ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Ходаков В.Е., Граб М.В.

Херсонский государственный технический университет, 325008, Бериславское шоссе, 24, (0552) 55-17-31, hod@ist.com.ua, marisha@selena.net.ua

У статті запропоновано використання алетичної модальної логіки на базі семантики можливих „світів" Кріпке для моделювання динаміки лісових пожеж. Описано геометричну структуру зони пожежі у вигляді сукупності плоских і тривимірних просторових об'єктів різних сортів. Наведено підхід до опису динаміки предметної області за допомогою алетичної модальної логіки.

Using of aletic modal logic on the base of semantic of possible "worlds" Kripke for forest fires dynamic modeling is offered. Geometric structure of fire zone as a set of flat and three-dimensional spatial objects is described. The approach to describing of domain area with the help of aletic modal logic is given.

Введение

Лесные пожары наносят существенный ущерб человеку и окружающей его среде. Среди негативных последствий пожаров можно выделить следующие: снижение защитных, воохранных и других полезных свойств леса, уничтожение полезной фауны, гибель массивов ценных древесных пород, прерывание естественного процесса лесоовозобновления и грунтообразования, радиоактивное загрязнение близлежащих населенных рунктов в результате переноса радионуклидов продуктами горения, загрязнение рек, озер вследствие смыва в них продуктов горения, гибель или более позднее вызревание сельскохозяйственных культур. На тушение лесных пожаров ежегодно отвлекается от производительного труда большое количество местного населения, рабочих и служащих, а также техники, что отрицательно сказывается на своевременности выполнения сельскохозяйственных работ и на деятельности промышленных предприятий в лесных районах.

В связи с тем, что экспериментальное изучение лесного пожара есть дорогим и не представляется возможным проводить полное физическое моделирование, представляют интерес теоретические методы исследования. Довольно актуальной является разработка новых математических методов, связанных с моделированием лесного пожара, что и предлагается в статье.

Состояние работ в области моделирования распространения лесных пожаров

В настоящее время существует огромное количество работ по моделированию горения растительных материалов при пожарах. Каждая из них вносит вклад в развитие теории лесных пожаров, однако моделей, достаточно полно учитывающих весь комплекс процессов в горючем материале и воздухе, не так уж и много.

Самые ранние из известных работ в области моделирования лесных пожаров относятся к 1920-1950 годам (работы Митчелла, Карри, Фонса, Амосова, Дэвиса, Байрама, Вонского, Мелехова, Анцышкина и др.[1,2]). Каждая из них посвящена исследованию отдельных вопросов, таких, как теплофизические свойства растительных горючих материалов, способы передачи тепла при пожаре и другим. Эти работы положили начало теории лесных пожаров и не могут быть использованы на практике самостоятельно.

В 1960-1970 годы были предприняты попытки изучения механизмов процесса горения и построены соответствующие модели (Линдермут, Байрам, Ван-Вагнер[1], Теплицын, Томас, Андерсен, Ротермел, Амосов [2]). Однако и они не достаточно целостно описывают процесс распространения лесного пожара.

Только в последние десятилетия появились работы, которые более полно учитывают весь комплекс физико-химических процессов, протекающих в зоне пожара (работы Конева [3], Гришина [4]), а вследствие развития компьютерной техники появилась возможность использовать такие модели.

Однако использование физических моделей затруднено спецификой рассматриваемой предметной области. Для применения таких моделей требуется большое количество разнородных исходных данных, характеризующих как область местности, на которой развивается пожар, так и метеоусловия. Факел пламени распространяется в трехмерном пространстве. Таким образом, для повышения точности модели необходимо рассматривать физико-химические процессы, развивающиеся в объеме. Зона пожара, в которой протекают эти процессы, многофазна, то есть состоит из набора относительно однородных пространственных элементов (газово-воздушная фаза, ствол дерева, крона дерева). Это затрудняет ее представление в виде непрерывной. Исходные данные, характеризующие форму, размеры и расположение пространственных элементов зоны пожара, слабо структурированы. От степени формализации этих данных зависит точность модели распространения пожара. Что касается данных, характеризующих метеоусловия, то они неточны. Таким образом, для использования физико-химических моделей распространения лесных пожаров необходим аппарат, позволяющий формализовать слабо структурированные неточные исходные данные. Для этого предлагается применить аппарат математической логики, которая позволяет сформировать на основе исходных данных проблемноориентированную БЗ.

Цель

Целью настоящей статьи является разработка методов построения проблемноориентирванной базы знаний для формализации исходных данных к физической модели распространения лесного пожара с помощью аппарата математической логики.

Геометрическая структура зоны пожара

При моделировании динамики лесного пожара будем выделять участок трехмерного пространства, занятый факелом пламени, называемый зоной пожара. Зона пожара многофазна и обладает статическими и динамическими свойствами. Статические свойства зоны пожара несут информацию о множестве ее однородных участков (газово-воздушная фаза, деревья, которые, в свою очередь, состоят из крон, стволов). Динамические свойства зоны пожара отображают динамику геометрической формы области, занятой пожаром.

Статическая информация о зоне пожара оказывают существенное влияние на динамику лесного пожара. Поэтому от выбора способов ее формализации зависит степень адекватности модели пожара реальности.

