

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет науки и технологий
имени академика М.Ф. Решетнева»

На правах рукописи

Яровой Сергей Викторович

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ
НА ОСНОВЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (космические
и информационные технологии)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук
Доррер Г.А.

Красноярск – 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Распределенные динамические процессы на поверхности Земли как объект моделирования	10
1.1 Свойства распределенных динамических процессов на поверхности Земли и их классификация	10
1.1.1 Классификация по природе возникновения.....	12
1.1.2 Классификация по степени подвижности	16
1.2 Метод построения движущихся фронтов распределенных процессов	19
1.3 Постановка задачи локализационного управления	21
1.4 Алгоритм построения фронта распределенного процесса, основанный на методе подвижных сеток	24
1.5 Выводы по первой главе.....	27
Глава 2. Агентная модель распространения и локализации динамических процессов на поверхности Земли	28
2.1 Аналитический обзор понятий агента и мультиагентных систем	28
2.1.1 Понятие агента, внутреннее устройство и классификация	28
2.1.2 Мультиагентные системы, классификация и архитектуры.....	34
2.1.3 Области применения МАС и примеры.....	38
2.2 Разработка агентной модели распространения и локализации природных динамических процессов	46
2.2.1 Моделирование фронта динамического процесса (<i>A</i> -агенты).....	49
2.2.2 Моделирование сил, противодействующих распространению динамического процесса (<i>B</i> - и <i>D</i> -агенты).....	52
2.2.3 Агент менеджер (<i>M</i> -агенты)	57
2.3 Алгоритм расчета конфигурации фронтов динамических процессов.....	58
2.4 Формальное описание агентной модели.....	60
2.5 Выводы по второй главе	62
Глава 3. Имитационная агентно-ориентированная система моделирования распространения и локализации динамических процессов на поверхности Земли	64
1.1 Обзор и классификация существующих моделей и систем, использующихся в пожароуправлении	64
1.1.1 Аналитические модели природных пожаров.....	66
1.1.2 Экспериментальные модели природных пожаров	67

1.2 Разработка имитационной агентно-ориентированной системы моделирования динамики и локализации природных пожаров	75
1.2.1 Формирование требований и ограничений системы	75
1.2.2 Описание используемых частных моделей	77
1.2.3 Реализация программного средства.....	82
1.3 Проверка адекватности модели в системе «Тайга-3»	87
1.3.1 Постановка задачи	87
1.3.2 Проверка адекватности модели статистическими критериями	91
1.4 Выводы по третьей главе	97
Глава 4. Решение некоторых практических задач, возникающих при управлении динамическими процессами на поверхности Земли	99
4.1 Алгоритм расчета оптимальных локализационных траекторий.....	99
4.2 Алгоритм оптимального размещения и группировки сил и средств противодействия стихийным динамическим процессам	104
4.3 Пример решения задачи оптимального размещения агентов типа <i>B</i> и их группировки по локализуемым процессам.....	109
4.4 Выводы по четвертой главе	111
Заключение.....	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	142
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	145

Введение

Актуальность темы исследования. В связи с глобальными изменениями климата увеличилась вероятность ущерба от природных и техногенных катастроф, которые часто представляют собой стихийные распределенные динамические процессы на поверхности Земли. Наводнения, селевые потоки, оползни, природные пожары, распространение вредителей растений – вот примеры таких процессов. Эти процессы становятся все менее предсказуемыми по масштабам и последствиям. Кроме того, ущерб природе наносит и деятельность человека. Так, при добыче нефти на шельфе возможны ее разливы по поверхности воды, что приводит к разрушению водных экосистем. Неразумное хозяйствование может привести к постепенному исчезновению растительности – опустыниванию территории.

Для поддержки принятия решений при управлении данными процессами разработано большое количество методик, моделей и систем, позволяющих прогнозировать их динамику. Эти модели и системы основаны на различных принципах построения (физическая природа процесса, статистические и экспериментальные данные и т.д.) и имеют разную степень назначения (стратегическое моделирование, оперативно-тактическое моделирование и т.д.).

Однако для управления борьбой с приведенными процессами возможности прогнозирования только их динамики недостаточно. Существует также потребность оценки эффективности мер, которые были или будут предприняты для борьбы (управления процессом). С точки зрения теории управления, перечисленные процессы являются объектами с распределенными параметрами и распределенным управлением. Возможные методы управления этими процессами аналогичны и часто не зависят от природы процесса. Так, одним из методов управления процессом является прямое воздействие на его фронт с целью снизить скорость распространения или остановить его, другой распространенный метод управления – локализация. Локализация (от лат. *localis* - местный) - это ограничение распространения какого-либо явления, процесса возможно более

тесными границами, территориальными пределами. В нашем случае, под локализацией будем понимать создание непреодолимых заградительных барьеров на пути движения волны.

Таким образом, существует задача прогнозирования динамики распределенных процессов на поверхности Земли, находящихся под внешним управлением. При этом наряду с общими законами процессов распространения пространственных волн на поверхности Земли, конечно, следует учитывать специфику и физические особенности этих процессов.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности принимаемых решений при управлении и взаимодействии с динамическими процессами на поверхности Земли за счет создания имитационной агентно-ориентированной системы моделирования данных процессов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. выполнить анализ и предложить классификацию распределенных динамических процессов на поверхности Земли как объектов моделирования и управления;
2. разработать имитационную агентную модель динамики и локализации распределенных процессов на поверхности Земли;
3. реализовать разработанную модель в виде сетевой агентно-ориентированной имитационной системы;
4. провести оценку адекватности реализованной агентно-ориентированной имитационной системы с помощью проведения компьютерных вычислительных экспериментов;
5. разработать алгоритм расчета оптимальных локализационных траекторий на основе разработанной агентной модели распространения и локализации динамических процессов на поверхности Земли.
6. разработать алгоритм решения задачи выбора оптимального размещения агентов, участвующих в локализации распространяющегося процесса, и их группировки (распределения) по локализуемым процессам.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту

1. Разработана новая агентная модель распространения динамических процессов на поверхности Земли и их взаимодействия с инфраструктурой и силами противодействия. Предложенная модель отличается от существующих тем, что позволяет на основе единого подхода моделировать сложные сценарии развития процессов, их локализации и ликвидации внешними силами и средствами.

2. Для описания динамики распределенных процессов на поверхности Земли, предложен новый алгоритм, основанный на численном решении уравнения Гамильтона-Якоби методом подвижных сеток. Алгоритм реализован на основе агентного подхода, и отличается тем, что каждый узел расчетной сетки представляет собой активный агент, взаимодействующий как с соседними узлами, так и с другими типами агентов. Данный алгоритм позволяет рассчитывать как конфигурацию динамических процессов, распространяющихся в нестационарной и анизотропной природной среде, так и решать задачи локализации и остановки данных процессов.

3. Предложен новый алгоритм построения оптимальных локализационных траекторий на основе разработанной агентной модели распространения и локализации динамических процессов на поверхности Земли. В отличие от известных алгоритмов и методов, данный алгоритм позволяет производить расчет с учетом реальных картографических и инфраструктурных данных.

4. Впервые предложен алгоритм схемы МИВЕР (метод изменяющихся вероятностей) решения задач оптимального размещения агентов, противодействующих распространению процесса, и их группировки (распределения) по локализуемым процессам, на основе разработанной агентной модели распространения и локализации динамических процессов, с применением предложенного алгоритма расчета оптимальных локализационных траекторий.

Практическая значимость диссертационной работы обусловлена возможностью использования предложенных моделей и систем для решения прикладных задач. Разработанная агентно-ориентированная имитационная

система позволяет решать задачи оптимального размещения агентов, участвующих в локализации динамического процесса, и построения оптимальных локализационных траекторий с учетом ограниченности материальных ресурсов.

Реализация результатов работы. Результаты, полученные в диссертации, включены в итоговый отчет по программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 18 «Алгоритмы и математическое обеспечение для вычислительных систем сверхвысокой производительности», проект 1.6 «Разработка математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения для прогнозирования и расчета параметров крупных и катастрофических природных пожаров на территории Российской Федерации». Существенная часть диссертационного исследования была проведена при поддержке государственного задания Минобрнауки № 2.5527.2017/БЧ «Методы комбинаторной оптимизации в системах автоматической группировки и классификации». Результаты диссертационного исследования были внедрены в образовательный процесс ФГБОУ ВО «Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России» для оперативного прогнозирования динамики природных пожаров при изучении обучающимися факультета инженеров пожарной безопасности, дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров». В ходе выполнения диссертационной работы было получено 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались методы агентного имитационного моделирования, локализационного управления, псевдобулевой оптимизации, системного и структурного анализа, методы проектирования информационных систем, вложенных цветных сетей Петри, методы математической статистики.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена сериями вычислительных экспериментов, а также корректным использованием математического аппарата, апробацией на научных конференциях и экспертизой статей в ведущих научных журналах.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

– V и VII Международных научно-практических конференциях «Технологии разработки информационных систем» (г. Таганрог, 2014, 2017);

– Международной научно-практической конференции «Фундаментальная информатика, информационные технологии и системы управления: реалии и перспективы» (г. Красноярск, 2014);

– Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием) «Молодые ученые в решении актуальных проблем науки» (г. Красноярск, 2015);

– XIV Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы информатизации региона» (г. Красноярск, 2015);

– V Всероссийской научно-практической конференции «Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций» (г. Железногорск, 2015);

– XX и XXI Всероссийских научных конференциях с международным участием «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии» (г. Томск, 2016, 2018);

– Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Системы оценки качества образования» (г. Красноярск, 2016);

– 2nd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications RPC 2017 «Youth Scientific School on Mathematical Modeling and Computer Technologies» (г. Владивосток, 2017);

– XI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, 2017);

– XVII и XVIII Международных научно-практических конференциях «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM-2017)» (г. Москва, 2017, 2018);

– Семинарах «Advanced Technologies in Aerospace, Mechanical and Automation Engineering» (г. Красноярск, 2018, 2019);

– V Международной научной конференции «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли» (г. Красноярск, 2018).

Публикации. Материалы, отражающие содержание диссертации, и результаты, выносимые на защиту, опубликованы в 18 печатных работах, в т. ч. в 7 статьях в изданиях, рекомендуемых ВАК, 5 - в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus. Из работ, выполненных совместно, в диссертацию включены результаты, полученные автором лично.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст диссертации включает 132 страницы. Изложение иллюстрируется 29 рисунками и 10 таблицами. Список литературы на 19 страницах содержит 183 наименований.

Глава 1. Распределенные динамические процессы на поверхности Земли как объект моделирования

Глава посвящена рассмотрению распределенных динамических процессов на поверхности Земли как объектов моделирования и управления.

Приведены примеры природных и антропогенных процессов на поверхности Земли. Рассмотрены свойства таких процессов, которые в данной работе приняты как допущения. Рассмотрена классификация рассматриваемых процессов по природе возникновения и по степени подвижности (от экспансивного развития с образованием новых очагов до затухающего процесса).

Дается определение ряда понятий, используемых в данной работе, и приведен метод описания динамики распределенных процессов на языке классической механики.

Дается постановка задачи локализационного управления.

Представлен метод подвижных сеток, а также основанный на нем алгоритм построения фронта процесса распространения.

1.1 Свойства распределенных динамических процессов на поверхности Земли и их классификация

На поверхности нашей планеты постоянно происходят различные процессы, которые можно отнести к пространственно распространенным динамическим процессам. В общем случае, таким процессом может быть названо любое явление (природного или антропогенного характера), которое можно представить в виде некоторого контура или бегущей волны, который распространяется или движется по поверхности Земли с течением времени. В данной работе предполагается, что каждый из этих процессов описывается с помощью двух моделей:

– модели для описания природы процесса, определяющая скорость его распространения,

– геометрической модели контуров, которая строит контуры процесса в последовательные моменты времени.

Вторая модель для расчета использует выходные данные, полученные первой моделью. Следует также отметить, что геометрическая теория не отражает ряда особенностей реального процесса. В то же время она проста, наглядна и позволяет получить эффективные алгоритмы расчета.

Ниже приведены два типа классификации рассматриваемых в данной работе процессов:

- по природе возникновения;
- по степени подвижности.

Если рассмотреть приведенные ниже примеры распределенных динамических процессов, а также их классификацию, то можно заметить, что, несмотря на разную физическую природу данных процессов, разные пространственные и временные масштабы, большинство из них обладают схожими характерными чертами. Таким образом, сформулировали основные свойства рассматриваемых процессов:

1. Все указанные процессы могут быть описаны как подвижные области, имеющие способности к расширению, сужению, перемещению, разделению и слиянию.

2. В первом приближении границы таких областей или множеств можно представить как пространственные (плоские) волны, которые подчиняются принципу Гюйгенса.

3. Все указанные процессы, вследствие своих характерных размеров, поддаются картографированию.

4. Методы дистанционного (в первую очередь, космического) мониторинга могут быть применены ко всем классам подобных динамических процессов.

5. Методы управления этими процессами имеют черты существенного сходства. Одним из основных методов борьбы со многими из этих процессов является метод локализации, т.е. создания непреодолимых барьеров. С точки зрения теории управления – это объекты с распределенными параметрами и распределенным управлением.

Представленные свойства можно также рассматривать как допущение, принятое в данной работе. В дальнейшем, говоря о распределенных динамических процессах на поверхности Земли, будем считать, что они обладают указанными свойствами.

1.1.1 Классификация по природе возникновения

К первому классу распределенных динамических процессов на поверхности Земли относится часть геоморфологических процессов, в частности, экзогенных процессов рельефообразования. Различают три основных типа таких процессов: выветривание, денудация и аккумуляция. Эти процессы протекают постоянно, на протяжении практически всей геологической истории Земли, характеризуются большой продолжительностью - сотни и тысячи лет [1]. К этому же классу можно отнести процессы, связанные с вулканической деятельностью, такие как разливы лавы. На рисунке 1.1 представлена схема распространения лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения [2,3], произошедшего на полуострове Камчатка в 2012–2013 гг. Схема составлена на основе дешифрирования космических снимков NASA и JPL, а также результатов полевых работ.

Вторым классом являются некоторые биологические процессы. Процессы экспансии живых организмов, занятия ареала обитания и другие процессы, относящиеся к пространственно-временной самоорганизации биологических систем, также можно отнести к динамическим процессам, рассматриваемым в настоящей работе [4].

На рисунке 1.2 представлен процесс очагового распространения сибирского шелкопряда в Приенисейской темнохвойной тайге в период с 2013-2017 гг. В 2017 году данная вспышка распространения шелкопряда охватила более 800 тысяч га древостоев, включая 300 тысяч га погибших. Стартовыми условиями для развития шелкопряда стали возросшие засушливость климата, потепление и удлинение периода вегетации. В поврежденных шелкопрядом древостоях активизировались стволовые вредители, включая уссурийского полиграфа, агрессивного жука-короеда [5].

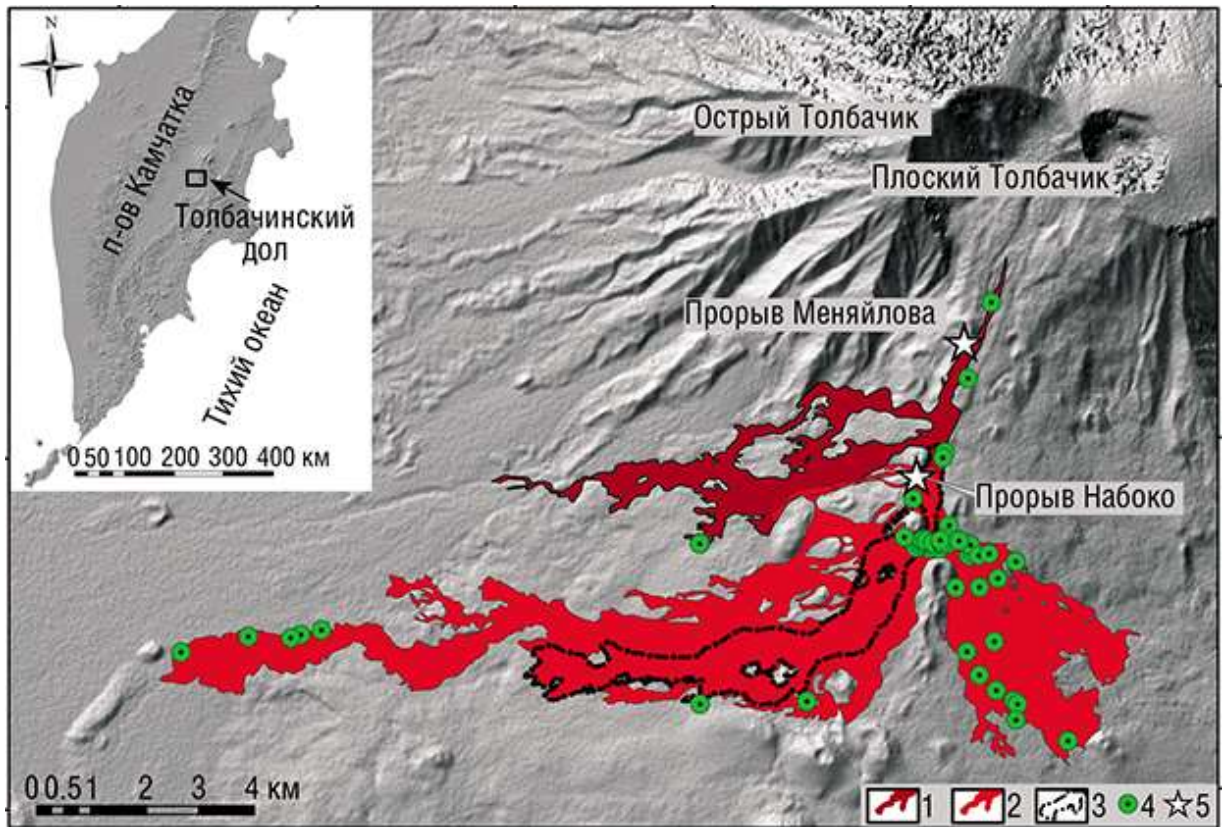


Рисунок 1.1 – Схема распространения лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения: 1 – лавовые потоки прорыва Меняйлова; 2 – лавовые потоки прорыва Набоко; 3 – лавовые потоки прорыва Меняйлова, перекрытые потоками прорыва Набоко; 4 – места отбора проб; 5 – положение центров извержения.

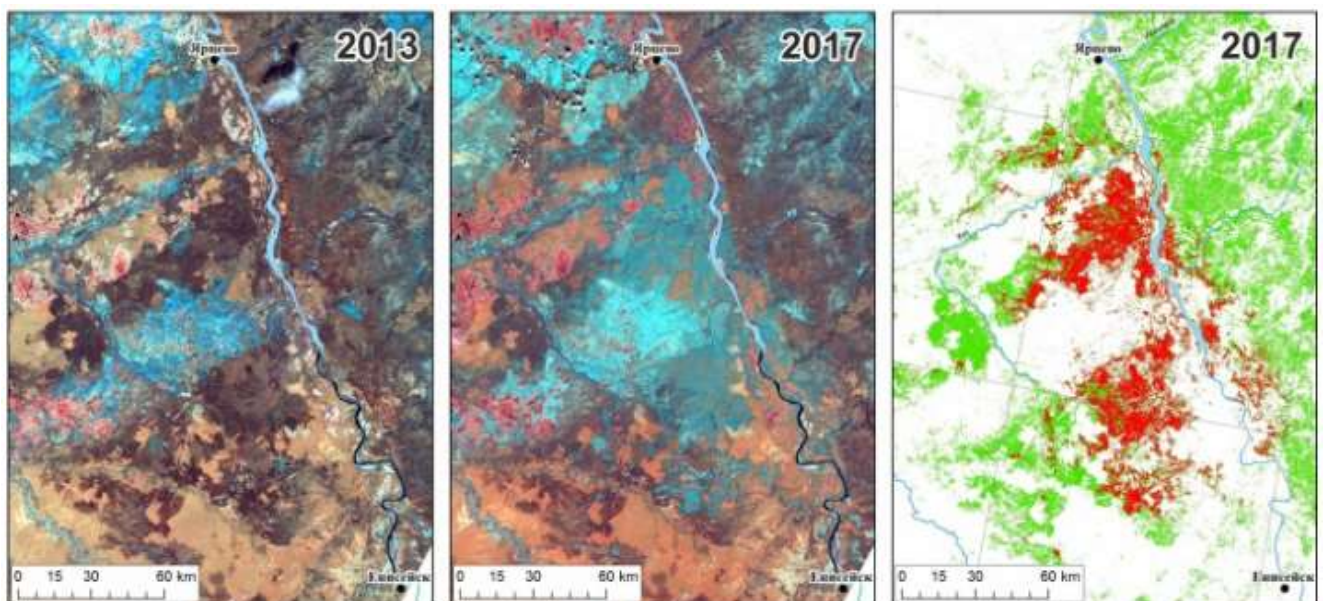


Рисунок 1.2 – Вспышка распространения сибирского шелкопряда в Приенисейской темнохвойной тайге в период с 2013-2017 гг.

Третьим классом динамических процессов на поверхности Земли считаются разнообразные метеорологические и гидрологические явления. Спектр таких явлений достаточно широк, например, опустынивание, наводнения, сели, оползни [6,7,8]. Изучение таких явлений весьма актуально и представляет большой интерес, в связи с возможностью причинения ими значительного ущерба и катастрофических последствий.

На рисунке 1.3 представлена карта интегрального риска от наводнений на реках бассейна озера Байкал, разработанная в 2016 году по результатам обобщенного анализа полученных удельных показателей и сравнения частных карт риска [9].

