действие и p обозначает план (комбинацию действий). Это будет препятствовать выводу по умолчанию следствий о результате выполнения неспецифицированного действия. Наша модификация YSP демонстрирует, что подразумеваемые следствия могут быть получены, несмотря на то, что каузальное правило (5.5) не упоминает действие Shoot. По нашему мнению, существенным недостатком этой работы, как, впрочем, и работы Вебера, использующей тот же подход к решению фрейм-проблемы, является необходимость выписывания полной каузальной теории поведения агентов. Это означает, что для каждого возможного в проблемной области изменения должна быть сформулирована аксиома, перечисляющая все причины этого изменения. Наш подход позволяет избежать такого перечисления. Преимуществом метода Шуберта является простая генерация объяснений. Но этого направления исследований в нашей статье мы не касаемся.

Метод представления параллельно происходящих действий, похожий на наш, был предложен в работах Ф. Лина и И. Шоема [31, 20]. Авторами используется бинарный предикат $In(a, \{A_1, \ldots A_n\})$, выражающий принадлежность примитивного действия a глобальному $\{A_1, \ldots A_n\}$. В каузальных правилах он выполняет функцию, аналогичную роли нашего предиката Type. Выполняемые глобальные действия описываются явным указанием того, какие примитивные действия они содержат, поэтому очерчивания предиката In не требуется. Но такой способ представления параллельных действий в рамках ситуационной онтологии приводит к дополнительной трудности. Для каждого глобального действия, включающего элементарные действия, меняющие какие-то факты, и не содержащего элементарные действия, препятствующие его выполнению, требуется включение в теорию аксиомы, гарантирующей наследование глобальным действием свойств элемен-

тарного. На этот недостаток подхода Лина и Шоема указывал также М. Шанахан [32]. Выделение «глобального действия» в качестве самостоятельного онтологического примитива, названного в этой статье оператором, позволяет нам обойти эту трудность.

Каузальные правила по своей структуре не имеют существенных отличий от наших, за исключением того, что вместо предиката Type используется предикат *In*. Кроме того, для запрещения комбинаций несовместимых действий в каузальных правилах содержатся тернарный предикат Canceled (g_1, g_2, s), который входит в них с отрицанием. Этот предикат истинен, если нормальный результат глобального действия g_1 запрещается некоторыми другими действиями в g_2. Такое представление содержит ряд существенных недостатков. Во-первых, необходимо использование технически изощренных тактик очерчивания для учета взаимовлияний и/или отсутствия взаимопрепятствий между действиями (на это указывают сами авторы работы). Во-вторых, предположим, что используются действия, входящие в одно каузальное правило и приводящие к некоторому совместному результату. Если следовать идеологии авторов, каузальное правило должно иметь вид:

$$\forall sg \text{ Holds (Loaded, } s) \ \& In \text{ (Trigger, } g) \ \& In \text{ (Aim, } g) \ \&$$

$$\neg \text{ Canceled (Trigger, } g, s) \ \& \ \neg \text{ Canceled, (Aim, } g, s) \supset \text{Holds (Alive, Res } (g, s))$$

При очерчивании предиката Canceled возникают две минимальные модели — в первой из них Canceled(Trigger, {Trigger, Aim}) истинно, и вторая, в которой Canceled(Aim, {Trigger, Aim}) истинно, что может привести к нежелательным следствиям. Наше решение избегает всех этих проблем, к тому же мы обходимся без введения нового предиката, что более предпочтительно.

Заключение. В работе предложена теория параллельных действий, позволяющая представлять знания о параллельно происходящих действиях, не все из которых специфицированы каузальным правилом. Мы можем утверждать, что фрейм-проблема для действий и флюент решается при данном подходе, причем сложность данного решения существенно меньше аналогичного монотонного. Мы считаем, что проблема полной характеризации всех предусловий (англ. qualification problem) может быть решена не только указанием обстоятельств, препятствующих выполнению действия, но и указанием достаточных предпосылок действия, что, по нашему мнению, эквивалентно. Упомянутая проблема в нашей формулировке может быть решена с помощью очерчивания предиката Possible. Наш подход допускает наличие косвенных результатов действий, выводимых в случае присутствия в теории статических закономерностей. Это означает, что мы решаем также проблему ветвления (англ. ramification problem).

По нашему мнению, представление параллельных действий должно использоваться для рассуждения о длящихся действиях, так как непрерывные изменения могут перекрываться во времени.

Одно из дальнейших направлений развития нашей работы состоит в рассмотрении иерархии действий, например

$$\forall o \text{ (Type } (o, \text{Drive}) \supset \text{Type } (o, \text{Move}))$$

Важным вопросом является алгоритмическое вычисление очерчивания. Этот вопрос будет обсуждаться в наших дальнейших работах.

Существует соответствие между целями нашей статьи и направлением исследований, развиваемым М. Шанаханом [15]. Более тщательное сравнение наших подходов — предмет наших дальнейших исследований.