Многофазность зоны пожара затрудняет ее представление в виде непрерывной среды, поэтому появилась необходимость дискретизировать зону пожара на однородные участки. Дискретизация на однородные участки будет проходить в два этапа. На первом этапе местность проектируется на горизонтальную плоскость и дискретизируется на плоские однородные участки, такие, как однородные участки леса, водоисточники, дороги. При этом однородные участки леса содержат совокупность деревьев, геометрическая форма, размеры и расположение которых оказывают влияние на распространение пожара. Поэтому на втором этапе дискретизации происходит выделение трехмерных однородных объектов зоны пожара: воздушная фаза, крона дерева, ствол дерева.

Естественно рассматривать однородные участки зоны пожара как пространственные объекты со своими свойствами, связанные определенными отношениями. Объектно-ориентированный подход к организации пространственных данных связан с временными затратами на практическую организацию всей системы взаимосвязей объектов. Однако эти затраты оправдываются удобством манипулирования объектами, как целостными структурами, обладающими определенными свойствами и связанными определенными отношениями. Тем более, что геометрическая информация о среде, в которой развивается пожар, статична, и временные затраты требуются только на подготовительном этапе моделирования.

В отличие от геометрической структуры местности, геометрическая форма пожара динамически изменяется во времени. Поэтому при выборе способа отображения области, занятой пожаром, возникают некоторые сложности. Выбранный способ отображения геометрической формы пожара должен быть удобен для проведения расчетов его динамики. В качестве наиболее подходящей технологии отображения пространственных данных о геометрии пожара выбрана ячеечная с регулярной сеткой ячеек. Сделано это по нескольким причинам. Во-первых, простота компонентов ячеечной технологии (как правило, это простые геометрические фигуры: прямоугольники, треугольники и др.), используемых для моделирования поведения пожара, позволяет задавать на них любые законы и ограничения. Во-вторых, вследствие регулярности сетки ячеек, от них легко перейти к любой другой форме представления пространственной информации.

Однако, для того, чтобы использовать ячеечную технологию для визуального отображения динамики пожара, необходимо от объектов, моделирующих однородные участки местности, перейти к ячейкам. Здесь происходит третий этап дискретизации среды: дискретизация области, состоящей из однородных участков, на ячейки, которые будем называть элементарными. Каждая элементарная ячейка будет наследовать статические свойства однородного участка местности, к которому принадлежит ее центр, а также будет обладать дополнительными динамическими свойствами, отражающими процесс горения. Область, занятая пожаром, будет представлять собой множество таких ячеек, каждая из которых является объектом.

Динамика пожара определяется динамикой всей области трехмерного пространства, в которой развивается факел пламени. Так как эту область сложно представить в виде непрерывной, то невозможно смоделировать динамику факела пламени дифференциальными уравнениями. Поэтому возникает необходимость решать задачу численными методами, для этого дискретизируем зону пожара элементарными кубическими объемами, каждый из которых представляет собой объект. Эта процедура составляет четвертый этап дискретизации зоны пожара. При этом каждый элементарный объем будет принадлежать определенному однородному статическому пространственному объекту зоны пожара, и, в зависимости от этого, его поведение будет подчиняться определенным законам.

Таким образом, дискретизация зоны пожара происходит в четыре этапа:

1) дискретизация местности, спроектированной на горизонтальную плоскость, на однородные участки;
2) дискретизация зоны пожара на трехмерные однородные объекты;
3) дискретизация области на элементарные ячейки;
4) дискретизация зоны пожара на элементарные кубические объемы.

Требования к логическому исчислению

Сложность геометрической структуры зоны пожара, а также происходящих в ней процессов накладывает существенные ограничения на выбор и разработку соответствующего формально-логического аппарата для решения поставленной задачи. Очевидно, что создание логических исчислений, связанных с моделированием такого природного явления, как лесной пожар, требует учета как общих требований, предъявляемых к формальным системам, так и требований, определяемых спецификой предметной области. К числу требований, предъявляемых к логическому исчислению при описании статики предметной области, относятся:

1) формализация слабоструктурированных исходных данных посредством выделения пространственных объектов, описания их свойств, таких, как форма, размеры и расположение;

2) описание иерархии исследуемых объектов посредством введения отношений между ними, таких, как «экземпляр-класс», «род-вид», «часть-целое», «элемент-множество», «потомок-предок» и других.

Требования к логическому исчислению при описании динамики, следующие:

1) учет неточности входных данных;
2) описание случайной формы пожара за счет учета неточности входных данных;
3) описание суждений, содержащих информацию о законах физики, и суждений, не противоречащих законам физики;
4) учет изменений во времени.

Возможности использования известных логических исчислений

При моделировании динамики предметной области логическое исчисление должно удовлетворять четырем основным требованиям, приведенным выше. Несмотря на такие достоинства классической логики, как широкие выразительные возможности и наличие развитых процедур доказательств, она имеет ряд существенных недостатков, затрудняющих ее применение для описания динамики исследуемой предметной области:

- неограниченная применимость принципа двузначности, согласно которому каждое высказывание является либо истинным, либо ложным;
- неограниченная применимость закона исключенного третьего;
- неспособность языка классической логики вследствие его бедности передавать рассуждения о событиях, не имеющих место в действительном мире;
- отсутствие формальных средств представления неполноты, неточности и противоречивости знаний.

Ликвидировать указанные недостатки можно с помощью неклассической логики. Остановимся подробнее на неклассических логических исчислениях.

В основу интуиционистской логики Гейтинга положено непринятие принципа всезнания (закона двойного отрицания), что позволяет накапливать знания об объектах и повышает выразительные возможности по сравнению классической логикой. Введение дополнительного значения истинности “неопределенно” позволяет не только описывать знания о предметной области, но также и определять их отсутствие. Вместе с тем в этой логике отсутствуют средства представления противоречивых знаний, а непринятие принципа всезнания существенно осложняет процесс логического вывода, что предопределяет нецелесообразность использования средств интуиционистской логики в рассматриваемой предметной области.