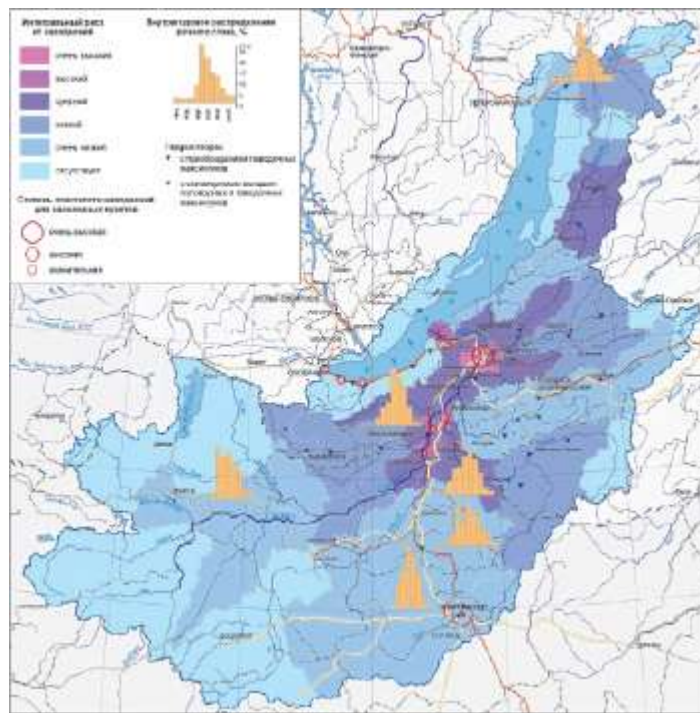


Рисунок 1.3 – Карта наводнения (интегральный риск)

Четвертым классом процессов на поверхности Земли можно считать антропогенные процессы [10]. К таким процессам следует отнести лесные пожары, разливы нефтепродуктов на поверхности водоемов, загрязнение водоемов сбросами, обезлесивание, опустынивание, радиационное заражение и т.д. Приведем несколько примеров таких процессов.

На рисунке 1.4 представлен контур лесного пожара, полученный с помощью спутниковых снимков MODIS и LANDSAT [11].

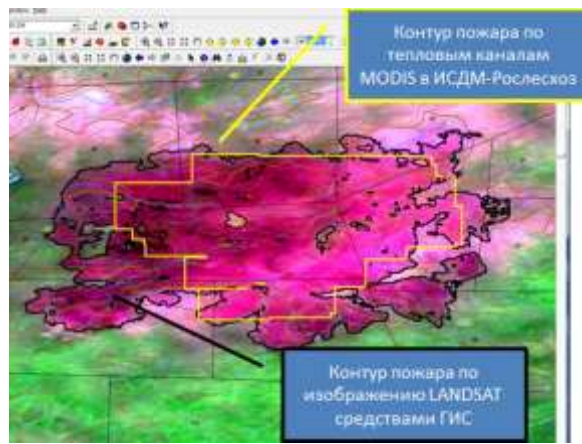


Рисунок 1.4 – Контур лесного пожара (обработанный спутниковый снимок)

На рисунке 1.5 представлена композиция четырех радиолокационных снимков ASAR Envisat, показывающая распространение нефтяного пятна с 26.04.10 по 2.05.10 в Мексиканском заливе [12].

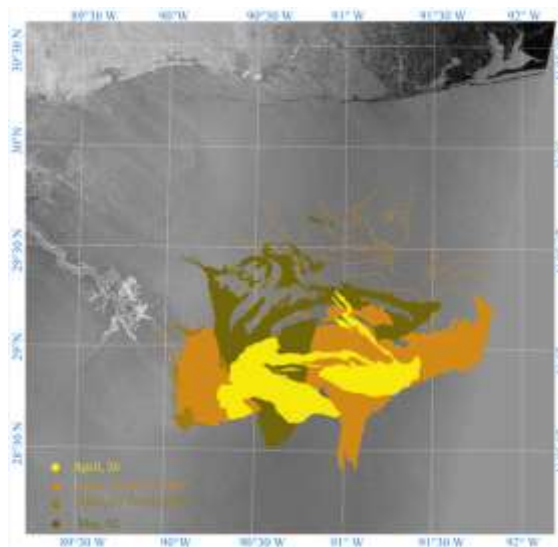


Рисунок 1.5 – Распространение нефтяного пятна в океане (обработанный спутниковый снимок)

И в заключение приведем пример (рисунок 1.6) прогноза распространения техногенных радионуклидов в результате гипотетической аварии между островами Сахалин и Хоккайдо (источник находится на расстоянии примерно 1000 км севернее АЭС «Фукусима-1») [13].

Представленная классификация не является полной и отражает только наиболее общие характеристики динамических процессов на поверхности Земли. Один и тот же класс процессов может иметь более одного родительского класса.

В частности, лесные пожары могут быть вызваны как деятельностью человека, так и природными причинами.

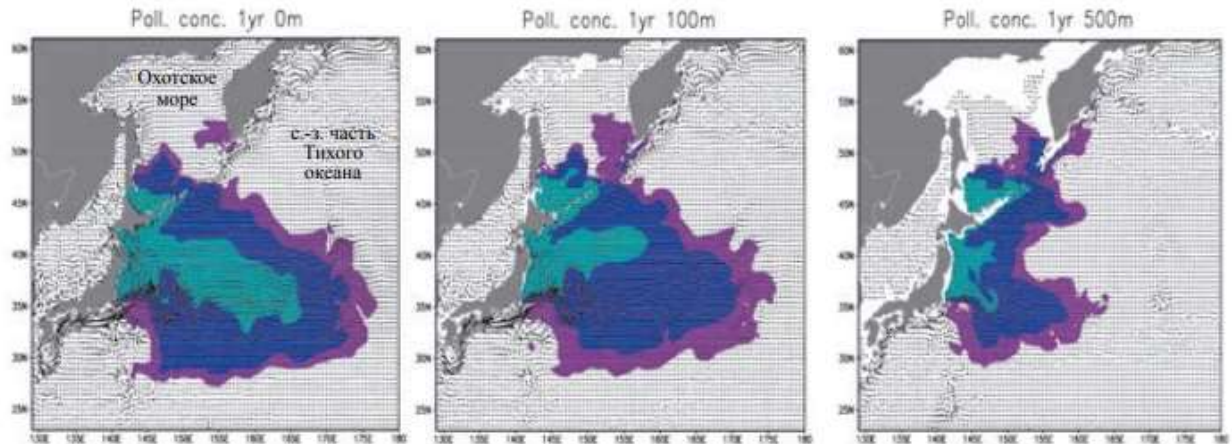



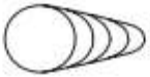








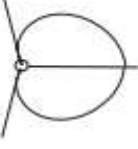

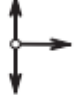
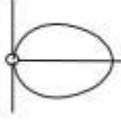
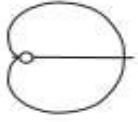
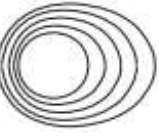

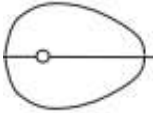
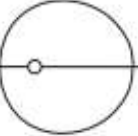


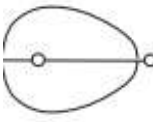
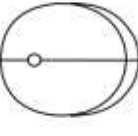
Рисунок 1.6 – Прогноз распространения техногенных радионуклидов в течение года на поверхности моря (0 м), глубинах 100 и 500 м в северо-западной части Тихого океана от точечного источника мощностью 10ПБк

1.1.2 Классификация по степени подвижности

Рассмотрим различные типы конфигурации фронтов динамических процессов, которые характеризуются различными «степенями свободы». Данная классификация приведена Г.А. Доррером в [14] и представляет интерес для оценки степени подвижности динамического процесса, а также возможности воздействия на него. Следует отметить, что данная классификация может быть применена для процессов, распространяющихся на плоскости, либо в проекции на плоскость.

Предполагается, что процесс распространяется из начального очага круговой формы. В зависимости от природы процесса, а также от условий внешней среды он может развиваться по-разному. В первом столбце таблицы 1.1 приведены конфигурации контуров процесса в последовательные моменты времени.

Таблица 1.1 Классификация процессов распространения по степени подвижности

	Характер движения фронтов	Допустимые направления распространения	Число степеней свободы	Тип конуса направлений скорости	Вид индикатрисы	Вид фигуротрисы
1			0	a_0^0		
2		-	1/4	$a_1^{1/2}$	-	
3			1/2	a_1^1		
4			1	a_2^2		
5			3/2	a_1^2		
6			2	a_0^2		
7			2s	a_0^2		

Рассмотрим далее типы режимов в порядке увеличения «степеней свободы».

1. Отсутствие распространения.

2. Распространение с затуханием (процесс с диссипацией). В данном случае, распространение процесса происходит, как правило, только в одном направлении. Однако, по мере движения, фронт контура сужается и в конечном итоге распространение прекращается, процесс останавливается.

3. Незатухающее распространение в одном направлении. В этом случае фронт контура принимает устойчивую форму, которая не зависит от конфигурации начальной области. Такой фронт перемещается параллельно самому себе с постоянной скоростью и носит название автомоделльного.

4. Распространение в ограниченном диапазоне направлений (3, 4 и 5 строка в таблице 1.1). При таком режиме фронт движется, расширяясь внутри угла, ограниченного двумя асимптотами. Величина этого угла может изменяться от 0 до π .

5. Распространение во всех направлениях (6 строка таблицы 1.1). В этом случае фронт горения представляет собой замкнутую линию, скорость перемещения которой в разных направлениях может быть различной.

6. Распространение с образованием новых очагов (7 строка таблицы 1.1). При этом как основной очаг, так и каждый из вновь образованных очагов могут иметь различные типы конфигураций.

Рассмотрим показатели, характеризующие число степеней свободы процесса. В качестве такой характеристики используется числовая величина, которая определяет количество направлений, по которым может происходить распространение процесса. Т.к. при движении по плоскости максимальное количество степеней свободы равно двум, то движение вдоль каждой полуоси соответствует числу степеней свободы, равному $1/2$. В таблице 1.1 во втором столбце показаны полуоси, вдоль которых процесс может распространяться.

В третьем столбце таблицы 1.1 указано количество степеней свободы, а в четвертом – тип конуса направлений скоростей a_r^m для каждого семейства контуров. Индекс m означает размерность подпространства скоростей, а r – количество полуосей, по которым запрещено распространение.

Особое внимание требует уделить затухающему процессу (вторая строка таблицы 1.1). В этом случае распространение происходит сначала в одном направлении, а затем прекращается. По типу процесса распространения число степеней свободы данного процесса равно $1/4$, а конус скоростей становится комплексным.

В пятом и шестом столбце таблицы показан вид индикатрис и фигуротрис скоростей распространения процессов.

В общем случае индикатрисой скорости (ИС) является некоторое поле значений, которое отражает величину скорости распространения в том или ином направлении движения. Ключевой особенностью индикатрисы является то, что она может быть представлена в определенном приближении в аналитическом виде. Наиболее распространенным выражением для описания индикатрисы используется эллипс. Для этого используется всего три параметра – это угол поворота эллипса и два радиуса.

Фигуротрисой же называют функцию, которая представляет собой индикатрису нормальной скорости (ИНС) движения границы области достижимости динамической системы. Фигуротрисы тесно связаны с функцией Гамильтона управляемых динамических систем и в ряде случаев являются более удобной характеристикой системы, чем множества допустимых скоростей и индикатрисы скорости. Свойства фигуротрис подробно рассмотрены и приведены в [15].

1.2 Метод построения движущихся фронтов распределенных процессов

Для представления и построения движущихся фронтов динамических процессов разработано большое количество методов и моделей, которые основаны на описании физической природы моделируемых процессов. Использование данных методик зачастую связано с трудоемкими расчетами и не может быть выполнено достаточно оперативно, особенно при решении задач управления. Рассмотрим методику, которая в дальнейшем будет использована в данной работе. Она, возможно, менее обоснована с точки зрения физической

природы процесса, но приводит к более эффективным вычислительным процедурам. Для построения движущихся фронтов распределенных процессов здесь используется математический аппарат гамильтоновой механики, а также связанная с ним теория областей достижимости (ОД) управляемых динамических систем (УДС). Используя данный аппарат, мы принимаем, что скорость движения каждой точки фронта не зависит от его конфигурации и известна априори, т.е. что фронт удовлетворяет принципу Гюйгенса (в общем случае в анизотропной и неоднородной среде). Данная методика представлена и подробно рассмотрена Г.А. Доррером в [14].

Независимо от физической природы мы будем обозначать рассмотренные выше динамические процессы символом $G(t)$. Этот процесс представляет собой расширяющееся множество в двумерном пространстве. Мы будем называть его **динамическим процессом или процессом распространения на плоскости**. В том случае, когда понятно, о чем идет речь, можно говорить просто **процесс**. Границу $\partial G(t)$ процесса $G(t)$ будем называть **фронтом** или **кромкой процесса**. Скорость перемещения точек на границе процесса в направлении нормали будем называть **нормальной скоростью распространения процесса**.

Процесс рассматривается в проекции на горизонтальную плоскость (на карте соответствующего масштаба). Координатная система $X = [x^1, x^2]^T$ привязана к карте, $X \in W$, где W – рассматриваемая сценарная область.

Пусть $S(x, t) = 0$ – уравнение границы процесса $G(t)$, причем скалярная функция $S(x, t)$ является непрерывной и имеющей непрерывные производные по всем своим аргументам. Как известно, условие неразрывности границы имеет вид

$$\frac{ds}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} \frac{dx}{dt} = 0 \quad (1.1)$$

Здесь:

$\frac{\partial S}{\partial x} = \text{grad}S = \left[\frac{\partial S}{\partial x^1}, \frac{\partial S}{\partial x^2} \right]^T = p$ – градиент функции $S(x, t)$, совпадающий по направлению с нормалью к границе процесса в точке $x \in W$;

$$\frac{dx}{dt} = \left[\frac{dx^1}{dt}, \frac{dx^2}{dt} \right]^T = \hat{V}(x, t) – \text{скорость перемещения границы в точке } x \in W.$$

Произведение $H(p, x, t) = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{dx}{dt} = p \hat{V}(x, t)$ называется функцией Гамильтона процесса, которая удовлетворяет уравнению Гамильтона-Якоби

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \hat{V} \text{grad} S = \frac{\partial S}{\partial t} + p \hat{V}(x, t) = 0 \quad (1.2)$$

и системе дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x} = \partial H / \partial p \\ \dot{p} = -\partial H / \partial x \end{cases} \quad (1.3)$$

с начальными условиями

$$x(\alpha, t_0) = x(\alpha), p(\alpha, t_0) = p_0(\alpha), \quad (1.4)$$

задающими в параметрической форме границу процесса G_0 в начальный момент времени. Здесь $\alpha \in A$ – вектор параметров, A – область изменения параметров.

При расчетах динамики процесса $G(t)$ удобно использовать нормальную скорость перемещения границы процесса $V_n(x, t) = \hat{V}(x, t) \frac{\text{grad} S}{|\text{grad} S|}$, т.е. проекцию скорости $\hat{V}(x, t)$ на единичную нормаль $p_e = \frac{\text{grad} S}{|\text{grad} S|}$.

В этом случае уравнение Гамильтона-Якоби (2) примет вид

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V_n |\text{grad} S| = 0, \quad (1.5)$$

при начальных условиях (4).

Уравнение (1.5) в дальнейшем используется для создания методов и алгоритмов численного моделирования процессов распространения и локализации.

1.3 Постановка задачи локализационного управления

Взаимодействие человека с динамическим процессом на поверхности Земли может преследовать различные цели – остановку фронта процесса распространения, его ликвидацию, окружение непроходимым для процесса препятствием (локализация), или, напротив, уклонение от встречи с процессом. В реальных условиях выбор тактики описанных действий зависит от большого числа факторов и с трудом поддается формализации. Однако для выработки критериев оценки и планирования деятельности служб защиты полезно

исследовать идеализированные случаи, допускающие математическое описание. Такие исследования были начаты в работах Ф.Л. Альбини [16,17], Г.Н. Коровина [18], Е.Н. Горовой [19,20], С.В. Ушанова и Г.А. Доррера [21]. Математические задачи, связанные с расчетом путей локализации, получили название задач **локализационного управления**.

Локализацией процесса распространения $G(t)$ на плоскости мы будем называть окружение процесса распространения непреодолимым препятствием – локализационным барьером или линией. Процесс построения такого барьера называется локализационным управлением.

Ниже рассмотрена простая постановка задачи локализационного управления. Решение этой задачи позволяет определить типовой алгоритм движения команды при локализации процесса по критерию минимизации затраченного времени.

Процесс локализации рассматривается в полярной системе координат (ρ, φ) . Скорость распространения $v(\varphi)$ и скорость локализации (построения барьера) u постоянны для всех $x \in D$. В процессе локализации участвует одна команда. Начальная и конечная точки локализационной кривой ($C_n^1 = C_k^1$) совпадают. Направление обхода α роли не играет. Требуется определить:

- $\rho_0(\varphi_0)$ - начальную точку локализации;
- уравнение локализационной кривой $\rho = \rho(t, \varphi)$ или в параметрической форме $\rho = \rho(\varphi), t = t(\varphi)$.

В качестве критерия оптимизации выбрано время локализации распределенного динамического процесса:

$$\Phi = \int_0^T dt = \int_0^{2\pi} t' dt \rightarrow \min \quad (1.6)$$

Здесь и далее штрих обозначает производную по φ .

Ограничения задачи:

$$\rho(\varphi) \geq r(\varphi) = r_0(\varphi) + v(\varphi)t \quad (1.7)$$

$$(\rho')^2 = \rho^2 + u^2(t')^2, \rho(\varphi_0) = \rho(\varphi_0 + 2\pi) = \rho_0, t(\varphi_0) = 0. \quad (1.8)$$

Решая задачу условной оптимизации (1.7)–(1.8), можно показать, что оптимальная локализационная линия состоит из двух участков (рисунок 1.7).

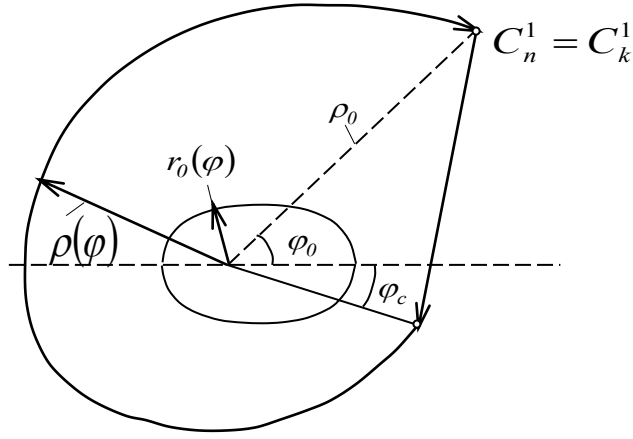


Рисунок 1.7 – Вид локализационной линии в схеме с одним центром

Первый участок – прямолинейный, он соответствует приближению средства локализации к стартовой точке процесса, а второй описывает непосредственно процесс локализации и представляет собой спираль, разворачивающуюся по экспоненциальному закону с положительным показателем.

Условия «стыковки» данных участков имеют вид:

$$T_1(\varphi_c) = T_2(\varphi_c), R_1(\varphi_c) = R_2(\varphi_c), R_1(\varphi_c) = T_2(\varphi_c), \quad (1.9)$$

где $T = vt/r_0$, $R_0 = \rho_0/r_0$, $R = \rho/r_0$.

Из (1.9) после некоторых преобразований получим

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{1+c^2}}{\gamma} = c \sin \varphi_c - \cos \varphi_c \\ \frac{c}{\sin \varphi_c + c \cos \varphi_c} = \exp \left\{ (\gamma^2 - 1)^{-\frac{1}{2}} (\varphi - 2\pi) \right\} \\ R_0 = 1 / \cos \varphi_c \end{cases} \quad (1.10)$$

Решая систему (1.10), можно найти C , φ_c , R_0 как функцию отношения скоростей $\gamma = u/v$. В предельном случае, при $\varphi_c \rightarrow \pi/2$, $R_0 \rightarrow \infty$, из (1.6) следует:

$$\hat{C} = \sqrt{1 + \hat{C}^2} / \gamma \text{ или } \hat{C} = 1 / \sqrt{\hat{\gamma}^2 - 1},$$

Откуда $\hat{C} = \exp \left\{ -\frac{3\pi}{2} \hat{C} \right\} / \gamma$, $\hat{C} = 0,2744$, $\gamma = 3,779$.

Таким образом, предельное отношение скоростей составляет 3,779, при данном и меньшем отношении локализация невозможна. Для некоторых других значений γ величины C , φ_c , R_0 , $R(\varphi_c)$, $T(\varphi_c)$ и $T(2\pi)$ приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 Значения параметров локализационной кривой при некоторых соотношениях скоростей

$\gamma = u/v$	φ_c	C	R_0	$R(\varphi_c)$	$T(\varphi_c)$	$T(2\pi)$
100	0,351	2,816	1,065	1,004	0,0037	0,065
20	0,761	0,160	1,381	1,048	0,0477	0,381
10	1,043	0,726	1,985	1,172	0,1720	0,985
5	1,402	0,388	5,952	2,198	1,1980	4,952
3,779	1,571	0,274	∞	∞	∞	∞

1.4 Алгоритм построения фронта распределенного процесса, основанный на методе подвижных сеток

Описываемый метод впервые был предложен С.К. Годуновым для решения задач газовой динамики [22]. Данный метод также был применен Г.А. Доррером для численного построения контуров лесных пожаров [14]. Основная идея метода подвижных сеток заключается в том, что расчетная сеточная область не задается заранее. Она определяется решением задачи, двигаясь и развиваясь вместе с ним, что говорит об универсальности данного метода и возможности его использования для численного построения контуров различных динамических процессов. Под контуром (или фронтом) здесь понимается внешняя граница расчетной сетки. В задачах газовой динамики, для которых этот метод был впервые предложен, контуром может являться головная ударная волна. При моделировании природных пожаров – внешняя граница фронта пожара.