Наши дискуссии с Андреем Бондаренко и Чарльзом Элканом помогли в совершенствовании ясности изложения. Мы благодарны Меррею Шанахану, приславшему отзыв на нашу работу с чрезвычайно полезными замечаниями. Мы признательны В. Л. Стефанюку и анонимным рецензентам первоначального варианта статьи, которые внесли множество предложений, способствовавших улучшению стиля. Особо хочется поблагодарить всех ученых, приславших нам копии своих статей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Байдун В. В., Бунин А. И., Бунина О. Ю.* Логико-лингвистическая модель анализа текстовых описаний динамических пространственных сцен в системе ТЕКРИС // Программные продукты и системы. 1992. № 3.
2. *Литвинцева Л. В.* Концептуальная модель системы визуализации трехмерных динамических сцен // Программные продукты и системы. 1992. № 2.
3. *Мулен Э.* Теория игр с примерами из математической экономики. М.: Мир, 1985.
4. *McCarthy J.* Circumscription — a form of nonmonotonic reasoning // Artific. Intell. 1980. V. 13.
5. *McCarthy J.* Applications of circumscription to formalizing commonsense nonmonotonic reasoning // Artific. Intell. 1986. V. 28.
6. *Hanks S., McDermott D.* Nonmonotonic logics and temporal projection // Artif. Intell. 1987. V. 33.
7. *Златарева Н., Попчев И.* Немонотонные рассуждения в интеллектуальных системах // Изв. АН РАН. Техн. кибернетика. 1992. № 5.
8. *Хайс П.* Логика действий // В сб.: Интегральные роботы. Вып. 2. М., 1975.
9. *McCarthy J., Hayes P.* Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence // Eds. B. Meltzer, D. Michie. Machine Intelligence. V. 4. Edinburgh University Press, 1969.
10. *Сучанский М. Е.* Рассуждения о физических системах на качественном уровне // Изв. АН РАН. Техн. кибернетика. 1992. № 5.
11. *Baker A. B.* Nonmonotonic reasoning in the framework of situation calculus // Artif. Intell. 1991. V. 49.
12. *Elkan Ch.* Reasoning about action in first-order logic. Proc. of the 9th Biennual Confer. of Canadian Society of Computat. Study of Intelligence (CSCSI'92), 1992.
13. *Gelfond M., Lifschitz V., Rabinov A.* What are the limitations of the situation calculus? Essays for Bledsoe, Ed. R. Boyer, Kluwer Academic, 1991.
14. *Reiter R.* The frame problem in the situation calculus: a simple solution (sometimes) and a completeness result for goal regression // Artificial Intelligence and Mathematical Theory of Computation: Papers in Honor of John McCarthy, Academic Press, San Diego (CA), 1991.
15. *Shanahan M.* Circumscriptive calculus of events. Imperial College Department of Computing Research Paper, April, 1992.
16. *Schubert L.* Monotonic solution of the frame problem in the situation calculus: an efficient method for worlds with fully specified actions. H. E. Kyburg, Jr. et al. (eds.). Knowledge Representation and Defeasible Reasoning, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1990.
17. *Weber J. C.* On the representation of concurrent actions in the situational calculus // Proc. of the 8th Biennual Confer. of Canadian Society of Computat. Study of Intelligence, Ottava, 22—23 May, 1990.
18. *Lifschitz V.* Toward a metatheory of action. Proc. of the 2nd Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, Ed. 1991.
19. *Lifschitz V.* Frames in the space of situations // Artif. Intell. 1990. V. 46. N 3.
20. *Lin F., Shoham Y.* Concurrent actions in the situation calculus. Amer. Assoc. of Artif. Intell., 10th National Conference on Artif. Intell. 1992. V. 1.
21. *Lifschitz V.* Computing circumscription // Proc. of the 9th Int. Joint Conf. on Artif. Intell., Los Angeles (CA), August 1985. V. 1.
22. *Lifschitz V.* Pointwise circumscription: preliminary report. // Amer. Assoc. of Artif. Intell., 5th National Conference on Artif. Intell. 1986. V. 1.
23. *Lifschitz V.* Circumscriptive theories: a logic — based framework for knowledge representation / Ed. R. H. Thomason. Philosophical Logic and AI, Kluwer Academic Publ., Amsterdam, 1989.

24. *Georgeff M.* The representation of events in multiagent domains // Proc. of the 5th AAAI-86, 70—75.
25. *Grobe G., Waldinger R.* Towards a theory of simultaneous actions // Proceedings of the European workshop on planning—91 (Sankt Augustin FRG), held 18—19 March, 1991. Lect. Notes in AI, N 522, Springer Verlag, Berlin, 1991. 78—87.
26. *Pednault E.* Formulating multiagent, dynamic-world problems in the classical planning framework // Proc. of the 1986 workshop / Reasoning about Actions and Plans / M. Georgeff, A. Lansky (eds.), Morgan Kaufmann, Mountain View (CA), 1987.
27. *Pelavin R. N., Allen J. F.* A formal logic of plans in temporally rich domains // Proc. of the IEEE. V. 71. N 10 (October). 1986.
28. *Pelavin R. N., Allen J. F.* A model for concurrent actions having temporal extent // Proceedings of the 6th AAAI—87. V. 1.
29. *Baker A. B., Ginsberg M. L.* Temporal projection and explanation // Proc. of the 11th Int. Joint Conf. on Artif. Intell., Detroit (MI), August 1989.
30. *Soutchanski M. E., Ternovskaia E. A.* Situation calculus is still alive, but Fred is not: reconciliation with concurrent actions. The paper has been accepted for presentation at the workshop on (Logic and Change) at GWAI'92 (Bonn, Germany, 1—3 September 1992).
31. *Lin F., Shoham Y.* Provable correct theories of action // Amer. Assoc. of Artif. Intell. 9th National Conference on Artif. Intell. 1991. V. 1.
32. *Shanahan M.* E-mail message N frigate. do. 395. Date: Wednesday, 20th January 1993. 13 : 12 : 01.

Москва
ВЦ РАН

Поступила в редакцию
7.IV.1993