В многозначных логиках, в отличии от классической логики, наряду с истинными и ложными утверждениями допускаются также разного рода неопределенные утверждения. Известны трехзначные системы Лукасевича, Бочвара, четырехзначная система Финна, k-значная и бесконечнозначная системы Поста. Многозначные логики позволяют описывать неполноту и противоречивость высказываний, что существенно повышает выразительные возможности многозначного логического исчисления. Однако существует негативная сторона многозначной логики – сложность формирования многозначных высказываний на основе конкретных фактов предметной области. Это явилось стимулом к появлению и развитию нечеткозначных логик с использованием принципов, изложенных в теории Л.Заде. В нечеткозначных логиках каждому высказыванию ставится в соответствие функция принадлежности, характеризующая его точность и степень истинности. Подобный подход используется и в вероятностных логиках.

Общим недостатком перечисленных логических исчислений является их некоторая отдаленность от объективной реальности и возникающие в этой связи сложности перехода от реальной картины мира к ее формальному представлению в терминах соответствующего логического исчисления. Данная проблема может быть решена путем использования псевдофизических или модальных логик.

Псевдофизические логики наиболее приспособлены к формализации знаний о физической реальности, поскольку охватывают определенные классы представлений субъекта о тех или иных явлениях окружающего мира. Своим названием псевдофизические логики обязаны использованию в их правилах вывода свойства восприятия человеком окружающего мира, обладающего определенными особенностями. Псевдофизические логики обладают большими преимуществами в случае использования их в системах представления знаний, а также при планировании целесообразного поведения. При этом для достижения целей используются не только выводы, характерные для дедуктивных систем, но и правдоподобные правила индуктивного вывода. Однако здесь необходимо учитывать, что сфера использования псевдофизических логик ограничивается областью их специализации, что несколько снижает ценность подобных исчислений. Негативным фактором является также относительно слабая проработка теоретических аспектов многих псевдофизических логик.

Модальные логические исчисления формируются на основе стандартных исчислений, путем расширения их дополнительной информацией о логическом или фактическом статусе суждения, о регулятивных, оценочных, временных и других его характеристика [11, 12]. Существуют различные группы модальностей: алетические, когда оценка того, что утверждается в суждении дается с позиций законов науки (используются модальные операторы «необходимо», «возможно»); эпистемические, когда оценка дается с позиций познания (используются модальные операторы «доказано», «опровергнуто» и др.); деонтические, когда оценка дается с позиций норм права (используются модальные операторы «обязательно», «разрешено», «запрещено» и др.); темпоральные (временные) (используются модельные операторы «раньше», «позже» и др.) и другие. В модальных логиках, как и в многозначных, допускается несколько значений истинности, одно из которых носит более универсальный характер. Выразительная мощность нормальной модальной пропозициональной логики сопоставима с мощностью обычной логики высшего порядка, но при этом она лишена существенных ограничений, присущих последней.

Среди известных семантических интерпретаций модальных логик особое место занимает семантика Крипке. В модели Крипке задается множество возможных «миров» (состояний), в которых может находиться объект, а также отношение достижимости на этом множестве. При этом модальный оператор «необходимо» интерпретируется как «истинно во всех возможных достижимых мирах», а оператор «возможно» - как «истинно хотя бы в одном из возможных достижимых миров».

Приведенный анализ показывает, что среди известных логик нет таких, которые в полной мере удовлетворяли бы всем требованиям к логическому исчислению для описания динамики предметной области. Поэтому необходимо выделить те логические исчисления, сочетание которых позволит описать знания о динамике. Исходя из требований, предъявляемых к логике представления знаний о динамике рассматриваемой предметной области, наиболее подходящими являются модальные логические исчисления, гармонично сочетающие в себе преимущества псевдофизических логик с точки зрения гибкости представления знаний об окружающем мире, и широкие выразительные возможности, которыми обладают многозначные логики. При этом третьему требованию к описанию динамики (из приведенных в предыдущем пункте) удовлетворяет алетическая модальная логика, четвертому требованию – темпоральная. Для удовлетворения первым двум требованиям эти логики необходимо дополнить средствами представления неточной информации. Необходимость введения понятия относительности истинности в определенных границах пространства-времени служит аргументом в пользу применения модальных логик, формируемых на основе семантики возможных «миров» Крипке. При этом алетическая модальная логика на основе семантики возможных «миров» Крипке позволит описать качественные переходы объектов предметной области из состояния в состояние, а темпоральная логика позволит рассмотреть эти переходы на временной шкале.

Логическое описание динамики предметной области

При формализации динамики необходимо описать логику дискретных переходов элементарных динамических объектов из одного состояния в другое. Будем различать динамику распространения пожара на плоскости и в пространстве. Динамика распространения пожара на плоскости описывается с помощью элементарных ячеек, в пространстве – с помощью элементарных объемов.

Выделим сорта динамических элементарных объектов и обозначим их соответствующими константами. Сорта выделены в зависимости от различий в наборах соответствующих их объектам возможных «миров» и, соответственно, переходов между «мирами». Поэтому каждый объект определенного сорта будет иметь одинаковый набор возможных «миров», а отношение достижимости одного «мира» из другого будет содержать одинаковые множества пар «миров». В связи с этим выделяются следующие сорта: S = {Ячейка_огнеоп, Ячейка_неогнеоп, Эл_объем_своб, Эл_объем_занятый_кроной, Эл_объем_занятый_стволом, Эл_объем_смешанный}.