Сам алгоритм расчета контура процесса основан на численном интегрировании семейства характеристик уравнения Гамильтона-Якоби:

$$\frac{d\varphi}{dt} + v^T \text{grad}\varphi = \frac{d\varphi}{dt} + v_n |\text{grad}\varphi| = 0, \quad (1.11)$$

где $v = [v_x, v_y]^T$ – вектор скорости, $\text{grad}\varphi = [d\varphi/dx, d\varphi/dy]^T$ – вектор нормали к контуру, $\text{grad}\varphi/|\text{grad}\varphi|$ – единичный вектор нормали к контуру, $v_n =$

$(grad\phi/|grad\phi|)v$ – величина нормальной скорости. Символ T означает транспонирование.

Начальные условия для данного уравнения заданы на начальном многообразии Λ_0 . В результате решения получается два массива: массив координат точек фронта $\xi_i(t) = \xi_i(t, \omega_i)$ и массив нормалей к фронту в этих точках $p_i(t) = p_i(t, \omega_i)$, $i \in N(t)$. По мере развития процесса возможно пересечение характеристик, при этом упорядочение массивов по параметру ω нарушается. Для формирования структуры контура для каждой точки указываются номера соседних точек. Таким образом, каждая точка контура $C_i(t)$ характеризуется вектором (рисунок 1.8):

$$C_i(t) = \{\xi_i(t), p_i(t), L(i), R(i)\}, i \in N(t). \quad (1.12)$$

Здесь $\xi_i(t) = [x_i(t), y_i(t)]^T$ – координаты точек контура на плоскости; $p_i(t) = [p_i^1(t), p_i^2(t)]^T$ – вектор внешней нормали к контуру; $L(i), R(i)$ – номера точек, расположенных соответственно, слева и справа от C_i , если смотреть в сторону движения контура; $N(t)$ – множество номеров точек, образующих контур в момент времени t .

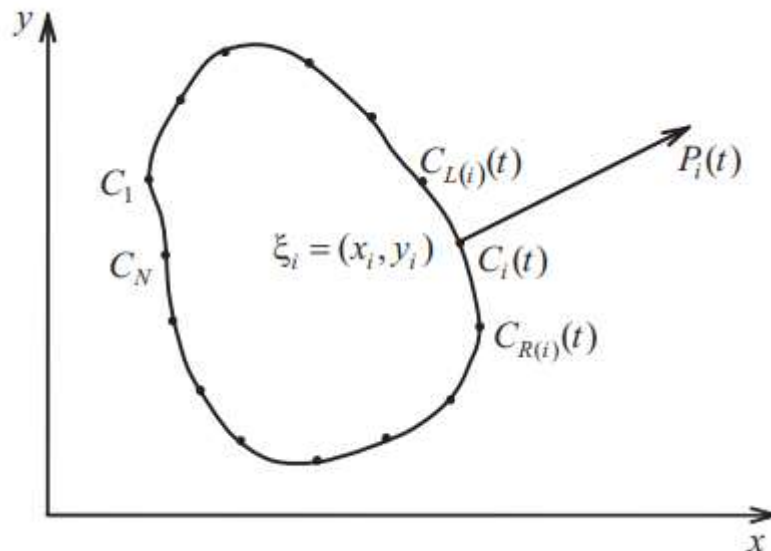


Рисунок 1.8 – Представление контура динамического процесса в методе подвижных сеток

Исходные данные для работы алгоритма.

1. Начальный контур X_0 в виде списка:

$$C_i(0) = \{\xi_i(0), p_i(0), L(i), R(i)\}, i \in N(0), \xi_i \in D, p_i \in [0, 2\pi], \|p_i\| = 1.$$

2. Поле скоростей – функции $v(\xi, p)$ и $v_\xi(\xi, p)$, $X \in D, p_i \in [0, 2\pi], \|p_i\| = 1$.

Данные функции зависят от природы моделируемого процесса и могут быть заданы в виде отдельной подпрограммы или модуля.

3. Способ интерполяции значений $\xi_i(t)$ и $p(t)$ между соседними точками, который задается с помощью выражений $f_1(\xi_i, \xi_{R(i)}, \xi_{L(i)})$ и $f_2(\xi_i, \xi_{R(i)}, \xi_{L(i)})$.

4. Параметры расчетной сетки:

- ρ_{\max} , максимальное допустимое расстояние между соседними точками;
- ρ_{\min} , минимальное допустимое расстояние между соседними точками;
- Δt , шаг по времени.

Сам алгоритм, основанный на методе подвижных сеток, приведен ниже:

1. расчет точек на очередном временном слое. Для этого пересчитываем вектор нормалей к контуру, затем вычисляем для каждой точки контура скорость движения, учитывая скорость ветра и свойства горючих материалов поверхности;

2. анализ самопересечения контура. Производится проверка на пересечение между каждыми отрезками контура. Если пересечение найдено, то производится обрезка точек контура, попавших во внутреннюю часть контура;

3. если количество контуров при расчете больше одного, то производится проверка на пересечение этих контуров. В случае найденного пересечения производится слияние контуров, в результате которого, остается только один контур из двух;

4. упорядочение расстояний между соседними точками. Вычисляются расстояния между соседними точками. Если оно больше максимально возможного расстояния, то вводится новая точка, и изменяются ссылки в соседних точках. Если меньше минимального, то одна из точек удаляется из списка;

5. если требуется продолжение расчета на следующем временном слое, перейти к 4, иначе к 6;

6. если исходные данные не изменились, перейти к 1, иначе к 5;

7. ввести изменившиеся исходные данные. Перейти к 1;
8. закончить.

1.5 Выводы по первой главе

В данной главе рассмотрены распределенные динамические процессы на поверхности Земли как объекты моделирования и управления.

Представлены примеры таких процессов природного и антропогенного происхождения. Рассмотрены свойства таких процессов, которые в данной работе приняты как допущения, а также приведена классификация рассматриваемых процессов по природе возникновения и по степени подвижности (от экспансивного развития с образованием новых очагов до затухающего процесса).

Даны определения ряду понятий, используемых в настоящей работе, а также приведен метод описания динамики распределенных процессов на языке классической механики.

Рассмотрена простая постановка задачи локализационного управления. Решение этой задачи позволяет определить типовой алгоритм движения команды при локализации процесса по критерию минимизации затраченного времени.

Также представлен метод подвижных сеток и основанный на нем алгоритм построения фронта процесса распространения.

В результате можно сказать, что для моделирования распространения и локализации различных динамических процессов на поверхности Земли может быть применена единая методика, основанная на общем принципе построения контуров процессов.

Глава 2. Агентная модель распространения и локализации динамических процессов на поверхности Земли

Глава посвящена разработке модели распространения и локализации природных динамических процессов, основанной на агентном подходе.

В начале главы даётся обзор теории мультиагентных систем, описываются основные понятия и определения. Затем представлена агентная модель распространения и локализации динамических природных процессов, разработанная в рамках настоящего исследования. Сформулирована область применения данной модели, а также требования, предъявляемые к ней. Приводится текстовое описание основных составляющих модели – среды и действующих в ней агентов. Также представлено формальное описание предлагаемой агентной модели с использованием цветных вложенных сетей Петри.

2.1 Аналитический обзор понятий агента и мультиагентных систем

2.1.1 Понятие агента, внутреннее устройство и классификация

Исследования в области агентов и мультиагентных систем имеют почти полувековую историю, однако, только в последние десятилетия они действительно оформились в самостоятельный и многоплановый раздел искусственного интеллекта. Данная тематика привлекает исследователей из различных областей науки. Причиной такого интереса может служить обширность и специфика задач, которые решаются с помощью теории агентов, а также существенные достижения в области информационных технологий, компьютерных сетей и компьютерной техники.

На сегодняшний день известен целый ряд определений понятия «агент». Одно из наиболее широких определений агента приведено в работе П. Рассела и С. Норвига «Искусственный Интеллект: современный подход» [23]. Авторы определяют агент как сущность, находящуюся в некоторой среде, которая воспринимает ее с помощью сенсоров, получает данные, отражающие

происходящие в среде события, интерпретирует эти данные и воздействует на среду с помощью эффекторов.

Более узкое определение дано М. Вулдриджем и Н. Дженнингсом [24]. Они считают, что агент – это аппаратная или программная система, обладающая следующими свойствами:

– *автономность*: способность агента действовать без внешнего управляющего воздействия, т.е. без непосредственного управления со стороны пользователя или какого-либо элемента внешней среды;

– *социальная активность*: взаимодействие с другими агентами, если таковые имеются, или с пользователем с помощью специальных средств коммуникации;

– *реактивность*: способность агента воспринимать окружение, в котором он находится (внешняя среда, пользователь, другие агенты), и реагировать адекватно на его изменение;

– *инициативность поведения*: агенты действуют не только в ответ на запросы окружения, но и проявляют собственную активность и имеют собственные цели;

– *мобильность*: агент может осуществлять пространственное перемещение в среде;

– *правдивость*: агент не должен сознательно давать ложные сообщения;

– *благосклонность*: агент, если он является членом коллектива, не имеет целей, противоречащих целям, преследуемым коллективом;

– *рациональность*: агент предпринимает все меры по достижению согласованной с коллективом цели;

– *активность*: агент способен ставить цели и осуществлять деятельность для достижения этой цели.

При использовании агентов для решения задач в области искусственного интеллекта принято говорить об интеллектуальных агентах [25]. Данный тип агентов наделяют такими характеристиками, как знания, вера, цель, желания, намерения и др.

Приведенный ряд определений рассматривает природу агента сугубо с точки зрения программиста. Такие определения принято называть «слабыми» [24, 26, 27], а агенты понимаются в них как некоторые вычислительные единицы, которые поддерживают локальные состояния и параллельные вычисления, а также достигающие состояния других агентов в процессе коммуникации и автоматически выполняющие действия в условиях внешней среды [28].

«Сильные» же определения отличаются антропоморфным взглядом и более полно отражают концепции, применимые к людям, такие как когнитивные, коммуникативные и поведенческие аспекты агентов [24, 26, 27]. В таких определениях особое место занимают ментальные свойства агента, наличие у них внутренних механизмов мотивации и целеполагания.

Кроме того, существует ряд определений понятия агента зависящее в значительной степени от характера и области его применения. Авторы определяют своего агента с некоторым набором свойств и характеристик, в зависимости от конкретной задачи и среды его обитания. Так Г.М. Цибульский в своей работе «Мультиагентный подход к анализу изображений» [26] определяет агента как решающую систему второго рода (путь решения задач в таких системах априори неизвестен), ориентированную на решение простых задач, решение которых находится методом одношагового поиска.

Таким образом, в зависимости от области применения выделяют различные типы агентов, такие как, автономные агенты, персональные ассистенты, мобильные агенты, интеллектуальные агенты и др.

Основными свойствами агентов, исходя из представленных определений, являются автономность и целенаправленность. То есть, автономное выполнение некоторых действий в определенной среде, прием потока входящей информации, идущий от среды или других агентов, обработка этого потока и целенаправленное воздействие на окружающую среду на основе результатов этой обработки.

Существует большое количество критериев, по которым можно классифицировать агентов. Однако наиболее распространенной является классификация по уровню интеллектуальности агентов. М. Вулдридж и

Н. Дженнингс выделяют четыре основных типа агентов. Это *простые* агенты, *умные*, *интеллектуальные* и *действительно интеллектуальные* агенты [24]. В таблице 2.1 приведены свойства, которыми должны обладать агенты различных типов.

Таблица 2.1 Классификация агентов по М. Вулдриджу и Н. Дженнингсу

Характеристики	Типы			
	Простые	Умные	Интеллектуальные	Действительно интеллектуальные
Автономность	+		+	+
Социальная активность	+	+	+	+
Реактивность	+	+	+	+
Активность			+	+
Базовые знания		+	+	+
Желания			+	+

В.Б. Тарасов в своей работе [27] рассматривает большое количество определений агентов и предлагает концепцию разбиения агентов по степени развития внутреннего представления внешнего мира и способу поведения. По этим признакам он выделяет *когнитивных* и *реактивных* агентов.

В этой классификации когнитивные агенты [24, 29, 30] обладают более богатым и полным представлением о внешней среде, чем реактивные. Это обуславливается наличием у таких агентов базы знаний и механизма решения. На рисунке 2.1 приведена обобщенная условная схема внутреннего устройства когнитивного агента.

Реактивные агенты, имеют очень скудное представление о внешней среде или не имеют его совсем [31, 32, 33, 34, 35]. Они практически не способны планировать свои действия, т.к. само определение реактивности означает структуру обратной связи, которая не содержит механизмов прогноза. На рисунке 2.2 приведена схема внутреннего устройства реактивного агента.

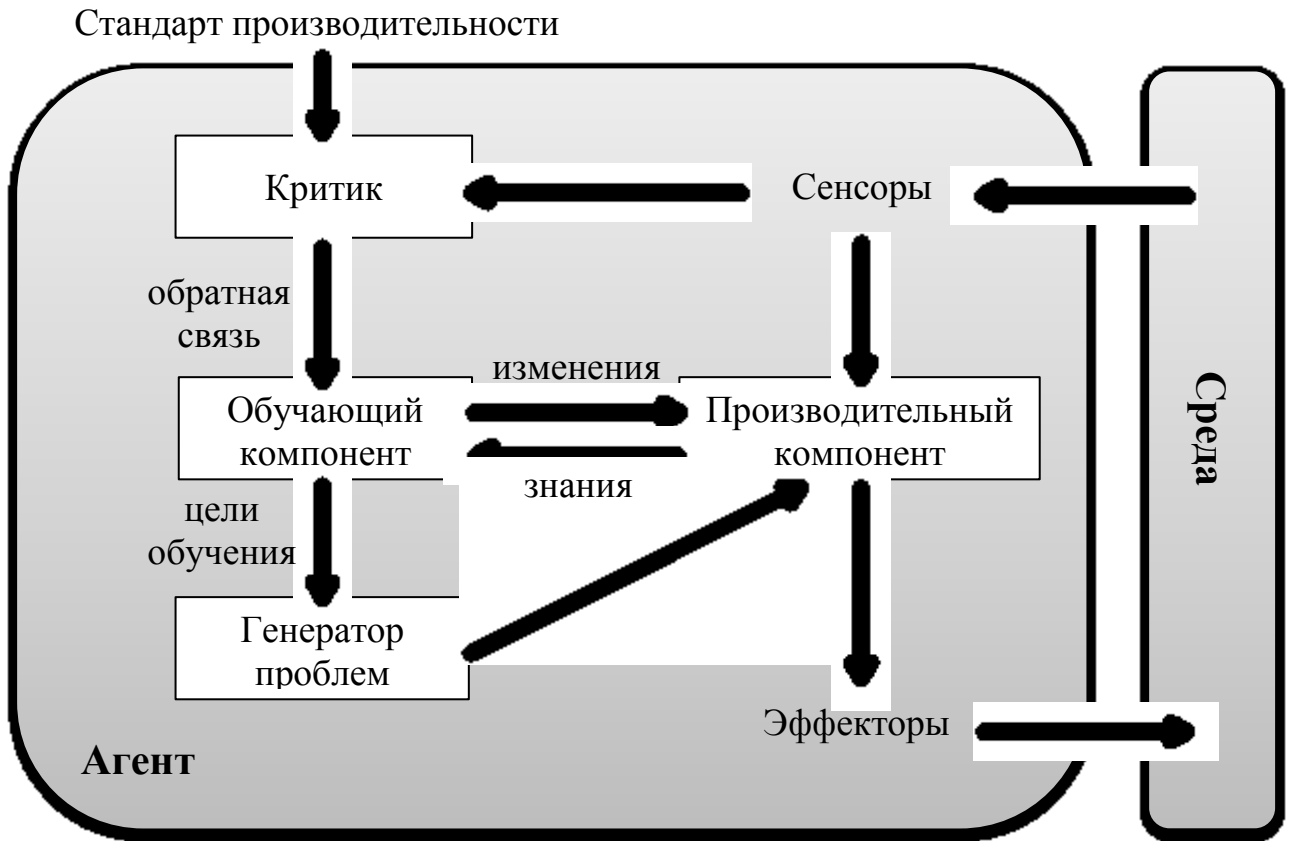


Рисунок 2.1 - Схема внутреннего устройства когнитивного агента

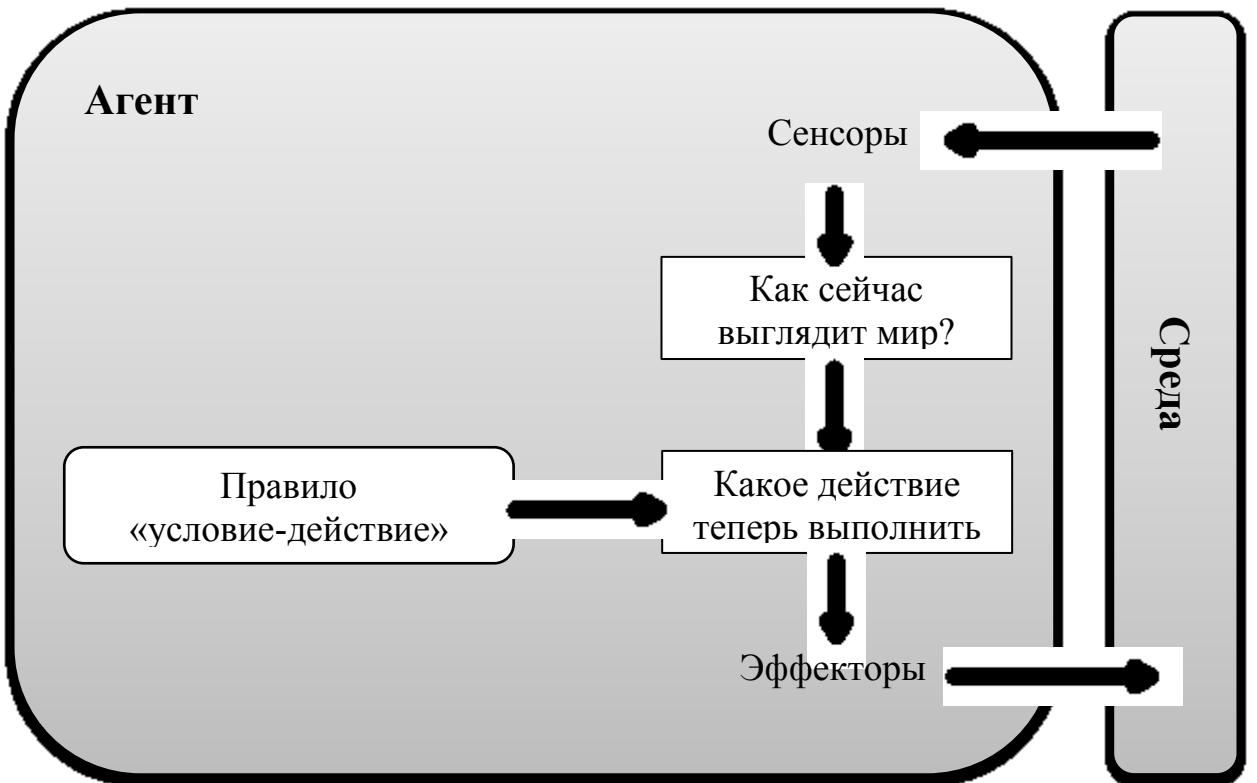


Рисунок 2.2 - Схема внутреннего устройства реактивного агента

В таблице 2.2 приведены свойства реактивных и когнитивных агентов.

Таблица 2.2 Свойства когнитивных и реактивных агентов

Характеристики	Реактивные агенты	Когнитивные агенты
Внутренняя модель внешнего мира	Примитивная	Развитая
Рассуждения	Простые одношаговые рассуждения	Сложные и рефлексивные рассуждения
Мотивация	Простейшие побуждения, связанные с выживанием	Развитая система мотивации, включающая убеждения, желания, намерения
Память	Нет	Есть
Реакция	Быстрая	Медленная
Адаптивность	Высокая	Малая
Модульная архитектура	Нет	Есть
Состав МАС	Большое число зависимых друг от друга агентов	Небольшое число автономных агентов

Таким образом, когнитивные агенты обладают ярко выраженной автономностью, работают относительно независимо, демонстрируют достаточно гибкое поведение. Однако сложность автономных агентов вызывает серьезные трудности при организации эффективного их взаимодействия. Поэтому система, построенная из интеллектуальных агентов, как правило, состоит из небольшого числа автономных единиц.

Реактивные же агенты, обладают простой структурой, что обуславливает жесткую зависимость от среды. Следовательно, возможности таких агентов, когда они действуют в одиночку, сравнительно невелики. Им легче формировать группу или организацию, которая гибко адаптируется к изменениям среды. Поэтому реактивные агенты представляют наибольший интерес именно на коллективном уровне. Реактивные агенты, почти не имеющие индивидуальности, за счет своего большого числа и избыточности могут решать сложные задачи.

2.1.2 Мультиагентные системы, классификация и архитектуры

В.Б. Тарасов дает формализованное определение мультиагентной системы (МАС) в виде определенной формулы, не детализируя содержание входящих в нее составляющих [36]

$$MAS = (A, E, R, ORG, ACT, COM, EV),$$

где A – множество агентов, E – множество сред, находящихся в определенных отношениях R и взаимодействующих друг с другом, формирующие некоторую организацию ORG , обладающих набором индивидуальных и совместимых действий ACT , включая возможные коммуникативные действия COM и возможность эволюции EV .

Согласно [37] МАС определяется как сильно связанная сеть решателей совместно работающих над проблемами, которые могут выходить за рамки возможностей индивидуальных агентов.