Первый и второй сорта описывают динамику пожара на плоскости, объектами этих сортов являются элементарные ячейки. Четыре остальные сорта описывают динамику пожара в пространстве, их объектами являются элементарные объемы.

Объектами первого сорта являются «огнеопасные» ячейки, содержащие горючее вещество и при определенных температурах и влажности способные воспламеняться. Объекты второго сорта – это «неогнеопасные» ячейки, которые не будут воспламеняться при любых условиях (например, участок водоема). Объектами третьего сорта являются «свободные» элементарные объемы, не пересекающиеся с кроной или стволом дерева. Объектами четвертого сорта являются элементарные объемы, которые пересекаются с кроной дерева, но не пересекаются со стволом. Объекты пятого сорта – это элементарные объемы, которые пересекаются со стволом дерева и не пересекаются с кроной. Объектами последнего сорта являются элементарные объемы, пересекающиеся с кроной и со стволом дерева одновременно.

Зададим множество возможных «миров» и отношение достижимости между «мирами» для объектов каждого вида. Каждое такое множество в качестве одного из «миров» будет содержать «пассивное состояние» - это «мир», в котором характеристики объекта не меняются.

Множество возможных «миров» объектов первого сорта, отображающих поведение «огнеопасных» ячеек: C^1 = <"Пассивное состояние", "Сушка", "Пиролиз", "После пиролиза">.

Состояние «Сушка» означает стадию высушивания лесного горючего материала. Состояние «Пиролиз» - это разложение органической части лесного горючего материала с образованием реакционноспособных горючих и негорючих газообразных продуктов, а также конденсированных частиц (дыма). Состояние «После пиролиза» наблюдается после окончания стадии пиролиза.

Отношение достижимости одного мира из другого для моделей первого вида обозначим Q^1. Зададим его экстенсионально при помощи перечисления пар состояний, находящихся в отношении Q^1:

«Пассивное состояние» Q^1 «Сушка»;

«Сушка» Q^1 «Пиролиз»;

«Пиролиз» Q^1 «После пиролиза».

На рис. 1 показаны различные свойства отношения Q^1.

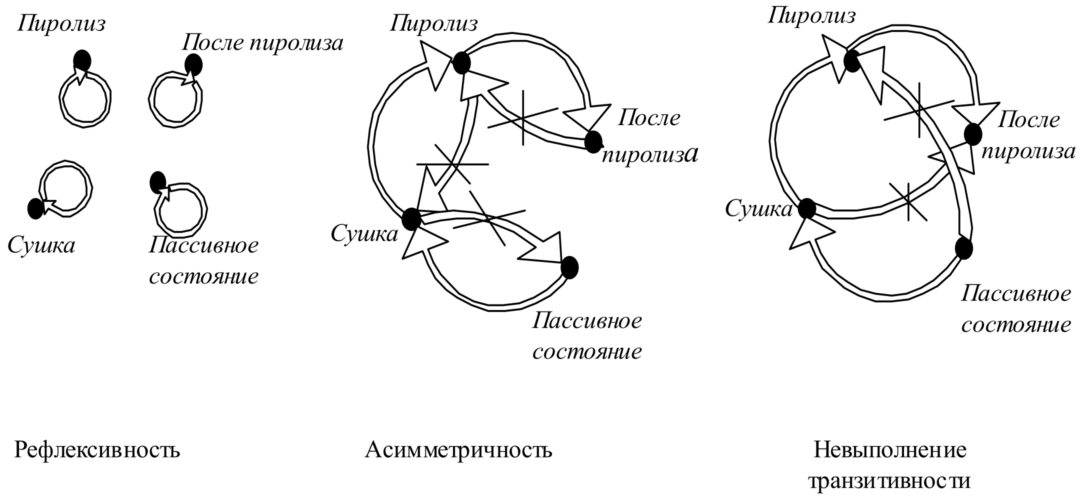

Рис.1. Некоторые свойства отношения достижимости «миров» объектов первого сорта

Зададим множество моделей для объектов второго сорта.

Множество возможных «миров» для объектов второго сорта, отображающих поведение «неогнеопасных» ячеек, будет состоять из одного элемента, назовем его «Пассивное состояние»: C^2 = <“Пассивное состояние”>. Вследствие этого отношение достижимости миров Q^2 будет пусто, то есть не возможны переходы из одного состояния в другое.

Зададим множество моделей для объектов третьего сорта (для «свободных» элементарных объемов).

Множество возможных «миров» для этого этих объектов: C^3 = <”Пассивное состояние”, “Нагрев до горения”, “Горение”, “После горения”>.

Состояние “Нагрев до горения” – это нагрев элементарного объема до температуры горения, состояние “Горение” – это горение горючих газообразных продуктов пиролиза в элементарном объеме, состояние “После горения” начинается с момента окончания стадии горения.

Экстенсионально зададим отношение достижимости одного мира из другого при помощи перечисления пар состояний, находящихся в отношении Q^3:

«Пассивное состояние» Q^3 «Нагрев до горения»;

«Нагрев до горения» Q^3 «Горение»;

«Горение» Q^3 «После горения».

На рис. 2 показаны различные свойства отношения Q^3.

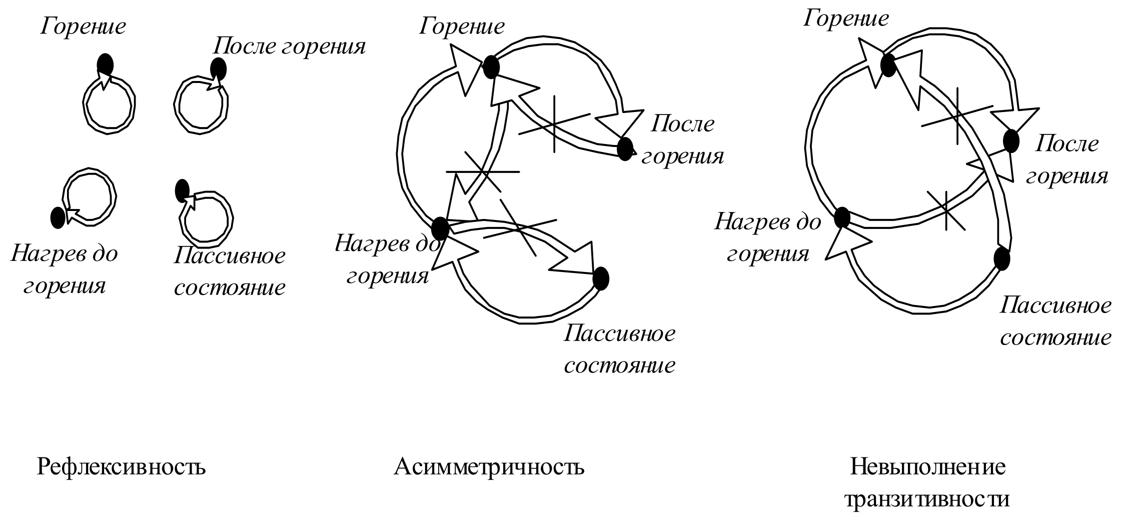

Рис.2. Некоторые свойства отношения достижимости «миров» объектов третьего сорта

Зададим множество моделей для объектов четвертого сорта (для элементарных объемов, пересекающихся с кроной дерева).

Так как в этих элементарных объемах присутствует органическая масса в виде кроны дерева, то в ней возможны при достижении достаточной температуры процессы сушки органической массы, пиролиза и горения. Множество возможных «миров» для таких элементарных объемов: C^4 = <"Пассивное состояние", "Сушка", "Сушка+горение", "Пиролиз", "Пиролиз+горение", "Горение", "После горения">. Состояние "Сушка" характерно для сушки органической массы, когда в элементарном объеме не происходит горение. Состояние "Сушка+горение" характерно для процесса сушки органической массы, когда в элементарном объеме есть горючее вещество, поступившее из соседних объемов, которое горит. Состояние "Пиролиз" – это пиролиз сухого органического вещества. Состояние "Пиролиз+горение" характерно для пиролиза органической массы, параллельно с которым происходит горение уже пиролизированного горючего вещества. Состояние "Горение" описывает процесс горения, когда вся органическая масса подверглась пиролизу. Состояние "После горения" характерно для элементарных объемов, в которых уже прошел процесс горения.

Экстенсионально зададим отношение достижимости одного «мира» из другого при помощи перечисления пар состояний, находящихся в отношении Q^4:

«Пассивное состояние» Q^4 «Сушка»;
«Сушка» Q^4 «Сушка+горение»;
«Сушка» Q^4 «Пиролиз»;
«Сушка» Q^4 «Пиролиз+горение»;
«Сушка+горение» Q^4 «Пиролиз»;
«Сушка+горение» Q^4 «Пиролиз+горение»;
«Пиролиз» Q^4 «Пиролиз+горение»;
«Пиролиз» Q^4 «Горение»;
«Пиролиз+горение» Q^4 «Горение»;
«Горение» Q^4 «После горения».

Зададим множество моделей для объектов пятого сорта (для элементарных объемов, пересекающихся со стволом дерева).

Множество возможных «миров» для таких моделей будет совпадать с множеством «миров» для «свободных» объемов с той разницей, что гореть будет свободная часть элементарного объема, занятого стволом.

Экстенсионально зададим отношение достижимости одного «мира» из другого при помощи перечисления пар состояний, находящихся в отношении Q^5:

«Пассивное состояние» Q^5 «Нагрев до горения»;
«Нагрев до горения» Q^5 «Горение»;
«Горение» Q^5 «После горения».

Зададим множество моделей для объектов шестого сорта (для составных элементарных объемов).

Множество возможных «миров» в этом случае будет совпадать с множеством возможных «миров» для элементарных объемов, занятых кроной, так как и в первом, и во втором случаях в элементарных объемах присутствует органическая масса в виде кроны дерева, и в ней возможны при достижении достаточной температуры процессы сушки органической массы, пиролиза и горения. Множество возможных миров для этого объектов шестого сорта: C^6 = <"Пассивное состояние", "Сушка", "Сушка+горение", "Пиролиз", "Пиролиз+горение", "Горение", "После горения">. Состояние "Сушка" характерно для сушки органической массы, когда в элементарном объеме не происходит горение. Состояние “Сушка+горение” характерно для процесса сушки органической массы, когда в элементарном объеме есть горючее вещество, поступившее из соседних объемов, которое горит. Состояние “Пиролиз” – это пиролиз сухого органического вещества. Состояние “Пиролиз+горение” характерно для пиролиза органической массы, параллельно с которым происходит горение уже пиролизированного горючего вещества. Состояние “горение” описывает процесс горения, когда вся органическая масса подверглась пиролизу. Состояние “После горения” характерно для элементарных объемов, в которых уже прошел процесс горения.