Дж. Люгер определяет МАС как вычислительную программу, решатели которой расположены в некоторой среде и каждый из них способен к гибким, автономным и социально-организованным действиям в направлении предопределенной цели [38].

Таким образом, обобщив вышеизложенные определения, МАС можно определить как систему, состоящую из некоторого набора взаимодействующих агентов, обладающих определенными интеллектуальными способностями, и окружающей среды (рисунок 2.3).

Ключевыми составляющими любого определения МАС являются понятия агента и среды. Первое было подробно рассмотрено в предыдущем параграфе, поэтому сейчас рассмотрим понятие среды, в которой действуют агенты.

Д.А. Поспелов в своей работе [39] производит подробный анализ возможных типов сред. Он выделяет три основных класса. Первый класс – это *замкнутые* среды. Они допускают конечное детерминированное или вероятностное описание. Агенты в таких средах могут обладать полным априорным знанием о среде, а также об ее свойствах, либо оперативно получать информацию от среды в

процессе взаимодействия с ней. Второй класс – *открытые среды*. Данный класс предполагает отказ от возможности получения агентом полных знаний о среде. Вводится локальное описание среды. Третий класс сред может менять свои характеристики в зависимости от действий агентов (порождение новых объектов или агентов) и называется *трансформируемой*.

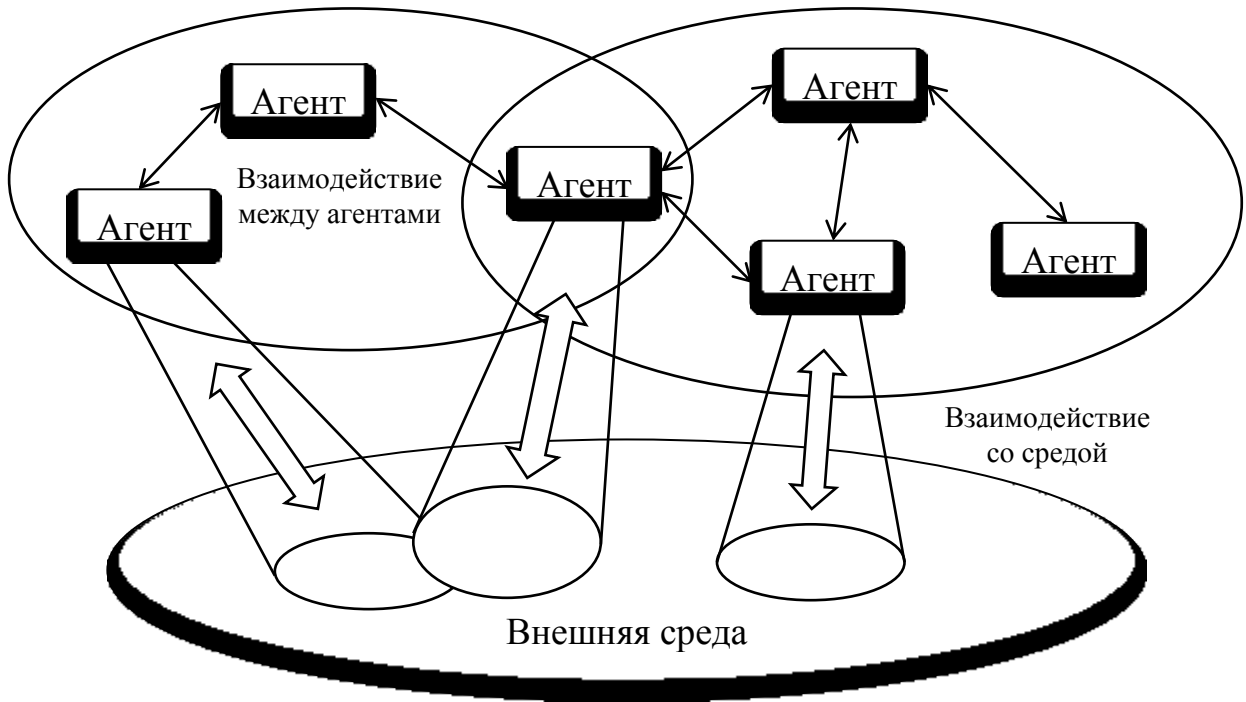


Рисунок 2.3 - Структура мультиагентной системы

Мультиагентные системы имеют обширный круг применения в различных предметных и научных областях. Поэтому также существует очень широкий спектр различных систем, которые называют мультиагентными.

Классифицировать МАС можно по целому ряду признаков. Наиболее распространенной классификацией МАС является разделение по уровню интеллектуальности входящих в нее агентов. Интеллектуальность каждого агента в таких системах, как правило, находится в обратной пропорциональной зависимости от общего количества агентов в системе. По этому признаку выделяется два ключевых направления в исследовании и разработке МАС. Это *распределенный искусственный интеллект (РИИ)* и *искусственная жизнь (ИЖ)*

[27, 40]. В рамках каждого из этих двух направлений исследований разработаны различные принципы построения МАС, т.е. их архитектуры.

Область РИИ заключается в исследовании взаимодействия и построении систем из небольшого числа когнитивных (интеллектуальных) агентов [41, 42, 43, 44]. Количество агентов в таких системах, как правило, не превышает десяти. Агенты здесь решают задачи с помощью рассуждений, связанных с обработкой символов, используют методы искусственного интеллекта, основанные на знаниях. Коллективная интеллектуальность всей системы достигается за счет индивидуального интеллектуального поведения каждого агента. Архитектура построения МАС здесь получила название делиберативной архитектуры (*deliberative architectures*) [45, 46, 47].

Второе направление разработки МАС – это искусственная жизнь. Основоположником данного направления принято называть Родни Брукса [33, 48]. Архитектура МАС здесь основана на реакции системы на события внешнего мира и называется *реактивной архитектурой* (*reactive architectures*). Глобальное интеллектуальное поведение всей системы обуславливается коллективным взаимодействием большого числа простых реактивных агентов [49]. Количество агентов в таких системах может достигать сотен и даже тысяч. Они имеют простую внешнюю структуру и не обладают сложным поведением, которое определяется через простые реактивные правила. Агенты замечают различные изменения во внешней среде и под их воздействием меняют свое состояние или другие параметры среды. Реакция таких агентов может иметь как детерминированный, так и вероятностный характер, чтобы имитировать сложное поведение действительно интеллектуальных агентов.

Совместно с термином ИЖ часто используются понятие «*коллективный интеллект*» (*collective intelligence*) или «*роевой интеллект*» (*swarm intelligence*). Исследователи этого направления в своих работах используют следующие положения [32, 50, 51, 52]:

- 1) мультиагентная система состоит из простых и зависимых друг от друга агентов;

2) каждый агент индивидуально реагирует на события в среде и самостоятельно взаимодействует с другими агентами;

3) в системе не существует центрального управляющего агента, который управляет взаимодействием других агентов;

4) нет точных правил для определения коллективного поведения агентов;

5) глобальное коллективное поведение, свойства и структура зависит только от локальных взаимодействий агентов.

Системы ИЖ находят широкое применение для имитирования естественных природных процессов (колонии муравьев, пчелиные ульи). Однако они также активно используются и в других областях, таких как эвристические алгоритмы.

Необходимо также отметить, что выделение двух основных типов МАС не означает, что между ними есть четкая определенная граница. На практике все большую популярность получают гибридные (смешанные) архитектуры, которые позволяют комбинировать возможности делиберативных и реактивных архитектур, а также избавиться от недостатков и сочетать преимущества обоих направлений.

Примером системы с гибридной архитектурой МАС может служить система с иерархической базой знаний [53]. Данная система содержит структурированную базу знаний, рабочую память, модуль управления коммуникацией и человеко-машинный интерфейс. Агент обладает способностью к рассуждениям и к реактивному поведению. Его база знаний содержит три уровня:

1) знания предметной области;

2) знания о взаимодействии, которые позволяют принимать решения в условиях неопределенности;

3) управляющие знания.

Интеллектуальное поведение агента обеспечивается способностью принимать решения, а реактивное – системой контроля за содержимым рабочей памяти, которая функционирует по принципу глобальной доски объявлений. Агент взаимодействует с пользователем, используя человеко-машинный интерфейс.

Следует также выделить понятие агентно-ориентированной системы (АОС), которое является более широким, чем понятие МАС [54].

М. Вулдридж характеризует АОС как систему, в которой ключевой используемой абстракцией является агент. Агентно-ориентированные системы трактуются как гибридные системы, содержащие наряду с МАС и другие системы (ЭС, обучающие и тестирующие системы, распределенные объектные приложения и т.п.). АОС в настоящее время могут быть глобально распределенными взаимосвязанными совокупностями программных и аппаратных систем, содержащими сотни и тысячи компонентов, что и определяет возрастающую сложность их разработки, внедрения и эксплуатации.

Для программной реализации МАС и АОС на сегодняшний день разработано большое количество различных специализированных программных систем (т.н. агентных платформ), которые содержат набор средств, как для программного описания деятельности агентов, так и для управления и контроля процесса их работы и взаимодействия. Реализованы эти платформы в различном виде: от отдельных сред разработки (NetLogo, Anylogic) до встраиваемых модулей (Repast Symphony), и подключаемых программных библиотек (JADE). Также для реализации агентов могут быть использованы и обычные универсальные языки программирования, такие как Java, C++, Visual Basic и др.

2.1.3 Области применения МАС и примеры

Как уже говорилось ранее, круг применения мультиагентных систем очень широк. Можно сказать, что МАС находят применение везде, где единое монолитное представление системы по той или иной причине невозможно, либо сталкивается с серьезными проблемами.

Интересным и перспективным направлением применения мультиагентных технологий является робототехника [55 , 56 , 57]. Создание мультиагентных робототехнических систем (МРС) можно рассматривать как один из вариантов реализации МАС, состоящих из роботов-агентов. Так в работе [55] описывается вариант МРС для прохождения односвязных лабиринтов. Каждый агент здесь

представляет собой совокупность аппаратно-программных компонентов. Аппаратная часть производит измерение параметров внешней среды сенсорами, обеспечивает возможность воздействия на внешнюю среду, обеспечивает управление исполнительными устройствами и возможность взаимодействия между агентами. Программная часть производит анализ входных сигналов с сенсоров, строит модель внешнего мира, обеспечивает принятие решений, формирует управляющие сигналы и пакеты передачи данных.

Большое распространение МАС получили в логистике [58, 59, 60], за счет существенной гибкости таких систем, а также возможности к самоорганизации и адаптивности к динамическим изменениям и неустойчивости внешней среды. При построении модели логистической сети каждую отдельную операцию закрепляют за конкретным агентом. Участниками логистической цепи, как правило, являются поставщики, склады, транспорт, заказы, потребители и др. Каждого участника цепи соотносят с программным агентом. Все агенты разделяются на два основных типа. Это «заказы» и «ресурсы». Каждый заказ ищет ресурс, который выполнит его наилучшим способом. А каждый ресурс – наиболее подходящий для себя заказ. Процесс построения расписания будет выглядеть следующим образом. В исходном состоянии все агенты свободны и заказы легко распределяются по ресурсам, которые больше всего им подходят. В процессе работы системы все ресурсы становятся задействованными, а оставшиеся заказы начинают конфликтовать. Для разрешения конфликта и нахождения компромисса все агенты вступают в переговоры, т.е. инициируется волна переговоров. Эта волна расширяется по расписанию до тех пор, пока конфликт не будет улажен.

Известно применение МАС в качестве систем регулирования городского движения и транспортных систем крупных предприятий. Авторы работ [61, 62] выделяют следующих агентов: агент-водитель и агент-менеджер. Агент-водитель – это транспортное средство, управляемое человеком, или автономное транспортное средство. Агент-менеджер – это система, установленная в светофор, которая осуществляет управление агентами-водителями. Основная цель для агента-водителя – достигнуть пункта назначения за минимальное время,

используя самый короткий возможный маршрут, для того чтобы затратить меньше топлива на поездку. Цель агента-менеджера – управление агентами-водителями, подъезжающими к перекрестку, их перестроение и создание на перекрестке бесконфликтного и непрерывного проезда транспортных средств. В работе [63] рассмотрена возможность интеграции МАС и транспортной сети горнопромышленного предприятия, где за основу построения берется большая сенсорная сеть, а программная реализация осуществляется с применением современных средств разработки мультиагентных систем. Данную систему предлагается использовать для решения большинства задач управления транспортной сетью в условиях динамических и стохастических процессов горнопромышленного предприятия.

Также существуют исследования, в которых мультиагентные технологии предлагается использовать в лечебных учреждениях для оперативного планирования и управления лечебным процессом [64, 65]. В данном направлении выделяют различные подходы к использованию и построению МАС. В работах первого типа сознательно абстрагируются от конкретных особенностей лечебного процесса в различных больницах [66, 67]. Цель этих работ – исследовать эффективность разных механизмов, обеспечивающих взаимодействие агентов, разных эвристических правил составления расписаний и т.п. В работах второго типа итоговой целью является применение мультиагентной системы для оперативного планирования лечебного процесса в реальных больницах [68]. При этом агенты берут на себя только «формальную» работу, не требующую медицинской квалификации. Постановка диагноза, определение состояния больного, выбор медицинского вмешательства остается за врачами. В работах третьего типа мультиагентная структура используется для построения имитационной модели конкретной больницы [69, 70]. В такой модели с максимально возможной точностью воспроизводятся организационная структура больницы, имеющиеся ресурсы, механизм взаимодействия подразделений в ходе лечебного процесса и реальные статистические характеристики потока больных.

Благодаря наличию имитационной модели появляется возможность совершенствовать саму организацию лечебного процесса.

Широкое применение мультиагентные системы также получили в системах дистанционного обучения (СДО) и интеграции знаний. В проекте МОСДО [71] задачу персонализации в процессе дистанционного обучения авторами предлагается решать с помощью набора трех агентов: персональный агент, агент-координатор и агент обучающих ресурсов. В рамках проекта MASPLANG [72] была построена адаптивная система персонифицированного обучения через Интернет. В данной системе были использованы около десяти типов агентов, выполняющих различные роли и задачи (персональный ассистент, отслеживание действий пользователя, представление учебного материала и др.). Проект I-Help [73] направлен на построение групп поддержки для университетского обучения (дискуссионных форумов, средств доступа к учебным материалам и документам через Интернет). Основными задачами агентов были представление и сопоставление моделей учащихся и преподавателей. В работе [74] предложена многоагентная архитектура интеллектуальной системы дистанционного обучения, в которой используются 8 типов агентов, разделенных на три группы: принимающие решения, выполняющие интерфейсные функции и представляющие модели людей. Также представлен исследовательский прототип системы, моделирующий взаимодействие агентов для управления интерфейсом учащегося на основе реализации нескольких педагогических стратегий. В статье [75] предлагается использовать мультиагентные технологии для разработки системы дистанционного обучения интернет портала «Оптик-сити». Для каждого пользователя в данной системе выделяется персональный агент, который способен автономно решать задачи, приобретать и систематизировать знания, строить модель пользователя на основе общения с ним, а также взаимодействовать с агентами других пользователей и систем. Следует также отметить, что в большинстве представленных проектов СДО особое внимание уделялось вопросам моделирования пользователей, их представление агентами и обеспечение персонифицированной поддержки в ходе обучения.

Использование мультиагентных технологий имеет большое и разностороннее значение для решения задач управления и планирования в социально-экономических и технических системах, а также на производстве. С одной стороны, применение МАС здесь возможно в качестве моделей сложных распределенных систем. С другой стороны, можно использовать способность МАС решать сложные задачи. Например, нахождение оптимума сложных функций, возникающих во время решения управленческих задач, а также выработку необходимых управляющих воздействий. В таких случаях, принято говорить о мультиагентных системах управления (МАСУ). Архитектура таких систем является распределенной (децентрализованной), что позволяет решить большое количество проблем, возникающих в автоматизированных системах управления, базирующихся на централизованной архитектуре. Подобные системы широко применяются в энергетике в рамках концепции интеллектуальных электроэнергетических систем с активно-адаптивными сетями (ИЭЭС ААС) для управления уровнем напряжения и снижения потерь активной мощности в электрических сетях [76,77,78,79]. Также МАСУ используются на промышленных предприятиях для управления технологическим процессом, техническим обслуживанием и ремонтом оборудования, жизненным циклом сложных технических изделий, ресурсами [80,81,82].

Рассмотрим подробнее очень важную и распространенную область применения МАС – имитационное моделирование. Агентный подход применяется для моделирования сложных динамических систем и процессов, когда не удается построить строгую математическую модель исследуемого объекта. Имитационные агентные модели (agent-based models) получили наибольшее применение в тех случаях, когда есть необходимость продемонстрировать деятельность системы, состоящей из большого числа взаимосвязанных субъектов (от десятков до нескольких тысяч), деятельность которых зависит от влияния большого количества различных случайных воздействий и факторов.

Суть данного подхода заключается в представлении такой системы в виде набора агентов и некоторой среды, а также исследовании их поведения и взаимодействия [83].

При этом поведение системы в целом нигде не детерминируется, а определяется как результат совокупности деятельности составляющих её агентов. Иными словами, в процессе работы модели агенты организуются в систему и формируют её поведение. При этом действуют они не под воздействием директив «сверху», а основываясь на собственных интересах и правилах поведения. Таким образом, система выстраивается не «сверху вниз», а «снизу вверх». Данный подход к построению программных систем и моделей является естественным развитием объектного подхода. Главным же отличием агентного подхода от объектного и объектно-ориентированного является наличие у агентов активного начала. Среду же, в которой существуют агенты, можно представить в виде системы пассивных объектов, подвергающихся влиянию агентов.

Конечной целью агентов в таких системах является, как правило, поиск наилучшего решения заданной задачи [40]. Примером такой задачи может служить поиск глобального максимума некоторой функции $max(f)$ с помощью эвристических или приближенных методов. При решении экономических задач в качестве функции f может выступать некоторая функция полезности при заданных ограничениях. Решение задач производится поэтапно. При запуске модели агенты начинают искать приближенное решение. Каждый агент ищет решение, исходя из собственных представлений о функции f , собственного алгоритма и доступных сведений о среде. В процессе поиска решения агенты могут, как взаимодействовать друг с другом и генерировать согласованное решение, так и действовать совершенно независимо. Затем агенты согласно найденному решению изменяют свое состояние, а также некоторые значения среды. После чего снова ищут наиболее приближенное решение, исходя из новых условий. Таким образом, процесс моделирования сводится в последовательном повторении описанных этапов.

При разработке агентных моделей используются различные архитектуры построения МАС. Однако необходимо помнить, что построенные на практике МАС, как правило, имеют гибридную архитектуру и комбинируют возможности делиберативных и реактивных архитектур в некоторой степени. Исходя из этого, в дальнейшем, говоря о принадлежности системы к конкретной архитектуре, будем подразумевать преобладание в системе делиберативного или реактивного компонента. Приведем несколько примеров использования агентных имитационных моделей с различной архитектурой.

Системы с делиберативной архитектурой применяются в случае, когда существует необходимость рассмотреть процесс взаимодействия небольшого числа субъектов, которые обладают сложным интеллектуальным поведением. Например, моделирование военных конфликтов нескольких стран. Так в работе [84] представлена имитационная модель военных конфликтов, в которой группа агентов-государств взаимодействуют друг с другом согласно заранее определенным правилам (осуществляют внешнюю, экономическую и военную политику). Каждое государство в данной модели обладает определенным набором характеристик, которые определяют приоритеты его политики, его возможности, а также вес на региональной арене. Изменяя начальные параметры агентов можно моделировать различное множество конфликтов, в том числе те, которые существовали в прошлом, имеют возможность проявиться в будущем, а также те, существование которых по тем или иным причинам невозможно.

Системы с реактивной архитектурой применяются при моделировании процессов, когда необходимо учесть поведение большого числа участников, формирующих своей деятельностью общую картину. Рассмотрим далее несколько примеров использования данного типа моделей в различных предметных областях.

В работе [85] описывается применение агентного моделирования для исследования механизмов распространения культурных норм и ценностей как в рамках одной страны, так и в целом по миру. Автор показывает основные направления современного применения агентного моделирования

международных отношений, в том числе при анализе этнических конфликтов, формировании международных коалиций. Посредством агентного моделирования показывается, как создать такие условия, чтобы нормы, которые изначально может не разделять значительная часть населения, в конечном счете, распространились повсеместно. Практическое применение данных алгоритмов показано автором статьи на примере ситуации на Украине 2015-2016 гг.

Статья [86] посвящена моделированию процессов кластерообразования в региональных экономических системах с помощью агентного подхода. Основным тезисом данной работы является утверждение, что процессы стихийного кластерообразования в социально-экономической среде протекают не линейно, а скачкообразно. Исследование было проведено с помощью агентного имитационного моделирования с применением алгоритмов FOREL и k-means.

В статье [87] авторы для исследования микроструктуры на свойства экономики также использовали инструментарий агентного моделирования. Был проведен ряд вычислительных экспериментов - случайным образом изменялась структура связей между потребителями и производителями, после чего отслеживалось суммарное потребление ресурсов. Далее было проведено исследование на основе подхода «learning by doing», которое продемонстрировало т.н. эффект Матфея: более эффективные производители эволюционировали, повышали свою эффективность и захватывали всю большую и большую долю рынка. Однако в условиях ограниченной информации он проявлялся лишь локально, внутри отдельных сегментов рынка.

Работа [88] посвящена разработке мультиагентной имитационной модели формирования мнения избирателя в ходе избирательной кампании. Авторами предложена система показателей, характеризующих условия проведения кампании, социально-демографические характеристики электората, применяемые в кампании избирательные технологии, влияние межличностной коммуникации и избирательных технологий на избирателей. Мнение агента-избирателя («за» или «против») определяется с учетом его индивидуальных характеристик, влияния межличностной коммуникации и избирательных технологий. Данную модель

авторы предлагают использовать для прогнозирования итогов избирательных кампаний, оценки эффективности применения различных избирательных технологий, формирование как статических, так и динамических стратегий проведения избирательной кампании.