Экстенсионально зададим отношение достижимости одного мира из другого при помощи перечисления пар состояний, находящихся в отношении Q^6:

«Пассивное состояние» Q^6 «Сушка»;
«Сушка» Q^6 «Сушка+горение»;
«Сушка» Q^6 «Пиролиз»;
«Сушка» Q^6 «Пиролиз+горение»;
«Сушка+горение» Q^6 «Пиролиз»;
«Сушка+горение» Q^6 «Пиролиз+горение»;
«Пиролиз» Q^6 «Пиролиз+горение»;
«Пиролиз» Q^6 «Горение»;
«Пиролиз+горение» Q^6 «Горение»;
«Горение» Q^6 «После горения».

Диаграммы, описывающие отношение достижимости для объектов каждого сорта, отображены на рис. 3.

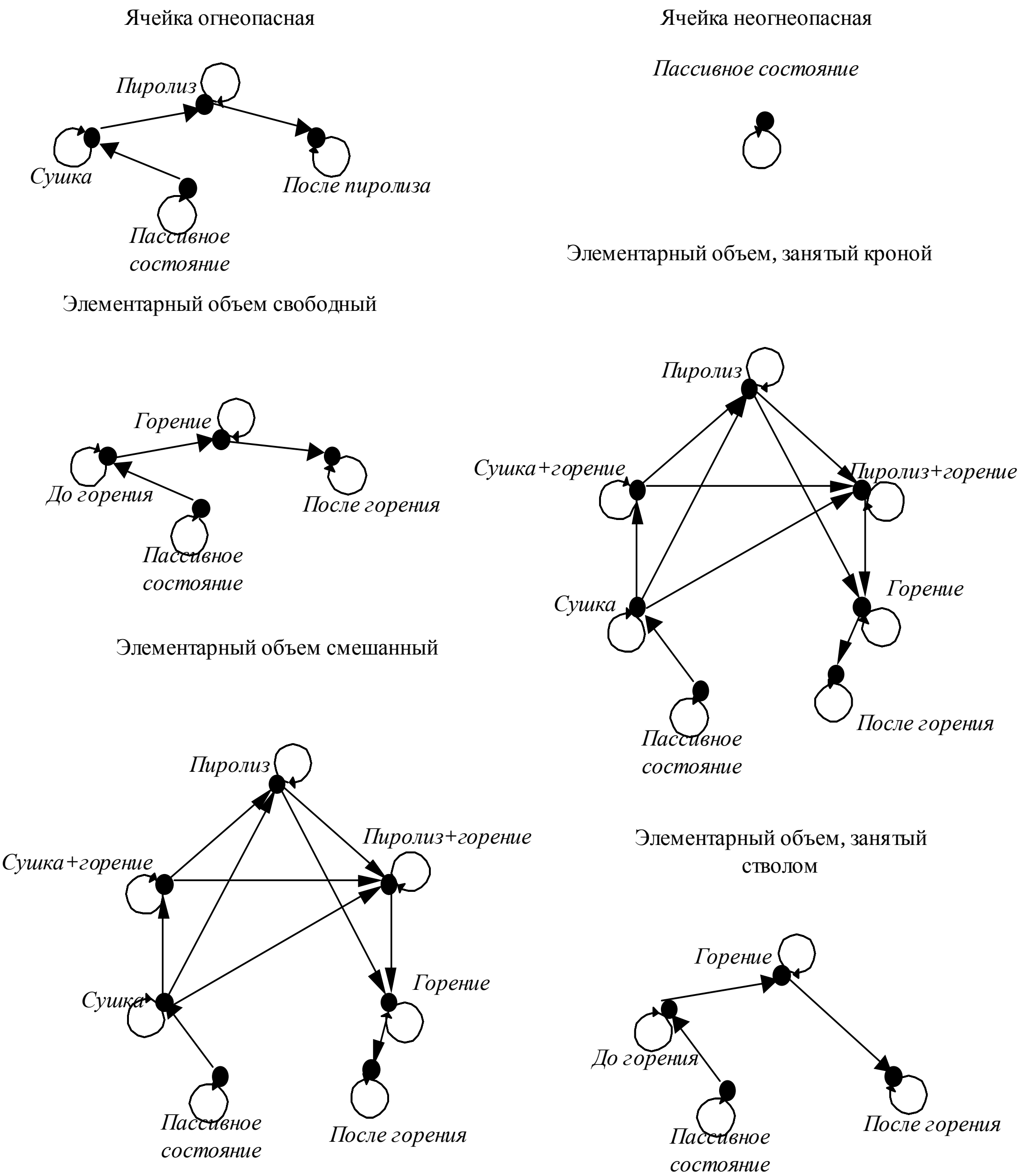

Рис.3. Отношение достижимости для объектов различных сортов

Язык, описывающий модальную логику рассматриваемой предметной области, будет содержать константы, описывающие сорта:

Ячейка_огнеоп,
Ячейка_неогнеоп,
Эл_объем_своб,
Эл_объем_занятый_кроной,
Эл_объем_занятый_стволом,
Эл_объем_смешанный.

Введем в язык предикаты следующих групп:

1) унарные предикаты, описывающие возможные «миры»,
2) бинарные предикаты, описывающие возможные «миры» для каждого сорта объектов,
3) двухместные предикаты, задающие отношение достижимости между двумя возможными «мирами».

Одноместные предикаты, описывающие возможные «миры» (в качестве области интерпретации выступает предметная переменная):

Сушка(.),
Пиролиз(.),
После_пиролиза(.),
Пассивное_состояние(.)
Нагрев_до_горения(.),
Горение(.),
Сушка+горение(.),
Пиролиз+горение(.),
После_горения(.).