Как видно из представленных примеров, агентные имитационные модели, основанные на реактивной архитектуре, получили наиболее широкое распространение в общественных науках. Популярность данного метода для моделирования социальных и экономических процессов можно объяснить тем, что в этих областях разработка действительно продуманной и сложной модели действующего субъекта, которую можно считать действительно интеллектуальным агентом, подчас сталкивается с серьезными трудностями. Для построения такого агента требуется наличие высокоразвитой теории психологии субъектов, полное знание алгоритмов, которые используются для принятия тех или иных решений. То есть необходимо создание полной и точной модели предметной области реального мира, формализация ментальных свойств агентов и процессов рассуждения, что представляет существенные трудности для технической реализации. Поэтому для решения подобного рода задач более эффективным методом является построение простой схемы действий агента, а отклонение от нее считать случайной величиной с заданным распределением.

Однако применение агентных имитационных моделей не ограничивается областью социально-экономических процессов. Подобные модели также могут использоваться для моделирования естественных процессов. Например, процессов распространения вируса, различных эволюционных процессов и т.д.

2.2 Разработка агентной модели распространения и локализации природных динамических процессов

Как было показано в предыдущем параграфе, имитационные агентные модели являются распространенным инструментом для моделирования сложных динамических систем и процессов. Они применяются в тех случаях, когда есть необходимость продемонстрировать деятельность системы, состоящей из

большого числа взаимосвязанных субъектов, деятельность которых зависит от влияния различных случайных воздействий и факторов. Именно этот подход был применен в настоящем исследовании для разработки модели распространения и локализации природных динамических процессов.

Сформулируем основные требования, предъявляемые к разрабатываемой имитационной агентной модели. Модель должна:

1. позволять моделировать распространение одного или нескольких распределенных динамических процессов, а также формировать их пространственное представление в проекции на горизонтальную плоскость (при этом скорость расчета должна значительно превышать реальный процесс);

2. отображать полученное представление динамического процесса в виде контура/контуров на карте реальной местности необходимого масштаба;

3. рассчитывать различные характеристики и параметры конфигурации моделируемых процессов в различные промежутки времени;

4. предоставлять возможность воздействовать на динамический процесс прямо в процессе моделирования различными способами, включающими в себя как непосредственное воздействие на процесс со стороны противодействующих сил, так и естественное изменение параметров природной среды (скорость и направление ветра, влажность воздуха и др.);

5. должна быть реализована в виде самостоятельного программного обеспечения с возможностью интеграции или совместного использования с существующими дистанционными системами мониторинга.

6. выходные данные модели должны соответствовать справочникам и руководствам по борьбе со стихийными динамическими процессами, принятыми в РФ в качестве нормативных.

Теперь сформулируем ограничения и предположения для разрабатываемой модели:

1. Областью моделирования является область на карте реальной местности. На карту нанесены слои, которые содержат информацию о различных элементах

среды моделирования, таких как реки, озера, лесные насаждения, дороги, овраги, населенные пункты, и другие объекты.

2. Распространение динамического процесса по поверхности Земли и противодействующих ему сил рассматриваются в проекции на горизонтальную плоскость. Координатная система $X = [x_1, x_2]^T$ привязана к карте; $X \in D$, где D – рассматриваемая сценарная область.

3. Микрометеорологические, топографические параметры и другие характеристики поверхности, необходимые для расчета конфигурации и скорости распространения процесса предполагаются известными в каждой точке карты. Набор таких параметров и характеристик зависит от используемых частных моделей динамического процесса, которые выбираются исходя из его физической природы.

Для осуществления необходимости хранения и визуализации пространственной информации будет использована технология геоинформационных систем (ГИС).

Т.к. объектом моделирования в модели является реальный процесс, то в качестве агентов выделили реальных участников данного процесса. Это непосредственно сам динамический процесс, а также противодействующие ему силы и средства.

Представлять динамический процесс на поверхности Земли в агентном виде возможно двумя способами. Первый способ – это представление всего процесса в виде одного когнитивного агента. При этом такой агент в процессе моделирования остается «цельным», несмотря на то, что он может распространиться на большую территорию и иметь различные свойства на разных участках. В таком случае значительно усложняются механизмы взаимодействия со средой и другими агентами. Так, например, у крупных природных пожаров значительно удаленные части фронта пожара могут иметь различные свойства (тип пожара, скорость распространения, интенсивность горения и т.д.), и дальнейшая динамика их развития никак друг от друга не зависит. Таким образом, представление очага пожара в виде одного агента, хоть и выглядит наиболее

логичной и естественной формой, но имеет значительные недостатки, связанные со сложностью разработки алгоритмов его работы, а также их реализации.

Второй способ – это выделение только одного небольшого участка фронта динамического процесса в качестве реактивного агента, обладающего на всей области воздействия одинаковыми свойствами. Совокупность взаимодействия таких агентов друг с другом и со средой будет определять динамику распространения динамического процесса на поверхности Земли. Такой подход значительно упрощает процесс расчета параметров процесса, а также позволяет использовать существующие модели распространения рассматриваемых процессов. В качестве недостатка здесь можно выделить необходимость разработки алгоритмов «объединения» таких агентов в один контур при расчете пространственных координат. В настоящем исследовании был использован второй способ агентного представления динамического процесса.

Всего же в модели выделили четыре типа агентов:

- участок фронта динамического процесса (агенты типа A);
- силы, осуществляющие непосредственное воздействие на процесс с целью его локализации (агенты типа B);
- силы и средства, косвенно воздействующие на динамический процесс, путем изменения характеристик среды (агенты типа D);
- агент-менеджер (агент M).

2.2.1 Моделирование фронта динамического процесса (A -агенты)

Агент, представляющий участок фронта динамического процесса, (A -агент) является источником энергии для дальнейшего распространения динамического процесса. Характеризуется следующими параметрами:

- текущими пространственными координатами (X, Y) ;
- номером контура N , к которому относится данный агент;
- вектором внешней нормали к контуру $n = [n_x, n_y]^T$;
- вектором скорости движения $v = [v_x, v_y]^T$;
- значением интенсивности выделения энергии I ;

- ссылками L и R на соседних агентов для создания единого контура;
- текущим состоянием активности [*Active, Stay, Disabled*];
- другие параметры, зависящие от природы моделируемого процесса.

Основной целью, которой A -агенты руководствуются при исполнении – это перемещение в пространстве (среде моделирования). Область видимости A -агентов ограничена расстоянием до соседних агентов за счет ссылок L и R .

Пространственные координаты A -агентов рассчитываются на каждом шаге моделирования по специально разработанному алгоритму. Данный алгоритм будет подробно рассмотрен в параграфе 2.3. Помимо расчета приращений координат для агентов A данный алгоритм предусматривает упорядочение расчетной сетки. Внедрение данного алгоритма в агентную модель позволяет эффективно управлять популяцией A -агентов (добавлять и удалять агентов).

Физический смысл «интенсивности выделения энергии» напрямую зависит от природы моделируемого процесса. В качестве примеров можно привести количество особей при распространении вредителей, интенсивность извержения лавовых потоков, интенсивность горения растительности для природных пожаров.

Добавление A -агентов в процессе моделирования

Во время исполнения модели A -агенты перемещаются по среде, увеличивая площадь контура динамического процесса в десятки и сотни раз. Расстояние между соседними агентами также растет, что приводит к очень грубому представлению контура процесса. Поэтому необходимо производить упорядочение расстояний между соседними агентами $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$, $i \in N(t)$. Для этого рассчитывается расстояние $l(i)$ между каждой парой агентов. Если $l(i) > l_{\max}$, то порождается новый агент $A_j(t)$, который располагается между парой $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$. В качестве характеристик нового агента $A_j(t)$ записываются средние значения соответствующих характеристик агентов $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$. На рисунке 2.4 схематично представлен данный процесс.

От величины l_{\max} зависит количество A -агентов при расчете контура. При большом значении l_{\max} представление контура процесса будет достаточно грубым.

Однако слишком малое значение l_{\max} приведет к порождению большого числа агентов, что значительно увеличит требования к вычислительной мощности при моделировании.

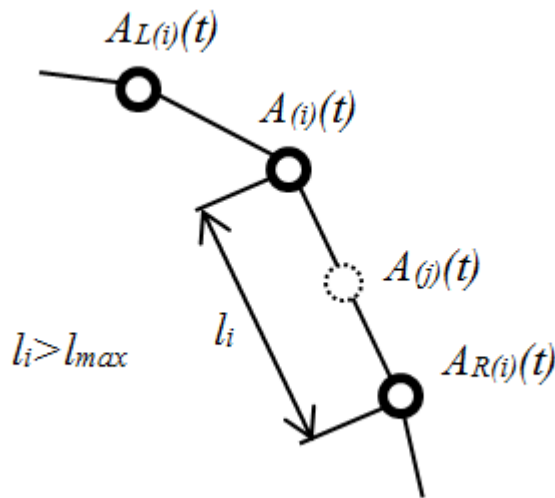


Рисунок 2.4 - Добавление нового A -агента

Удаление A -агентов из общего контура в процессе моделирования

Необходимость удаления агентов типа A из контекста моделирования возникает в двух случаях:

1. если расстояние $l(i)$ между агентами $A_i(t)$ и $A_{R(i)}(t)$ меньше заданного значения l_{\min} , то агент $A_i(t)$ удаляется. При этом ссылки R и L у агентов $A_{R(i)}$ и $A_{L(i)}$ корректируются следующим образом: $R(L(i))=R(i)$, $L(R(i))=L(i)$.

2. при осуществлении обрезки контура, которую необходимо произвести при самопересечении или взаимном пересечении двух и более контуров динамических процессов (в случае одновременного моделирования нескольких процессов). Для этого, на каждой итерации в процессе моделирования производится анализ пересечений и самопересечений контуров. Пересечение контуров, в том числе и самопересечение, имеет место, если для некоторой пары отрезков $A_i, A_{R(i)}$ и $A_j, A_{R(j)}$ ($i \neq j$, $i \neq R(j)$, $j \neq R(i)$) точка их пересечения ξ лежит внутри каждого из них. В этом случае изменяются ссылки у агентов A_i и $A_{R(j)}$: $R(i)=R(j)$, $L(R(j))=i$. Агенты, оказавшиеся внутри области получившегося контура удаляются.

Процедуры добавления и удаления агентов производятся агентом менеджером M (см. параграф 2.2.3).

Переход состояний A-агента

Как уже было указано выше, для A -агентов возможно три состояния, характеризующих его активность. Обозначили эти состояния следующим образом:

- «*Active*» (агент активен, участвует при построении общего контура динамического процесса, а также может перемещаться в среде);
- «*Stay*» (агент активен, участвует при построении общего контура динамического процесса, однако не может перемещаться в среде);
- «*Disabled*» (агент неактивен, не участвует при построении общего контура и не может перемещаться в среде);

Переход агента из состояния «*Active*» в «*Stay*» возможно в нескольких случаях.

Во-первых, агент может самостоятельно перейти в «*Stay*», когда попадает в область, в которой отсутствуют ресурсы для его распространения. Во-вторых, он может быть «остановлен» агентом типа B , оказывающим воздействие, снижающее показатель интенсивности I (более подробно данный процесс будет рассмотрен далее).

Переход агента из состояния «*Active*» в «*Disabled*» происходит при инициации от M -агента процесса удаления A -агента.

Переход агента из состояний «*Disabled*» или «*Stay*» в «*Active*» в данной модели не предусмотрен.

2.2.2 Моделирование сил, противодействующих распространению динамического процесса (B - и D -агенты)

Описание и характеристики B-агентов

Агенты типа B (B -агенты) моделируют действие сил, противодействующих процессу распространения, оказывая непосредственное воздействие на A -агентов. Под такими силами подразумеваются команды или бригады, состоящие из

некоторого числа специально обученных людей. В логику действия таких агентов могут быть заложены как индивидуальные особенности поведения входящих в состав агента специалистов, так и общие правила поведения всей команды (бригады) в целом. Разработка такого агента требует знания и формализации психологии поведения людей во время противодействия стихийному динамическому процессу, и может служить темой отдельного исследования. В данной же работе задачи создания такого интеллектуального агента не стоит. Более того, логика действий B -агентов сознательно упрощается, исходя из предъявляемых к модели требований, а именно быстрота работы модели и соответствие действий агентов документам и справочникам, принятым в РФ в качестве нормативных. Таким образом, противодействующая команда в контексте настоящего исследования рассматривается лишь как инструмент воздействия на кромку динамического процесса.

B -агенты характеризуется следующими параметрами:

- текущими пространственными координатами (X, Y) ;
- значением скорости движения по местности v , м/с;
- направлением обхода контура динамического процесса $\alpha = [R, L]$;
- значением скорости борьбы с динамическим процессом ΔI (мера воздействия агента B на интенсивность выделения энергии I агента A);
- номером fc ближайшего по расстоянию агента типа A ;
- текущим состоянием [*fight, move, stay*].

При исполнении, B -агенты руководствуются целью ликвидировать все активные очаги распространения динамического процесса. Для достижения своей B -агент перемещается по среде к ближайшему A -агенту, и производит воздействие на его показатель интенсивности I , снижая его значение. Как только значение I становится равным 0, агент A_i меняет свое состояние на «*stay*», а агент B перемещается к агенту A_R .

Количество, характеристики, а также расположение B -агентов задаются пользователем, исходя из целей и задач моделирования в конкретном сценарии.

Область видимости B -агентов не ограничена. Находясь в любой точке на карте агент B «видит» всех активных A -агентов.

В процессе моделирования расчет новых координат (X, Y) производится различными способами, в зависимости от текущего состояния борьбы с динамическим процессом. Если состояние - «*fight*», то по мере «борьбы» в качестве координат (X, Y) B -агента принимаются текущие координаты A -агентов. Если состояние - «*move*», то производится расчет расстояния S_{ji} от текущего агента B_j до каждого агента A_i . Затем выбирается наименьшее из этих расстояний и производится перезапись $B_{j_c}=i$. Высчитывается нормаль направления движения N от B_j до A_i . Сами координаты B_x, B_y рассчитываются следующим образом:

$$\begin{cases} B_x(t+1) = B_x(t) + N_x \cdot v \\ B_y(t+1) = B_y(t) + N_y \cdot v \end{cases} \quad (2.1)$$

Добавление B-агентов в процессе моделирования

Добавление новых агентов типа B производится пользователем перед началом моделирования, либо уже в процессе, если этого требуют цели и задачи исследования.

Удаление B-агентов в процессе моделирования

Удаление агентов типа B из сценария моделирования производится пользователем, если этого требуют цели и задачи исследования.

Взаимодействие A- и B-агентов

Рассмотрим более подробно взаимодействие агентов A и B . Если агент B справится со своей задачей, то агент A перейдет в состояние «*stay*». Процесс борьбы на участке кромки может продолжаться одну или более итераций, а успех агента B напрямую зависит от показателя ΔI . Скорость борьбы с процессом ΔI определяется перед началом моделирования, исходя из профессиональной подготовки, физического состояния, оснащенности и количества людей в команде, в соответствии с нормативными документами.

Таким образом, интенсивность выделения энергии агентом A_i , находящимся под воздействием агента B_j рассчитывается следующим образом:

$$I_A(t+1) = I_A(t) - \Delta I_B(t), \quad (2.2)$$

где $I_A(t+1)$ – значение интенсивности выделения энергии агента A в период времени $t+1$, $I_A(t)$ – значение интенсивности выделения энергии агента A в период времени t , $\Delta I_B(t)$ – снижение интенсивности выделения энергии, вызываемое B -агентом за один шаг моделирования.

Переход состояний B-агента

Для B -агентов возможно три состояния, характеризующих текущее состояние борьбы с динамическим процессом. Обозначили эти состояния следующим образом:

- «*fight*» (агент находится в состоянии борьбы с процессом);
- «*move*» (агент перемещается по среде к ближайшему A -агенту);
- «*stay*» (агент не выполняет никаких действий);

Переход агента из состояния «*move*» в «*fight*» возникает, когда расстояние от B -агента до агента A_{fc} равно нулю, т.е. команда достигла кромки динамического процесса.

Обратный переход возможен в случае, если все агенты текущего контура динамического процесса «обезврежены», и одновременно с этим на карте есть другой или другие активные контура.

В состояние «*stay*» B -агент переходит, когда на карте больше не осталось действующих A -агентов.

Описание и характеристики D-агентов

Агенты типа D (D -агенты) представляют собой силы и средства, используемые при косвенном методе борьбы с динамическим процессом, например, для построения заградительных барьеров при локализации. Данные агенты могут быть различных типов (например, бульдозеры, катера, вертолеты, самолеты и другие), однако их объединяют следующие свойства:

- отсутствие непосредственного взаимодействия с A -агентами;
- взаимодействие с пользователем системы;
- воздействие на A -агентов осуществляется косвенно, путем создания заградительных барьеров (дополнительных слоев на карте).

В качестве примера можно привести процесс построения **бульдозером** противопожарного барьера, который при правильном использовании может служить непреодолимым препятствием для распространения пожара. Либо прокладка **катером** боновых заграждений на поверхности воды при локализации разливов нефти.

Разберем типовые характеристики D -агента:

- текущие пространственные координаты (X, Y) ;
- значение скорости движения по местности v , м/с;
- значение скорости прокладки заградительных барьеров V ;
- объемом топливного бака G , литров;
- расход топлива R , л/км;
- текущим состоянием [*build, move, stay*].

При исполнении, данные агенты в качестве цели используют прямые указания от пользователя, которые могут заключаться либо в перемещении в заданную точку, либо в построении заградительного барьера.

Скорость движения, объем топливного бака, расход топлива и другие характеристики задаются согласно спецификациям конкретной техники и справочникам.

В процессе моделирования расчет новых координат X , Y производится исходя из текущего состояния. Если состояние - «*build*», то перемещение рассчитывается согласно заданной пользователем траектории прокладки заградительного барьера, а также возможной в этом состоянии скорости движения. Если состояние - «*move*», то перемещение рассчитывается линейно в направлении целевых координат.

Добавление D -агентов в процессе моделирования

Количество и типы доступной техники (D -агентов) задаются заранее, исходя из целей моделирования. Пользователь в процессе моделирования имеет возможность воспользоваться доступной техникой, выдавая задания с помощью специального интерфейса.

Удаление D-агентов в процессе моделирования

Удаление *D*-агентов из контекста моделирования производится только в случае выхода из строя соответствующей техники, что может быть предусмотрено в конкретном сценарии моделирования.

Взаимодействие D-агентов со средой

Как уже было сказано ранее, данный тип агентов непосредственно взаимодействует только со средой и пользователем. Получив от пользователя задание на прокладку заградительного барьера, *D*-агент по определенной траектории по мере своего перемещения со скоростью V добавляет на карту специальные полигоны шириной S . В результате мы получаем некоторую полосу на карте, которая воспринимается *A*-агентами как участок, на котором отсутствуют ресурсы для дальнейшего распространения.

Переход состояний D-агента

Для *D*-агентов возможно три состояния, характеризующих процесс прокладки заградительного барьера. Обозначили эти состояния следующим образом:

- «*build*» (агент находится в состоянии прокладки барьера);
- «*move*» (агент перемещается по карте);
- «*stay*» (агент не выполняет никаких действий);

Переход агента из состояния *stay* в *build* или *move* происходит только при получении соответствующего задания от пользователя. По мере выполнения задания агентом он автоматически переходит обратно в состояние *stay*.

2.2.3 Агент менеджер (*M*-агенты)

Агент типа *M* представляет собой координатора или менеджера в рассматриваемой модели. Он регулирует действия других агентов в процессе моделирования, синхронизирует перемещение агентов по карте, производит анализ пересечения и самопересечения контура и производит добавление и удаление *A*-агентов при необходимости.

Одной из основных целей *M*-агента является разрешение «конфликтных»

ситуаций между другими агентами. В качестве примера такого конфликта можно привести пример удаления A -агента (перевода в состояние «disabled»). Когда два A -агента A_1 и A_2 находятся слишком близко, каждый из этих агентов посылает сообщение M -агенту, что соседа нужно удалить. Однако удалить нужно только одного из этих агентов. Какой именно из агентов A_1 или A_2 будет удален, решит M -агент исходя из заложенных в него правил. Может быть произведено удаление путем случайного выбора или исходя из того, какой агент первым отправил сообщение менеджеру.

Добавление и удаление M -агентов в процессе моделирования не производится. В модели может быть один менеджер.

Характеристики и конфигурация данного агента напрямую зависит от способа реализации данной модели в виде программного комплекса.

2.3 Алгоритм расчета конфигурации фронтов динамических процессов

В параграфе представлен алгоритм расчета конфигурации фронтов динамических процессов на поверхности Земли. Данный алгоритм предлагается использовать для расчета пространственных координат A -агентов.

Модель процесса распространения основана на уравнении Гамильтона-Якоби (1.2), рассмотренного в первой главе, при начальных условиях

$$X(0) = X_0(\alpha), P(0) = P_0(\alpha), \quad (2.3)$$

где $X_0(\alpha)$ и $P_0(\alpha)$ представляют собой параметрическое представление начального контура процесса и множества нормалей к нему, $\alpha \in U$, U – множество значений параметра α .

Скорость распространения фронта процесса рассчитывается, исходя из используемой физической модели процесса, и зависит от множества параметров внешней среды. Например, в случае природных пожаров скорость фронта зависит от влажности лесного горючего, скорости и направления ветра, уклона местности. Поэтому нормальная скорость движения фронта процесса в уравнении (1.5) может быть представлена как функция нескольких аргументов, например,

$$V_n = V_n(m, X, t, W, E, \beta, \gamma), \quad (2.4)$$

где m – влажность горючих материалов, W скорость ветра, E - уклон местности, β – угол между направлением ветра \vec{W} и направлением нормали к линии фронта P , γ - угол между вектором склона и направлением нормали к линии фронта. В рамках данного подхода нормальная скорость движения фронта пожара в любой точке области моделирования может быть представлена как произведение двух функций:

$$V_n(m, X, t, W, E, \beta, \gamma) = V_0(m, X, t, W, E) * \chi_n(P, W, E), \quad (2.10)$$

где V_0 – максимальная скорость распространения процесса.

Множитель $0 \leq \chi_n(P, W, E) \leq 1$ определяет степень уменьшения скорости распространения процесса V_n в других направлениях. Эта функция определяет локальные скорости движения фронта процесса и называется индикатрисой нормальной скорости фронта или фигуротрисой [15].

Основная идея предлагаемого метода состоит в том, что каждый узел сетки, построенной по методу С. К. Годунова, представляется динамическим агентом типа A . Физически агент не имеет размеров, он является абстрактным носителем определенных функций, однако на рисунках и картах он для наглядности изображается некоторым условным значком (например, кружком).

Рассмотрим конструкцию расчетной сетки (рисунок 2.5).

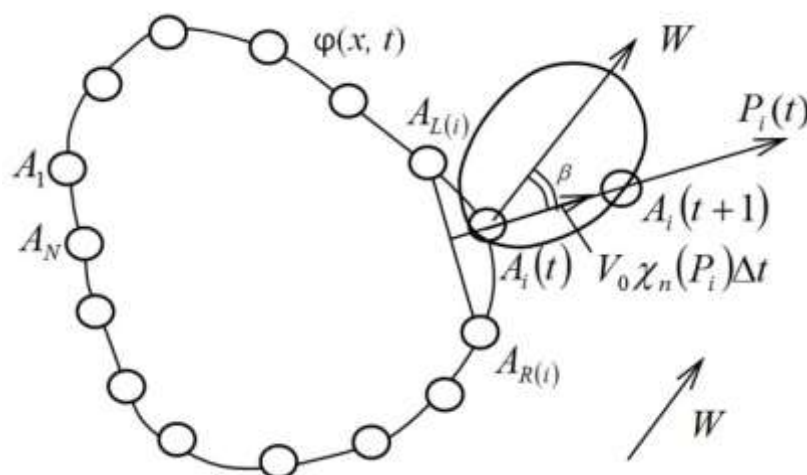


Рисунок 2.5 - Представление контура пожара как цепочки A -агентов

Множество A -агентов образует контур процесса в момент времени t . Координаты агентов $X_i(t)$ вычисляются на каждом шаге моделирования. На

рисунке также показано перемещение агента $A_i(t)$ на следующем временном шаге $A_i(t+1)$. Вектор $P_i(t)$ представляет собой нормаль к линии фронта процесса в точке $A_i(t)$; W – вектор ветра; $V_0 \chi_n(P_i) \Delta t$ – расстояние, на которое перемещается агент A_i за один шаг.

Параметры, которые учитываются при расчете, также могут быть различными. Их количество и наименования зависят как от физической природы моделируемого процесса и используемых частных моделей, так и от требований к системе и возможности построения информационной базы для расчета.

2.4 Формальное описание агентной модели

В данном параграфе представлено формальное описание функционирования агентной модели на основе формализмов сетей Петри. В работе для этой цели использовались цветные вложенные сети Петри (Colored Nested Petri Net) [89, 90]. Использование данного подхода позволяет описать особенности поведения каждого агента, а также проиллюстрировать их взаимодействие, в том числе, конфликты между агентами, которые могут возникать в процессе моделирования. Например, когда два агента A оказываются слишком близко, то один из них необходимо удалить. Также конфликты могут возникать и между B -агентами в процессе их функционирования.

Описываемая система содержит две подсистемы: базовую (системную) – M -агент и сателлитную (агенты – A , B и D). Системная часть содержит информацию о среде моделирования и управляет взаимодействием сателлитных агентов, которые моделируют ситуацию на карте местности.

На рисунке 2.6 в качестве примера приведен фрагмент сателлитной части раскрашенной сети Петри, показывающей взаимодействие агентов типа A и B , управляемых системной сетью, которая представлена агентом M . Ниже кратко описана семантика поведения этих агентов.

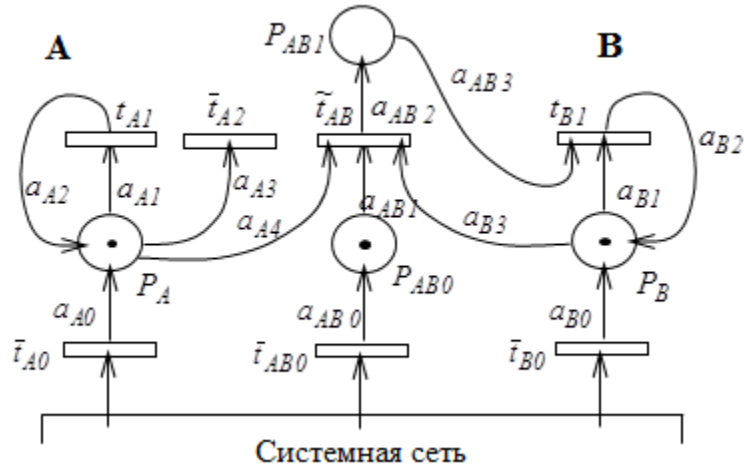


Рисунок 2.6 – Фрагмент сателлитной сети Петри, описывающей взаимодействие агентов A и B под управлением системной сети, моделируемой агентом M

Пространственное положение агента A определяется в соответствии с моделью процесса распространения, как было описано выше. Состояние этого агента определяется маркировкой позиции P_A , которая включает булеву переменную $status_A$, определяющую статус агента, и интенсивность выделения энергии для распространения $intensity_A$ в локальном участке местности, занимаемом агентом. При наличии ресурса в этой позиции агент считается активным.

В начале работы ресурс активизируется по сигналу системной сети путем срабатывания перехода \bar{t}_{A0} по дуге a_{A0} . Активное состояние агента поддерживается по дугам a_{A1} и a_{A2} при срабатывании перехода \bar{t}_{A1} . При отсутствии условий для начала распространения процесса на участке местности, занимаемом агентом, ресурс обнуляется через переход \bar{t}_{A2} . При взаимодействии с агентом типа B ресурс $intensity_A$ уменьшается на каждом шаге моделирования на величину $delta_intensity_A$, которая передается по дуге a_{A4} . при срабатывании перехода \bar{t}_{AB} согласно формуле (2.2). При $intensity_A=0$ агент A становится пассивным и переходит в состояние «stay».

Пространственное положение B -агента определяется системной сетью в соответствии с алгоритмом движения противоборствующих сил. Состояние агента является булевой переменной $status_B$ и определяется маркировкой

позиции P_B : при наличии ресурса в этой позиции агент считается активным. Ресурс при начале работы активизируется через переход \bar{t}_{B0} по дуге a_{B0} из системной сети. Активное состояние агента поддерживается по дуге a_{B1} при срабатывании перехода \bar{t}_{B1} .

Более подробное описание деятельности и взаимодействия агентов в предложенной модели на языке цветных вложенных сетей Петри приведено в приложении А.

2.5 Выводы по второй главе

Данная глава посвящена разработке имитационной агентной модели динамики и локализации динамических процессов на поверхности Земли.

В начале главы приведен обзор понятий агента и мультиагентных систем. Представлены два основных направления в исследовании и разработке МАС, на основании которых сформировались два ключевых типа архитектур построения МАС – делиберативная и реактивная архитектура. Рассмотрена наиболее распространенная на практике гибридная архитектура. Выделено понятие агентно-ориентированной системы (АОС), как гибридной системы, содержащей наряду с МАС и другие системы.

Далее представлена разработанная агентная модель динамики и локализации динамических процессов на поверхности Земли.

В модели предложено использовать 4 типа агентов:

- *A*-агенты предназначены для моделирования динамики процесса распространения.
- *B*-агенты моделируют действие сил, противодействующих процессу распространения, и воздействуют на *A*-агентов.
- *D*-агенты представляют собой силы и средства, используемые при косвенном методе борьбы с динамическим процессом.
- *M*-агент представляет собой координатора или менеджера в модели.

Функционирование модели представлено путем текстового описания, а также с помощью двухуровневой вложенной цветной сети Петри. Данная модель

позволяет на основе единого подхода решать задачи, как по расчету динамики процесса, так и по его локализации и ликвидации, что позволяет повысить эффективность принимаемых решений при разработке мероприятий по борьбе с негативным влиянием данных природных процессов.

Для расчета конфигурации фронтов динамических процессов на поверхности Земли, представленных в виде цепочки A -агентов, предложен алгоритм расчета, основанный на использовании математического аппарата гамильтоновой механики и метода подвижных сеток. Внедрение данного алгоритма в агентную модель позволило эффективно управлять популяцией A -агентов (добавлять и удалять агентов).

Результаты, представленные в главе, опубликованы в работах [91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100].

Глава 3. Имитационная агентно-ориентированная система моделирования распространения и локализации динамических процессов на поверхности Земли

Глава посвящена разработке имитационной агентно-ориентированной системы на основе предложенной выше агентной модели. Разработка системы проводилась на примере конкретного типа процессов (природных пожаров) с использованием частных моделей для расчета скорости распространения фронта.

В начале главы даётся обзор и классификация существующих моделей и систем, использующихся в пожароуправлении. Затем были сформулированы требования и ограничения разрабатываемой имитационной системы. Приведен список частных моделей, которые были использованы для решения задачи моделирования природных пожаров. Также описаны инструменты и технические средства, использованные для реализации модели в виде отдельного самостоятельного программного обеспечения, получившего название «Тайга-3». Приведены примеры интерфейса и работы данной системы.

В конце главы представлена оценка точности и адекватности реализованной модели в системе «Тайга-3».

1.1 Обзор и классификация существующих моделей и систем, использующихся в пожароуправлении

Представленная в предыдущей главе агентная модель для реализации требует использования конкретной частной модели (моделей) для расчета скорости распространения фронта. Выбор такой модели напрямую зависит от физической природы моделируемого процесса, а также от требований к самой разрабатываемой системе. В настоящем исследовании предложенные алгоритмы и модели будут реализованы на примере задачи моделирования природных пожаров. Таким образом, существует необходимость проанализировать существующие модели природных пожаров, а также их реализации в виде программного обеспечения. Однако перед тем как перейти к самим моделям,

дадим определение термину «пожароуправление», которое будет использоваться в дальнейшем.

В широком смысле в РФ под этим термином понимается комплекс мер, формируемый для решения проблем, вызываемых природными пожарами [101]. Спектр данных мероприятий довольно широк и, как правило, включает в себя [102]:

- проведение противопожарной пропаганды для устранения антропогенных причин возникновения пожара;
- создание неблагоприятных условий для распространения пожаров с помощью специального устройства территории и целевых контролируемых выжиганий;
- создание благоприятных условий для своевременного обнаружения и борьбы с природными пожарами и т.д.

В узком плане под пожароуправлением понимается процесс контроля развития возникающих природных пожаров на основе прогноза их поведения [103,104].

Прочитируем известного американского специалиста по лесной пирологии Р. Ротермела [105]: «Можно ли реально предсказать развитие лесных пожаров? Это зависит от точности, с какой вы хотите получить ответ. Движение пожара с точностью до минут, вероятно, никогда не сможет быть предсказано – хотя бы потому, что погодные условия прогнозируются за много часов до пожара. Тем не менее практика и здравый смысл при оценке пожарной обстановки в сочетании с систематическими методами расчета развития пожара дают неожиданно хорошие результаты».

Следует также отметить, что помимо проблемы прогноза метеоусловий, существует ряд причин, по которым точность моделей природных пожаров и временной предел для прогноза не могут быть высокими [101]. Это, как правило, недостаточное знание физико-химических процессов горения растительных горючих материалов (РГМ), а также их характеристик и инфраструктуры местности. Тем не менее, в данном направлении уже много лет ведутся

исследования во всем мире, результаты которых в ряде случаев можно считать удовлетворительными.

Модели природных пожаров можно поделить по степени подробности описания параметров природного пожара. Самые простые модели предназначены для описания изменения отдельных параметров природного пожара, таких как его площадь, периметр или скорость движения фронта. Прогнозирование пространственной конфигурации пожара при этом не производится. Такие модели наименее требовательны к вычислительной мощности и информационному обеспечению. В некоторых случаях расчеты можно производить без использования вычислительной техники, а модели представляют собой набор несложных формул и таблиц [106].

Более сложные модели пытаются описать теплофизический процесс горения РГМ и распространение пожара во времени и пространстве. Среди таких моделей можно условно выделить два класса, это *аналитические* и *экспериментальные* модели.

1.1.1 Аналитические модели природных пожаров

Объектом моделирования здесь является непосредственно процесс горения растительных горючих материалов. Данные модели базируются на физике горения и описывают физические механизмы составляющих пожар процессов для получения изучаемых параметров пожара, не используя при этом экспериментальные данные. Входными параметрами являются физико-химические характеристики горючих материалов, а выходными параметрами, характеризующими процесс, могут быть распределения интенсивностей тепловых и массовых потоков, полнота сгорания горючего, размеры пламени, скорость его продвижения по объекту и другие.

Примером аналитической модели может служить модель, предложенная А.М. Гришиным [107,108].

Данная модель содержит несколько десятков уравнений и граничных условий, описывающих трехмерные процессы тепло- и массообмена, фазовых и

химических превращений при горении, а также движение газовых потоков, вызванное этими процессами. Долгое время эта модель не была реализована в полном виде из-за больших вычислительных сложностей. Тем не менее, на основе этой модели решено множество частных задач. В качестве примера здесь можно привести двумерную модель распространения верховых пожаров [109], а также расчет теплового взаимодействия пожара с деревянными строениями [110].

Аналитический подход к описанию природных пожаров в своих работах по аэродинамике атмосферы при крупных пожарах использовали Ю.А. Гостинцев и Л.А. Суханова [111]. Также здесь стоит упомянуть и модели Д. Морвана [112] и Р.Р. Линна [113].

На основе аналитического подхода для расчета параметров природного пожара был разработан целый ряд программных средств. Особое развитие это направление получило в последние годы, в связи с развитием вычислительных компьютерных систем. Программное обеспечение такого типа обладает очень высокой требовательностью к вычислительным и информационным ресурсам. Их полноценная работа возможна только на высокопроизводительных кластерных компьютерных системах. Примерами таких систем могут служить:

- FIRETEC [114,115];
- FIRESTAR [116,117];
- WFDS [118,119,120,121,122,123].

1.1.2 Экспериментальные модели природных пожаров

Объектом моделирования в моделях данного типа является пожар в целом. Здесь исследуется процесс распространения и развития пожара, т.е. его динамика. Модель представляет собой алгоритм, или совокупность алгоритмов, которые позволяют прогнозировать площадь пожара, длину его периметра, а также описывать как отдельные тактические части кромки пожара, так и весь контур кромки пожара целиком.

Выходными характеристиками в таких моделях могут служить: скорость движения кромки, интенсивность горения, высота пламени. Для пожаров,

возникших в непосредственной близости к населенным пунктам или объектам инфраструктуры, важным показателем является прогноз времени до подхода пожара к объекту.

Экспериментальные модели находят широкое применение для разработки планов ликвидации пожара. Результаты работы таких моделей используют руководители тушения, предприятий лесного хозяйства и подразделений авиационной охраны лесов.

Первые исследования в данном направлении появились еще в середине 20-го века. Примером здесь может служить математическая модель Фонса [124].

На основе исследований Фонса в Северной Америке были созданы две школы, которые разрабатывали модели распространения природных пожаров, ставшие впоследствии стандартами. В США в качестве такого стандарта используются модели, разработанные Р. Ротермелом [125]. В Канаде – модели, основанные на уравнении интенсивности пожара, разработанном Г. Байрамом году [126].

В модели Р. Ротермела в качестве входных параметров в модели используются переменные, описывающие типы РГМ, влагосодержание РГМ, уклон и возвышение местности, а также параметры ветра. Также в модели используется зависимость замедления скорости горения от влагосодержания [127]. Стоит отметить, что используются только те характеристики растительного горючего, которые можно измерить заранее.

Модель Ротермела прошла ряд прямых проверок в полевых условиях [105, 128, 129]. Она включена в Национальную систему определения пожарной опасности США [130]. Несмотря на некоторые критические замечания [129, 131], данная модель является наиболее известной, широко используемой и признана одной из самых удачных зарубежных моделей, предназначенных для расчета скорости распространения огня по лесным горючим материалам при низовых пожарах.

Еще одной распространенной экспериментальной моделью является модель, предложенная Н.П. Курбатским и Г.П. Телицыным [132]. Данными авторами

предложено описывать форму пожара в виде фигуры, состоящей из двух эллипсов, имеющих общую ось.

Среди экспериментальных моделей природных пожаров можно выделить модели, основанные на подходе, который условно можно назвать экспериментально-статистическим. Данный подход основан на сборе большого количества экспериментальных данных о пожарах, проведенных в контролируемых условиях. В качестве выходного параметра модели, как правило, используется скорость распространения пожара. Значение данного параметра ищется с помощью специального удобного аналитического выражения. Это выражение обеспечивает связь между входными параметрами процесса и выходными, а формируется оно таким образом, чтобы значения выходного параметра, предсказанные моделью по известным значениям входных параметров, как можно лучше (в статистическом смысле) совпадали с истинными значениями выходного параметра, определенными из экспериментов.

Данный тип моделей, исходя из способа их построения, имеет ограниченную область применимости. Они справедливы только для тех природных условий, в которых проводились эксперименты. Однако если такая модель используется для моделирования пожара, возникшего в схожих условиях с экспериментами, то точность прогноза будет значительно выше, чем при использовании экспериментально-аналитических моделей, которые предназначены для широкого диапазона растительных условий.

Одной из первых моделей экспериментально-статистического типа можно считать модель Г.А. Амосова [133]. В данной модели были охарактеризованы пламенное и беспламенное горение в лесу, приведены данные о теплотворной способности растительных материалов, теплоте их газификации.

Г.Н. Коровиным была разработана полиномиальная модель скорости распространения пламени. Основана данная модель на результатах обработки 72 огневых опытов [134]. С помощью данной модели можно определить как скорость движения огня в направлении ветра, так и в направлениях перпендикулярных ветру и встречных ему. Помимо скорости движения огня

рассчитываются также величины площади, пройденной огнем, и периметр пожара в зависимости от времени.

Многофакторная модель скорости низового пожара Н.П. Курбатского и Г.А. Ивановой [135] также основана на обработке экспериментального материала.

Математическая модель распространения низового пожара М.А. Софронова [136] представлена в виде формулы:

$$Vx = V_0 * K_w * K_r * K_\varphi \quad (3.1)$$

где V_0 - базовая скорость, м/мин; K_w - коэффициент влияния ветра; K_r - коэффициент влияния относительной влажности воздуха; K_φ - коэффициент влияния уклона поверхности.

Влияние указанных параметров на скорость распространения пожара было определено с помощью экспериментальных выжиганий и огневых опытов. В качестве базовой скорости V_0 принимается скорость распространения кромки низового пожара на данном участке растительности при условиях отсутствия ветра, отсутствия уклона и относительной влажности воздуха 40 %.

Следует также отметить, что результаты, полученные с помощью описанных экспериментальных моделей динамики пожаров, являются сравнительно грубыми из-за недостаточной информации о характеристиках леса, местности, локальных метеоданных. Они ориентированы в основном на получение качественных оценок процесса распространения природного пожара.

Несмотря на большое количество существующих экспериментальных моделей, практическое применение в виде программных средств нашли лишь некоторые из них (например, модель Ротермела). Такие программные средства активно используются как учеными, так и противопожарными службами в различных странах. В качестве примера здесь можно привести системы:

- BEHAVE [137];
- BehavePlus [138];
- FARSITE [139];
- Prometheus [140].

Рассмотрим также агентные имитационные модели и основанные на них системы для моделирования природных пожаров.

В.Б. Кухта в своей работе [141] предлагает метод моделирования низового лесного пожара. Пространство в предлагаемой модели поделено на квадратные ячейки заданного размера, которые могут занимать одно из конечного множества состояний: выгоревшая, горящая в данный момент, несгораемая, сгораемая. Агентами в данной модели являются участки фронта распространения огня, которые перемещаются в пространстве с использованием гибридной дискретно-непрерывной модели. В процессе моделирования происходит добавление новых агентов к уже существующей совокупности, т.к. по мере продвижения агентов расстояние между ними увеличивается. На рисунках 3.1 - 3.2 представлены примеры работы данной системы.