Зададим предикаты, описывающие возможные «миры» для объектов каждого сорта. Здесь первым аргументом является одноместный предикат, обозначающий «мир», а вторым – константа, указывающая на сорт объекта, для которого данный «мир» возможен.

ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пассивное_состояние(.), Ячейка_огнеоп),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Сушка(.), Ячейка_огнеоп),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пиролиз(.), Ячейка_огнеоп),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(После_пиролиза(.), Ячейка_огнеоп),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пассивное_состояние(.), Ячейка_неогнеоп),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пассивное_состояние(.), Эл_объем_своб),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Нагрев_до_горения(.), Эл_объем_своб),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Горение(.), Эл_объем_своб),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(После_горения(.), Эл_объем_своб),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пассивное_состояние(.), Эл_объем_занятый_кроной),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Сушка(.), Эл_объем_занятый_кроной),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Сушка+горение(.), Эл_объем_занятый_кроной),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пиролиз(.), Эл_объем_занятый_кроной),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пиролиз+горение(.), Эл_объем_занятый_кроной),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Горение(.), Эл_объем_занятый_кроной),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(После_горения(.), Эл_объем_занятый_кроной),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(До_горения(.), Эл_объем_занятый_стволом),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Горение(.), Эл_объем_занятый_стволом),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(После_горения(.), Эл_объем_занятый_стволом),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пассивное_состояние(.), Эл_объем_смешанный),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Сушка(.), Эл_объем_смешанный),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Сушка+горение(.), Эл_объем_смешанный),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пиролиз(.), Эл_объем_смешанный),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Пиролиз+горение(.), Эл_объем_смешанный),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(Горение(.), Эл_объем_смешанный),
ВОЗМОЖНЫЙ_МИР(После_горения(.), Эл_объем_смешанный).

Зададим предикаты, описывающие отношение достижимости между «мирами». В качестве первого аргумента выступает унарный предикат, описывающий возможный «мир» для предметной переменной, в качестве второго – одноместный предикат, описывающий возможный «мир» для той же переменной, достижимый из первого.

ДОСТИЖИМОСТЬ(Пассивное_состояние(.),Сушка(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Пассивное_состояние(.),Нагрев_до_горения(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Сушка(.), Пиролиз(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Пиролиз(.), После_пиролиза(.)),

ДОСТИЖИМОСТЬ(Нагрев_до_горения(.), Горение(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Горение(.), После_горения(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Сушка(.), Сушка+горение(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Сушка(.), Пиролиз+горение(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Сушка+горение(.), Пиролиз(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Сушка+горение(.), Пиролиз+горение(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Пиролиз(.), Пиролиз+горение(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Пиролиз(.), Горение(.)),
ДОСТИЖИМОСТЬ(Пиролиз+горение(.), Горение(.)).

Совокупность аксиом модальной логики для рассматриваемой предметной области можно разбить на следующие группы:

1) аксиомы, экстенсионально описывающие области интерпретации предикатов, задающих отношения;

2) аксиомы, описывающие ограничения, справедливые в любом возможном состоянии моделей каждого вида (аксиомы статики);

3) аксиомы, определяющие возможность или невозможность переходов из одного состояния в другое для объектов каждого сорта (аксиомы динамики).

Аксиомы первой группы:

$$\begin{gathered}
\text{ВОЗМОЖНЫЙ_МИР}(P_1^1, a) \Leftrightarrow \\
\equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge =(a, \text{Ячейка_огнеоп}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Сушка}(.)) \wedge =(a, \text{Ячейка_огнеоп}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Пиролиз}(.)) \wedge =(a, \text{Ячейка_огнеоп}) \vee \equiv(P_1^1, \text{После_пиролиза}(.)) \wedge =(a, \text{Ячейка_огнеоп}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge =(a, \text{Ячейка_неогнеоп}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge \\
=(a, \text{Эл_объем_своб}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Нагрев_до_горения}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_своб}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Горение}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_своб}) \vee \equiv(P_1^1, \text{После_горения}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_своб}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_занятый_кроной}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Сушка}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_занятый_кроной}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Сушка+горение}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_занятый_кроной}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Пиролиз}(.)) \wedge \\
=(a, \text{Эл_объем_занятый_кроной}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Пиролиз+горение}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_занятый_кроной}) \\
\vee \equiv(P_1^1, \text{Горение}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_занятый_кроной}) \vee \equiv(P_1^1, \text{После_горения}(.)) \wedge \\
=(a, \text{Эл_объем_занятый_кроной}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge \\
=(a, \text{Эл_объем_занятый_стволом}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Нагрев_до_горения}(.)) \wedge \\
=(a, \text{Эл_объем_занятый_стволом}) \vee \equiv(P_1^1, \text{Горение}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_занятый_стволом}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{После_горения}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_занятый_стволом}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_смешанный}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Сушка}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_смешанный}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Сушка+горение}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_смешанный}) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Пиролиз}(.)) \wedge =(a, \text{Эл_объем_смешанный}).
\end{gathered}$$

$$\begin{gathered}
\text{ДОСТИЖИМОСТЬ}(P_1^1,\ P_2^1) \Leftrightarrow\ \equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Сушка}(.)) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Пассивное_состояние}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Нагрев_до_горения}(.)) \vee \equiv(P_1^1, \text{Сушка}(.)) \wedge \\
\equiv(P_2^1, \text{Пиролиз}(.)) \vee \equiv(P_1^1, \text{Пиролиз}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{После_пиролиза}(.)) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Нагрев_до_горения}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Горение}(.)) \vee \equiv(P_1^1, \text{Горение}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{После_горения}(.)) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Сушка}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Сушка+горение}(.)) \vee \equiv(P_1^1, \text{Сушка}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Пролиз+горение}(.)) \vee \\
\equiv(P_1^1, \text{Сушка+горение}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Пиролиз}(.)) \vee \equiv(P_1^1, \text{Сушка+горение}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Пиролиз+горение}(.)) \\
\vee \equiv(P_1^1, \text{Пиролиз+горение}(.)) \wedge \equiv(P_2^1, \text{Горение}(.)).
\end{gathered}$$