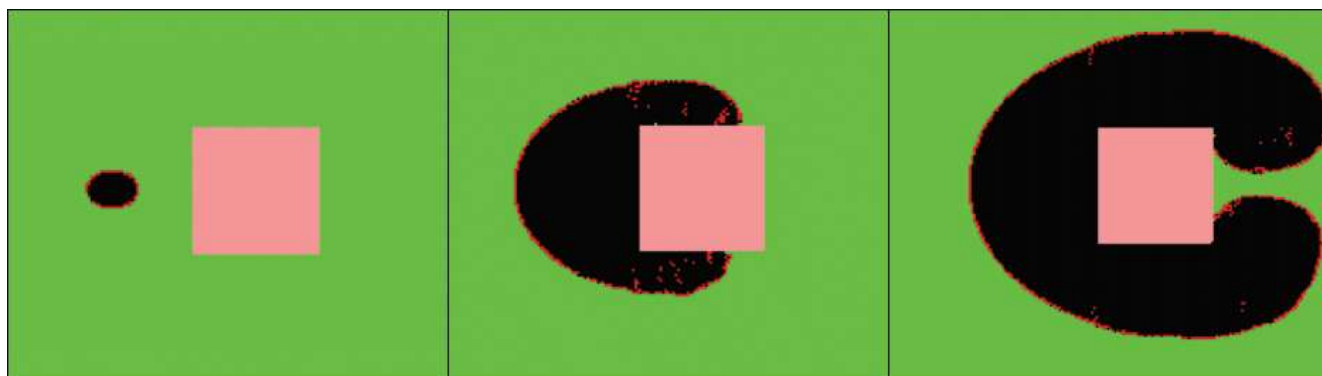


Рисунок 3.1 - Преодоление фронтом огня несгораемого препятствия в процессе моделирования низового пожара

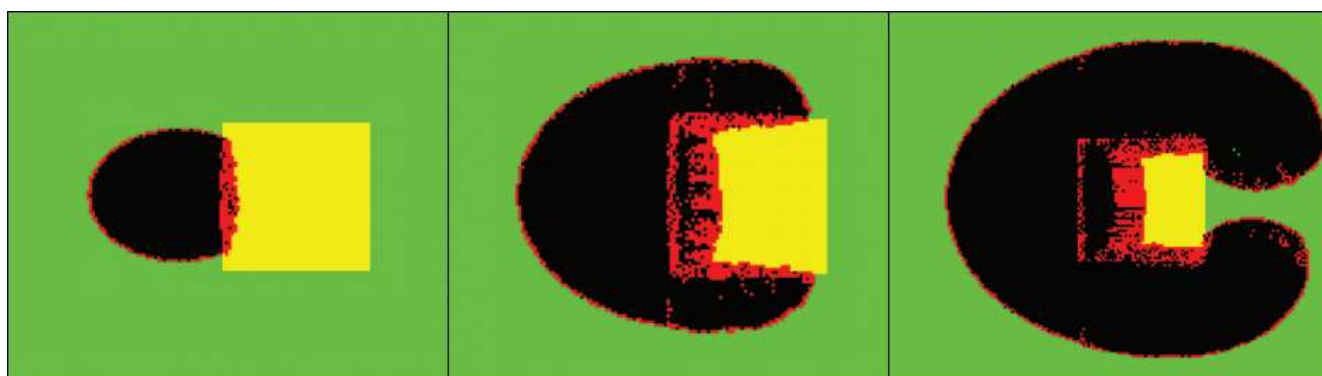


Рисунок 3.2 - Моделирования низового пожара с участком поверхности, где скорость распространения огня отличается от скорости его распространения на всем ландшафте

D. Dai и Y Zhang в своей работе [142] исследуют различные сценарии распространения пожара в населенном пункте с помощью агентной имитационной модели. В качестве района исследования был выбран небольшой город, окруженный лесными насаждениями. Предлагаемая здесь модель основана на взаимодействии агентов, представляющих участок пожара («ember» агенты), с внешней окружающей средой. Данная среда состоит из домов, деревьев, лужаек, дорог и пустырей. Дома и деревья здесь являются основными источниками топлива для «ember» агентов. В процессе работы модели, «ember» агенты принимают два решения. Во-первых, определяют тип участка среды и возможность его возгорания. Во-вторых, если участок среды горит, то агент определяет степень выгорания данной области и решает двигаться ему дальше или нет. Моделирование процесса горения участка среды основано на физическом описании процесса горения, приведенного в работе [143]. Пример работы модели при различных входных параметрах представлен на рисунке 3.3.

Стоит также отметить, что представленные примеры систем, как на основе аналитических, так и экспериментальных моделей, предназначены для моделирования только свободно распространяющегося пожара и не позволяют имитировать воздействие противоборствующих (противопожарных) сил.

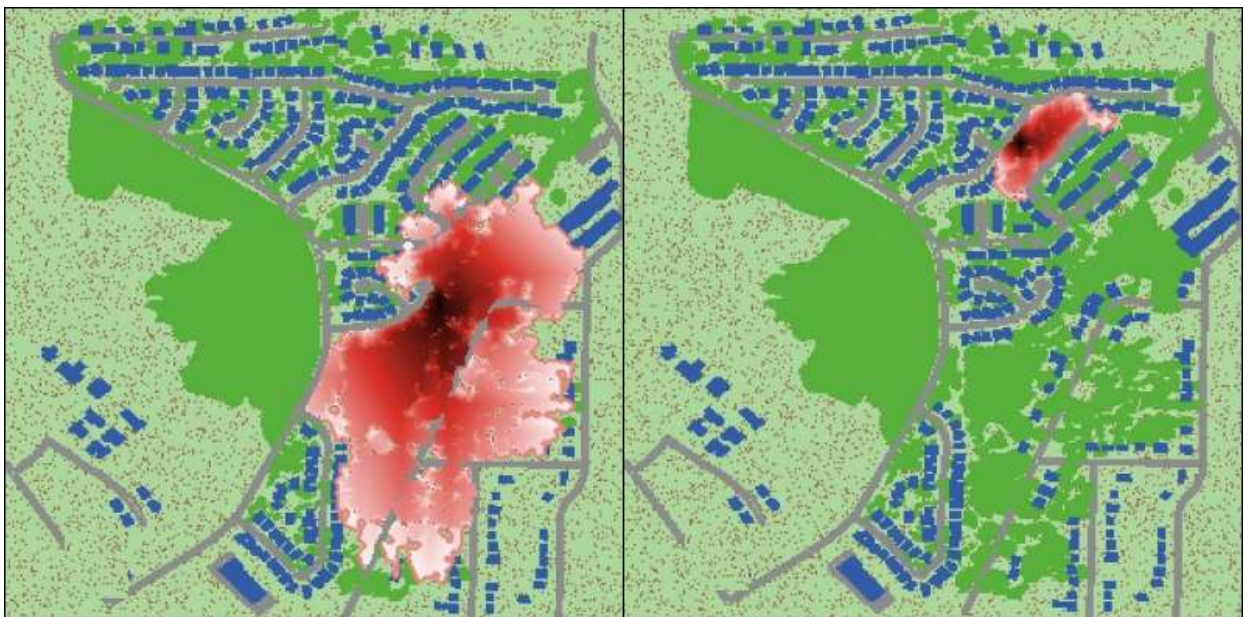


Рисунок 3.3 - Пример работы агентной имитационной модели распространения пожара в населенном пункте

В современной литературе предлагается несколько подходов к решению задачи прогнозирования процесса распространения природного пожара, находящегося под внешним воздействием противодействующих сил.

Первый подход – это метод расчета необходимых противодействующих сил на основе упрощенной модели динамики процесса, разработанный G.M. Parks и M. Parlar [144,145].

Второй – это определение траекторий движения противодействующих сил для локализации процесса путем построения непреодолимого для процесса препятствия. Данный подход используется в работах F. Albinì [16, 17], Г.Н. Коровина [18], Е.Н. Горовой [19], Г.А. Доррера и С.В. Ушанова [21].

Также можно выделить третий подход, основанный на агентном представлении ситуации (см. параграф 3.1.4). Примером здесь может служить проект «Bushfire» [146], разработанный M. Albers, H. Boros, R. Burema, а также работы X. Hu и Y. Sun [147]. Рассмотрим данные работы более подробно.

«Bushfire» представляет собой программное средство, которое позволяет моделировать лесной пожар, а также последующее тушение огня агентами. Предусмотрено два типа агентов - бульдозеры и авиа средства. Среда моделирования представлена двумерными клеточными автоматами. Все ячейки в системе имеют определенный тип горючего (негорючего) материала. На рисунке 3.4 представлен пример работы данной программы. Запуск симуляции возможен как с агентами, так и без них. Текущее состояние симуляции можно сохранить и/или загрузить.

В работе X. Hu и Y. Sun представлен проект для моделирования тушения лесного пожара с использованием агентной модели. Среда моделирования здесь, как и в программе «Bushfire», представляет собой дискретное клеточное пространство. Противопожарные агенты могут быть задействованы в трех различных стратегиях тушения, а именно: прямая атака, параллельная атака и косвенная атака. В статье предоставлены примеры работы модели в различных сценариях пожаротушения (рисунок 3.5).

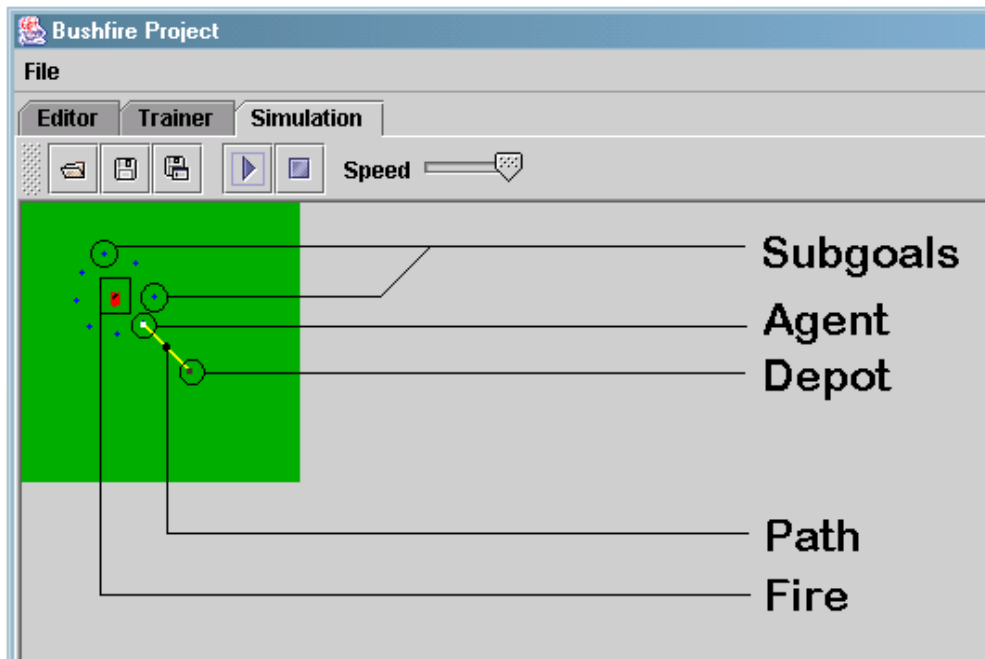


Рисунок 3.4 – Пример работы программы «Bushfire»

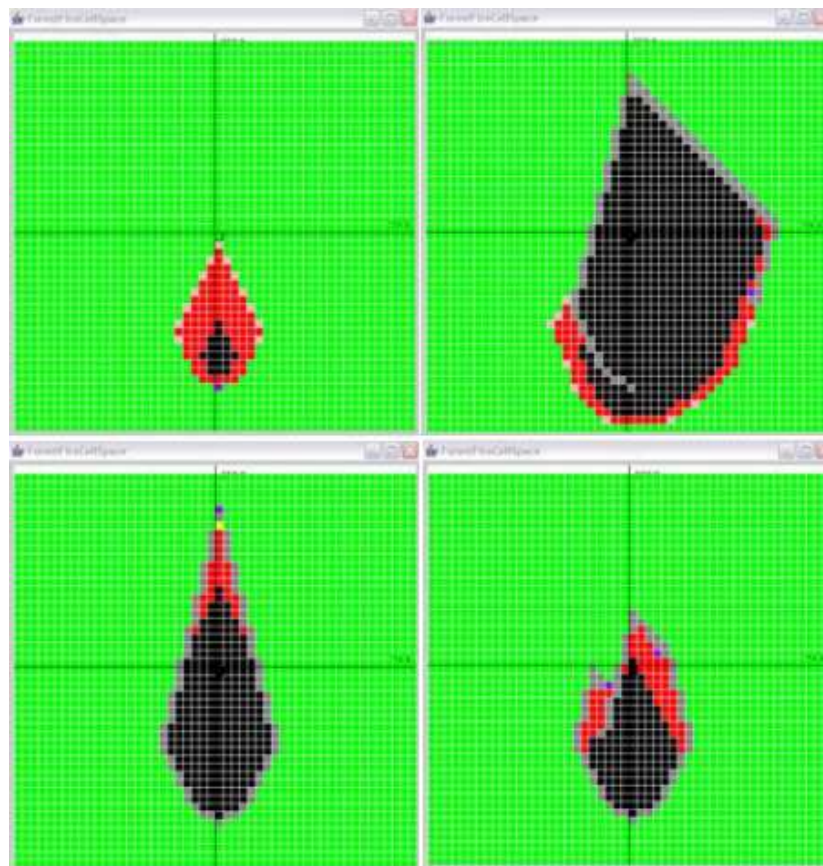


Рисунок 3.5 – Пример работы агентной модели, разработанной Х. Ну и Y. Sun в различных сценариях использования

В качестве основных недостатков рассмотренных двух систем можно выделить использование в качестве среды моделирования дискретное клеточное

пространство. Данная особенность исключает возможность использования ГИС-данных и карт реальной местности для моделирования, а также возможность интеграции данной системы с существующими системами дистанционного мониторинга.

1.2 Разработка имитационной агентно-ориентированной системы моделирования динамики и локализации природных пожаров

1.2.1 Формирование требований и ограничений системы

В предыдущем параграфе было представлено большое количество различных моделей для расчета динамики природных пожаров. Сформулируем теперь область применения разрабатываемой имитационной системы, требования, которые к ней предъявляются, а также ограничения, принятые при разработке.

Во-первых, данную систему предполагается использовать для оперативного определения параметров распространения стихийных распространяющихся динамических процессов (природных пожаров), а также разработки комплекса мер по его предотвращению и противодействию. Из этого следует, что разрабатываемая система должна обладать значительным быстродействием, т.е. время процесса расчета должно быть существенно ниже реального процесса. Одновременно с этим, система должна обладать точностью достаточной для выработки не только качественных, но и количественных оценок различных параметров моделируемого процесса. Результаты, получаемые в процессе моделирования должны быть предсказуемы и удовлетворять нормативным документам, принятым в РФ. Данные издания составлены на основе многолетних наблюдений и экспериментальных данных. В них обобщены принципы организации борьбы с лесными пожарами с использованием наземных и авиационных средств. В качестве нормативных документов в настоящем исследовании были приняты следующие издания:

1. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. Приказ МПР № 100 от 30.06.95 г. [148];

2. «Справочник по тушению природных пожаров» [149];
3. «Тушение лесных пожаров» - пособие для лесных пожарных [150].

Приведем основные требования, предъявляемые к разрабатываемой имитационной агентно-ориентированной системе. Система должна:

1. позволять моделировать динамику распространения природного пожара и формировать пространственное представление пожара в проекции на горизонтальную плоскость (при этом скорость расчета должна значительно превышать реальный процесс);

2. отображать полученное представление пожара в виде контура горячей кромки на карте реальной местности необходимого масштаба;

3. рассчитывать различные характеристики и параметры конфигурации моделируемых пожаров в заданные промежутки времени;

4. предоставлять возможность воздействовать на пожары прямо в процессе моделирования различными способами, включающими в себя как искусственное воздействие на пожар со стороны противопожарных сил, так и естественное изменение параметров природной среды (скорость и направление ветра, влажность воздуха и др.);

5. должна быть реализована в виде самостоятельного программного обеспечения с возможностью интеграции или совместного использования с существующими системами дистанционного мониторинга.

Также при разработке системы был принят ряд ограничений:

1. система предназначена только для моделирования лесного низового пожара;

2. лесное растительное горючее считается однородным и расположенным непрерывно;

3. значения параметров среды моделирования, которых заданы перед началом имитации либо изменены в процессе, считаются одинаковыми в каждой точке на карте (например, скорость и направление ветра). Это упрощение снижает точность результатов моделирования, однако оно обусловлено требованиями по

быстродействию работы системы, а также отсутствием возможности создания необходимой информационной базы;

1.2.2 Описание используемых частных моделей

Модель расчета скорости распространения фронта

В качестве частной модели для расчета скорости распространения фронта была использована модель низовых лесных пожаров Р. Ротермела (см. параграф 3.1.2). Данная модель является стандартом в США и признана во многих странах мира. Методика Ротермела на основе достаточно простых формул дает возможность вычислить прогнозируемую скорость распространения фронта пожара в заданной точке. Результаты, полученные в данной модели, являются одномерными. Двухмерность и возможность отображения результатов на плоскости достигается за счет агентной модели (см. параграф 2.2) и разработанного алгоритма расчета конфигурации фронтов динамических процессов (см. параграф 2.3).

В оригинальном виде модель Ротермела использует следующие исходные параметры:

- ω_0 , кг/м² – запас РГМ на местности в абсолютно сухом состоянии;
- δ , м – глубина слоя РГМ;
- σ , м⁻¹ – удельная поверхность РГМ;
- h , ккал/кг – теплотворная способность сухого горючего;
- ρ_p , кг/м³ – плотность горючего материала в абсолютно сухом состоянии;
- M_f – влагосодержание РГМ;
- S_T – массовая доля всех минеральных веществ в РГМ;
- S_e – массовая доля эффективных минеральных веществ;
- U , м/сек – скорость ветра на середине высоты пламени;
- $\tan \varphi$ – тангенс угла наклона рельефа;
- M_x – минимальное значение влагосодержания РГМ, при достижении которого горение становится невозможным.

Такое большое количество специфических параметров крайне неудобно использовать на практике. Поэтому для реализации в имитационной системе была использована методика, представленная в [151].

В данной работе авторы выражают исходные параметры модели Ротермела через другие (доступные). В результате чего появляется возможность использовать новый «базис» переменных, который и был использован в данной работе в качестве параметров среды моделирования:

- тип растительности;
- класс пожарной опасности по условиям погоды, от 1 до 5 (задается исходя из лесопожарного показателя засухи В.Г. Нестерова или ПВ-1 [152]);
- скорость и направление ветра (по данным ближайшей метеостанции);
- величина и направление уклона местности (вычисляется с помощью использования специальных он-лайн сервисов, например Google Elevation API).

Для возможности использования такого подхода, наиболее распространенные в регионе типы растительности должны быть заранее классифицированы, а из справочников или экспериментальным путем определены их характеристики, которые необходимы для расчёта по модели Ротермела. Классификация типов растительности и определение их характеристик – это очень трудозатратная процедура, необходимость проведения которой в значительной мере затрудняет разработку программных средств. Однако в последние годы в РФ такая работа ведется профильными специалистами [153,154], что позволяет создавать специальные базы данных с характеристиками различных РГМ. Такая база данных была разработана в рамках данной диссертационной работы [155].

Приведем примеры типов растительности, включенных в данную БД:

1. лишайники, сосновый лес редкий, деревья молодые и средневозрастные;
2. зеленые мхи, еловый лес густой, деревья спелые и перестойные;
3. опад хвои, еловый лес редкий, деревья молодые и средневозрастные;
4. кустарники, лиственный лес густой, деревья спелые и перестойные;

5. отходы лесозаготовок, сосновый лес густой, деревья спелые и перестойные;

6. минерализованная полоса, поляна без растительности;

7. водная преграда (река, озеро и т.п.).

В таблице 3.1 представлен перечень исходных данных модели Ротермела для представленных типов растительности.

Таблица 3.1 Перечень исходных данных модели Ротермела для некоторых типов растительности

№	ω_0 , кг/м ²	σ , м ⁻¹	h , ккал/кг	ρ_p , кг/м ³	δ , м	M_x	S_T	Z_d , м	f , кг/м ³
1	1,7	2000	4300	300	0,12	0,3	0,02	15	0,07
2	1,0	2500	4700	300	0,10	0,5	0,02	15	0,24
3	0,3	6000	4500	512	0,10	0,3	0,02	10	0,09
4	0,225	6560	4400	512	0,60	0,2	0,02	20	0,08
5	0,9	4920	4400	512	0,70	0,2	0,02	20	0,08
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Для типа №6 в таблице указаны нулевые значения характеристик РГМ, что соответствует отсутствию горючих веществ.

Таким образом, для формирования среды, на необходимый участок карты реальной местности наносятся слои, содержащие информацию об усредненных характеристиках растительных горючих материалов на данной местности (или об ее отсутствии), о населенных пунктах, реках, озерах, дорогах, оврагах и др. Такие слои наносятся в виде полигонов, которые могут пересекаться друг с другом. В таком случае будут использоваться усредненные характеристики слоев.

На рисунке 3.6 представлен пример использования такого подхода в разработанной имитационной агентно-ориентированной системе, которая будет рассмотрена в следующем параграфе. Оранжевым полупрозрачным цветом на карте изображены полигоны, информация о которых содержится в БД. Каждый полигон характеризуется необходимым набором свойств. Таким образом, любой

агент на каждой итерации в процессе моделирования может получить информацию о типе поверхности, на которой он находится.