Примеры аксиом второй группы, описывающих ограничения, справедливые в любом возможном состоянии моделей каждого вида:

$$(\forall x \mid \text{Ячейка\_огнеоп}) \Leftrightarrow$$
$$(\text{Пассивное\_состояние}(x) \to \neg\text{Сушка}(x) \wedge \neg\text{Пиролиз}(x) \wedge \neg\text{После\_пиролиза}(x)),$$

$$(\forall x \mid \text{Ячейка\_огнеоп}) \Leftrightarrow$$
$$(\text{Сушка}(x) \to \neg\text{Пассивное\_состояние}(x) \wedge \neg\text{Пиролиз}(x) \wedge \neg\text{После\_пиролиза}(x)),$$

Примеры аксиом третьей группы, определяющих возможность или невозможность переходов из одного состояния в другое, записанные с помощью аппарата алетических модальностей:

$$(\forall x \mid \text{Ячейка\_огнеоп}) \Leftrightarrow$$
$$(\text{Пассивное\_состояние}(x) \to \Diamond\text{Пиролиз}(x) \wedge \neg\text{Пиролиз}(x) \wedge \neg\text{После\_пиролиза}(x)),$$

$$(\forall x \mid \text{Ячейка\_огнеоп}) \Leftrightarrow$$
$$(\text{Сушка}(x) \to \Diamond\text{Пиролиз}(x) \wedge \neg\text{Пассивное\_состояние}(x)) \wedge \neg\text{После\_пиролиза}(x)),$$

Моделирование лесных пожаров позволит определить предельные условия их распространения, при реализации которых горение прекращается. Знание этих условий позволяет разрабатывать новые технологии борьбы с лесными пожарами, то есть предопределяет технический прогресс в области охраны и защиты леса от пожаров.

Прогноз изменения во времени геометрии лесного пожара необходим для разработки и реализации плана борьбы с лесными пожарами. При этом основными потребителями результатов расчетов являются руководители тушения предприятий лесного хозяйства и баз авиационной охраны лесов.

Модель лесного пожара может быть эффективно использована для тренировки пожарных команд по локализации и тушению пожаров, а также для выработки оптимальных стратегий борьбы с огнем применительно к конкретным местным условиям. Модель может быть также использована в учебном процессе в средних специальных и высших учебных заведениях по дисциплинам "Лесная пирология", "Лесное хозяйство", "Методы и средства тушения лесных пожаров", "Охрана окружающей среды" и другим.

В общем, прогнозирование лесных пожаров позволит принимать превентивные организационные и технические меры для уменьшения риска пожара, материальных и людских потерь, а также избежать катастрофических последствий для большинства охраняемых объектов. Впоследствии авторами планируется дополнить модель распространения пожара моделью поддержки принятия решений при его ликвидации.

Выводы

Результаты исследования могут быть использованы в системах принятия решений при ликвидации лесных пожаров, что позволит уменьшить убытки, связанные с огнем: сократить сгоревшую площадь, уменьшить затраты ресурсов на тушение, сохранить жизнь людей.

Результаты настоящего исследования могут быть распространенены на широкий класс процессов пространственного распростанения, таких, как таяние снегов, распространение эпидемии и т.д.

Литература

1. *Доррер Г.А.* Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесн. пром-сть, 1979, 161 с.
2. *Амосов Г.А.* Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров. – В кн.: Возникновение лесных пожаров. М., «Наука», 1964, с. 152-183.
3. *Конев Э.В.* Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск.: «Наука», 1977. – 102 с.
4. *Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г.* Математическое моделирование процесса распространения верховых лесных пожаров. – ДАН СССР, 1983, т. 269, №4, с. 822-826.
5. *Войшвилло Е.К.* Понятие как форма мышления: логико-гносеологический анализ. – М.: МГУ, 1989. 239 с.
6. *Войшвилло Е.К.* Символическая логика (классическая и релевантная): Философско-методологические аспекты: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1989. 150 с.
7. *Войшвилло Е.К.* Понятие. – М.: МГУ, 1967. 288 с.
8. *Войшвилло Е.К., Дегтярев М.Г.* Логика: Учеб. для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2001. – 528 с.
9. *Ивин А.А.* Логика. Учебное пособие. Издание 2-е – М.: Знание, 1998. –240 с.
10. *Тейз А., Грибомон П.* и др. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию. – М.: Мир, 1990. – 432 с.
11. *Gertz M.* Modal logics (a bird's eye view) // Logics and Knowledge Representation, 2001, p. 57-63.
12. *Leue S.* Modal and temporal logics // Design of Reactive Systems / Summer 2002, p. 23-54.
13. *Гуц А.К.* Математическая логика и теория алгоритмов: Учебное пособие. – Омск: Издательство Наследие. Диалог-Сибирь, 2003. – 108 с.