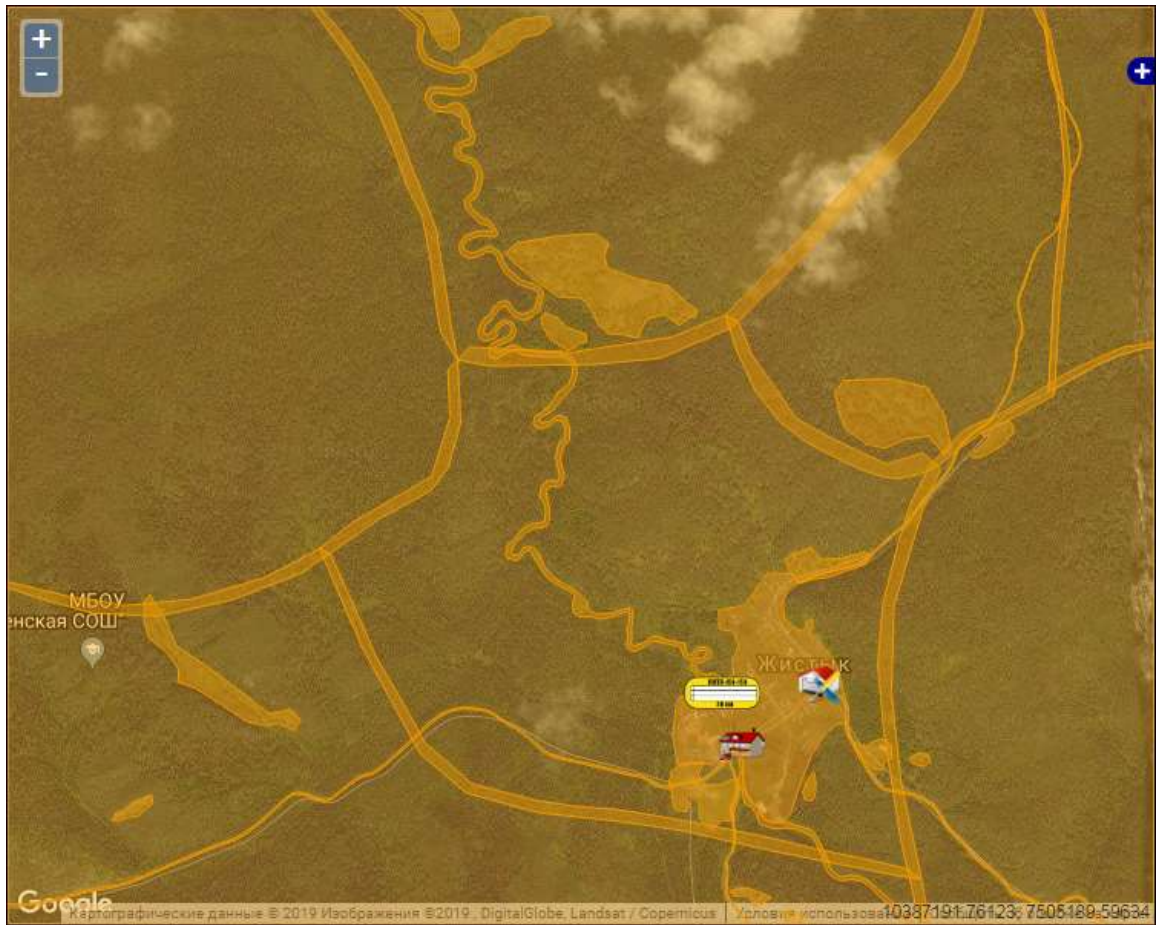


Рисунок 3.6 – Пример карты реальной местности с нанесенными полигонами типов растительности, населенных пунктов, рек, озер, дорог, оврагов и др.

Модель расчета интенсивности горения

Интенсивность выделения энергии является одной из основных характеристик *A*-агентов, с помощью которой осуществляется взаимодействие с агентами *B* (см. параграф 2.2). При моделировании природных пожаров в качестве показателя *I* примем интенсивность горения кромки.

Согласно [125], интенсивность *I* рассчитывается по формуле

$$I = Q \cdot v_i \cdot \rho_{be}, \quad (3.2)$$

где v_i – значение скорости распространения пламени, м/мин; ρ_{be} – эффективная плотность горючего, кг/м³; Q – теплота воспламенения (количество тепла,

необходимое для доведения единицы веса горючего материала до воспламенения), Дж/кг.

Т.к. в разрабатываемой системе информация о типах растительного горючего задается в виде плоских полигонов, то для расчета интенсивности горения была использована эмпирическая формула, в которой в качестве Q используется поверхностная теплота сгорания слоя $Q_{сл}$, МДж/м². Значения $Q_{сл}$ для различных типов растительности и показателей засухи и сама формула расчета приведены в [156].

Модель расчета задымленности

В зависимости от физической природы моделируемого процесса может появляться необходимость в расчете дополнительных параметров, которые не были указаны в качестве характеристик A -агентов при описании модели (см. параграф 2.2.1).

Задымление является одним из важнейших факторов, который увеличивает ущерб от лесного пожара, а также затрудняет борьбу с ним. В настоящее время существует ряд работ, которые посвящены моделированию дымового шлейфа [157, 158]. Однако реализация данных моделей требует высоких вычислительных затрат, а сами модели являются избыточными для данного исследования. Таким образом, была выбрана концепция локального пламени, представленная в [14]. Согласно данной концепции, несколько огрубляя физическую картину распространения дымового облака, принимается, что каждое локальное пламя (в нашем случае каждый агент типа A) порождает локальный дымовой поток, конфигурацию которого в приземном слое можно определить следующим образом:

$$\lambda_s(x, y, t, \varphi_\omega) = v_{s0}(x, y, \omega) \cdot (t - t_0) \cdot \chi_s(\omega, \varphi_\omega - \varphi), \quad (3.3)$$

где (x, y) – координаты точки в области активного горения; φ_ω – направление ветра, рад; φ – текущий угол, рад, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$; t – текущее время, с, $t_0 \leq t \leq t_0 + r$; t_0 – время воспламенения горючего в точке (x, y) , с; r – продолжительность горения горючего в точке (x, y) ; $\chi_s(\omega, \varphi_\omega - \varphi)$ – индикатриса локального дымового потока,

определяющая его форму; v_{s0} – горизонтальная скорость распространения дымового облака в приземном слое.

Согласно [157], v_{s0} вычисляется с помощью выражения:

$$v_{s0} = 0,28 + 0,607w - 0,0217w^2, \quad (3.4)$$

где w – скорость ветра над пологом леса, м/с.

Т.к. в предлагаемой модели на каждом шаге моделирования A -агенты перемещаются в новую точку пространства, то t всегда будет равна времени, эквивалентному одному шагу моделирования.

Сам уровень задымления M непосредственно около агента A принят в виде безразмерной величины, зависящей от интенсивности горения I , и может принимать значение от 0 (при $I = 0$) до 1 (при $I \rightarrow \max$).

1.2.3 Реализация программного средства

Для реализации агентной модели в виде имитационной системы необходимо определиться с выбором необходимых для этого инструментов. Следует сразу отметить, что в сформулированном списке требований к системе есть пункты о разработке системы в виде самостоятельного программного обеспечения с возможностью использования данных ГИС, отображения результатов расчета на карте реальной местности, а также возможности интеграции или совместного использования с существующими системами дистанционного мониторинга. Данные требования накладывают серьезное ограничение в выборе инструментов для разработки, учитывая которые, использование специальных сред разработки, таких как NetLogo или Anylogic, (см. параграф 2.1.2) считаем нецелесообразным. Это связано, прежде всего, с тем, что такие системы ограничивают разработчиков в выборе средств визуализации и интеграции с другими системами. Что в нашем случае недопустимо. Использование подключаемых программных библиотек (таких как JADE), позволило бы избавиться от данных ограничений. Однако агентные платформы, использующие такое решение, как правило, изначально ориентированы скорее на реализацию MAC делиберативной архитектуры с

небольшим количеством когнитивных агентов (см. параграф 1.2), Такие платформы излишне тяжеловесны для рассматриваемой нами задачи.

Таким образом, в связи с особенностями рассматриваемой задачи, в качестве используемых инструментов и технологий было принято решение использовать универсальные языки программирования.

В результате проведенной работы был разработан программный комплекс «Тайга-3» [159,160] (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и базы данных приведены в приложении Б). Данный комплекс реализован в виде сетевой имитационной агентно-ориентированной системы, в которой реализована как сама рассмотренная ранее агентная модель с использованием ряда частных моделей, так и средства визуализации и расчета параметров моделируемых пожаров, интерфейсы работы с пользователями, инструменты хранения и обработки информации.

«Тайга-3» имеет клиент-серверную архитектуру и web-интерфейс для работы пользователя. Серверная часть обеспечивает доступ к базе данных, хранящей информацию о среде моделирования (полигоны растительного горючего, рек, дорог и т.д.). Также данная база хранит информацию о действующих агентах в системе и обеспечивает их исполнение и взаимодействие. В качестве web-сервера был использован сервер LAMP (Linux+Apache+MySQL+PHP).

Клиентская часть системы реализована с использованием технологии адаптивной верстки, чтобы обеспечить удобство и корректность работы системы на любых устройствах. Агенты различных типов реализованы в виде отдельных подключаемых модулей, написанных на JavaScript, совместно с технологией Ajax и jQuery. Таким образом, выполнение агентов происходит на клиентской машине, что позволяет разгрузить сервер. Для отображения на карте информации, полученной от агентов, используется библиотека OpenLayers. Данная библиотека позволяет создать web-интерфейс для отображения картографических материалов, представленных в различных форматах и расположенных на различных серверах. Благодаря OpenLayers имеется возможность создать собственную карту, включающую слои, предоставляемые WMS (и WFS)

серверами, а также данными картографических сервисов Google, OpenStreetMap, Yandex и др.

На рисунке 3.7 представлен интерфейс пользователя в системе «Тайга-3». В правой части интерфейса системы расположено меню локализации. Данное меню состоит из кнопок, переключателей и текстовых полей. Оно предназначено для добавления новых *B*- и *D*-агентов, а также для управления их деятельностью. В левой части интерфейса расположена карта реальной местности, на которой визуализируется процесс работы модели. В данном примере в качестве подложки карты использовались спутниковые снимки картографического сервиса Google. В верхней части интерфейса представлена информационная панель, на которую выводится текущая информация о моделируемых пожарах, погодных условиях, а также полезные сообщения.

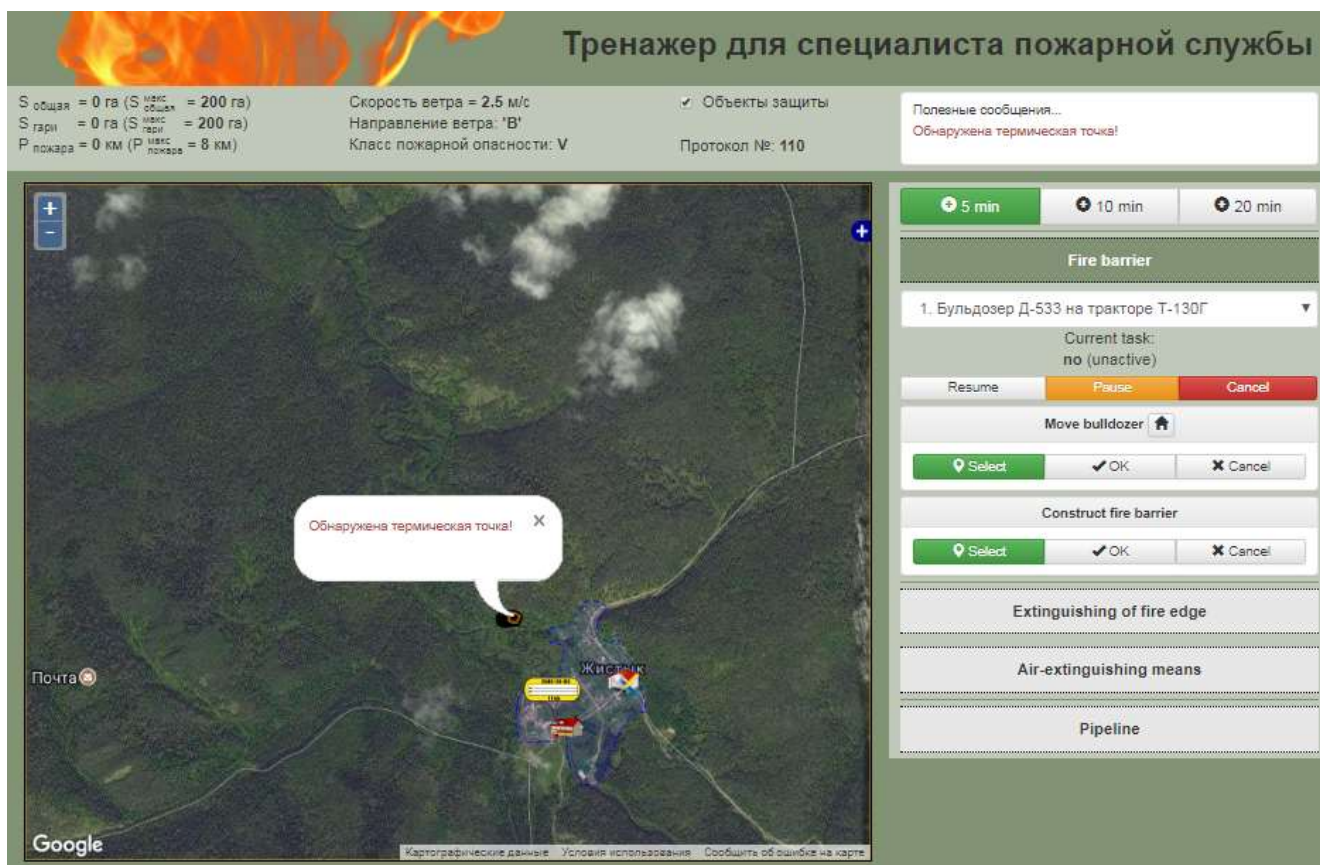


Рисунок 3.7 - Пользовательский интерфейс системы «Тайга-3»

Справа над панелью локализации размещены три кнопки (+5 мин, +10 мин, +20 мин), с помощью которых пользователю предоставляется возможность

управлять скоростью процесса моделирования. При нажатии на одну из этих кнопок происходит расчет следующего состояния модели на одну (+5 мин), две (+10 мин) или четыре итерации (+20 мин). Скорость процесса расчета зависит от большого числа факторов. Выделим наиболее значимые из них:

- количество используемых агентов;
- размер области моделирования;
- вычислительная мощность клиентской машины.

Рассмотрим процесс работы модели более подробно на конкретных примерах. Разберем особенности работы *A*-агентов, т.е. непосредственно модель самого пожара. В качестве примера рассмотрим рисунок 3.8. На данном рисунке отображены *A*-агенты, объединенные в единый контур. Каждый агент отображается с помощью иконки в виде огонька. Размер этой иконки пропорционален интенсивности горения агента I и значению скорости движения v . Также хотелось бы отметить, что за счет использования библиотеки OpenLayers существует возможность различные элементы и эффекты на карте выводить на разные слои, которые впоследствии можно скрывать, чтобы не перегружать карту.

На рисунке 3.8 слева приведен пример расчета пожара с отображенным слоем задымления, справа слой дыма был скрыт.

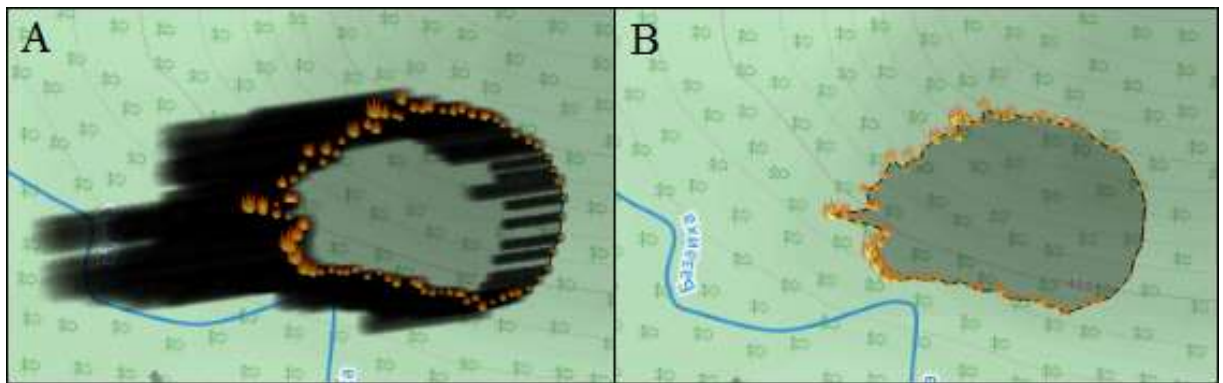


Рисунок 3.8 - Пример расчета контура пожара: **А** – слой дыма отображен, **В** – слой дыма скрыт

На рисунке 3.9 приведен пример работы системы с использованием агентов *A*, *B* и *D* (бульдозер). В качестве подложки используется карта сервиса OpenStreetMap.

На рисунке 3.10 приведен пример работы системы с использованием агентов *A* и *D* (самолет). В качестве подложки используется карта сервиса Google Hybrid.

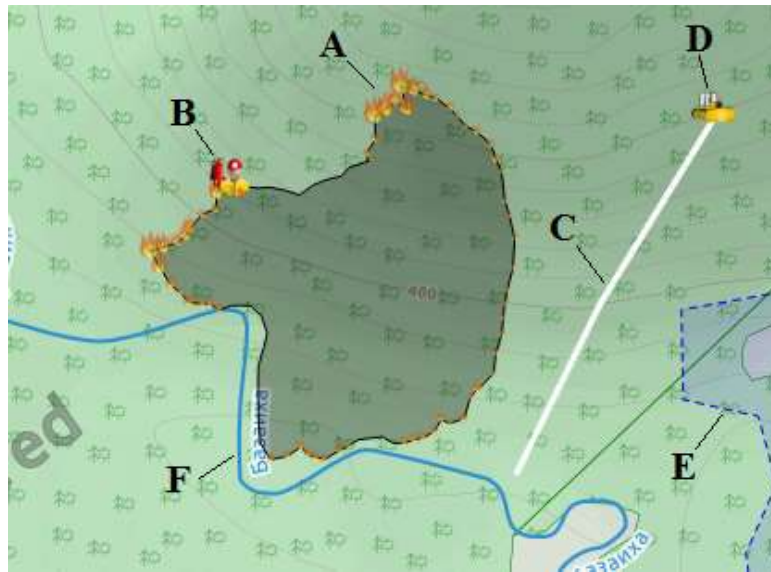


Рисунок 3.9 - Пример работы системы «Тайга-3»: *A* – кромка пожара (агенты типа-*A*), *B* – противопожарная бригада (агент типа-*B*), *C* – противопожарный барьер, *D* – бульдозер (агент типа-*D*), *E* – населенный пункт (объект защиты), *F* – река (естественное препятствие)



Рисунок 3.10 - Пример работы системы «Тайга-3»: *A* – кромка пожара (агенты типа-*A*), *C* – полоса с повышенным уровнем влажности (сброс воды с самолета), *D* – самолет (агент типа-*D*), *E* – населенный пункт (объект защиты)

Более подробно особенности реализации данной системы, а также примеры ее использования приведены в работах 161,162.

1.3 Проверка адекватности модели в системе «Тайга-3»

1.3.1 Постановка задачи

Проверка адекватности модели – это задача, с которой сталкивается любой исследователь в области моделирования. Под адекватностью модели, как правило, подразумевают степень ее соответствия реальному объекту. Однако часто возникает ситуация, когда получение необходимых данных для такой проверки сопряжено с немалыми временными, финансовыми и другими затратами. Либо может быть ситуация, когда реального объекта, для которого строится модель, вообще не существует. Кроме того, создаваемая модель часто ориентирована на исследование лишь определенного подмножества свойств некоторого объекта. Поэтому под адекватностью модели можно подразумевать степень соответствия ее не столько реальному объекту, сколько целям и задачам исследования [163].

Данное утверждение применимо и к модели, разработанной в рамках настоящего исследования. Каждый природный пожар – однократное и уникальное событие. Динамика его развития зависит от большого числа трудно формализуемых и случайных факторов. Таким образом, не имеет особого смысла добиваться от модели высокой точности прогноза параметров для одного конкретного пожара при определенных условиях, т.к. при использовании в других условиях для другого пожара такая модель может оказаться неадекватной. Поэтому в параграфе 3.2.1 автором и было сформулировано требование, согласно которому выходные данные модели должны соответствовать справочникам и руководствам по борьбе с природными пожарами, принятыми в РФ в качестве нормативных. Таким образом, для оценки адекватности и точности модели в данной работе предлагается использовать среднестатистические данные о приростах площадей пожаров при различных природных и погодных условиях, представленные в «Указаниях по обнаружению и тушению лесных пожаров» (Приказ МПР № 100 от 30.06.95 г) Федеральной службы лесного хозяйства России [148]. Указанные данные представлены в таблице 3.2 и приняты в данной работе в качестве фактических.

Автором был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого были приняты следующие ограничения:

- комплекс природных и погодных данных ограничен содержащимися в таблицах «Указаний» данными;
- производилось моделирование свободно распространяющихся низовых лесных пожаров, т.е. использовались только *A*-агенты;
- в качестве исследуемого параметра пожара использовалась величина площади, пройденной огнем. Полученные значения площади пожара в определенные моменты времени сравнивались с фактическими значениями из таблицы 3.2.

Таблица 3.2 Фактические площади (га) лесных пожаров при разной продолжительности их действия и различных среднесуточных скоростях распространения огня по фронту

Скорость распространения фронта пожара, м/мин	Время с момента возникновения пожара, ч									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,0	2,5	10,0	22,0	40,0	62,0	90,0	120,0	160,0	200,0	250,0
2,5	1,8	7,0	16,0	28,0	42,0	63,0	86,0	112,0	142,0	175,0
2,0	1,2	4,7	11,0	20,0	30,0	43,0	58,0	76,0	95,0	118,0
1,5	0,7	2,9	6,6	12,0	18,0	26,0	36,0	47,0	60,0	73,0
1,0	0,4	1,5	3,4	6,0	10,0	14,0	19,0	24,0	31,0	38,0
0,5	0,1	0,6	1,8	2,4	3,7	5,3	7,3	9,5	12,0	14,8
0,25	0,07	0,3	0,6	1,1	1,7	2,4	3,3	4,3	5,4	6,7

Для каждого значения скорости распространения фронта пожара из таблицы 3.2 было смоделировано по 5 низовых лесных пожаров, время распространения которых продолжалось 10 часов. Таким образом, общее количество смоделированных пожаров – 35. Моделирование каждого пожара проводилось при различных параметрах ветра, а также различных вариантах растительного горючего. Пример моделирования одного пожара при разной продолжительности действия приведен на рисунке 3.11.

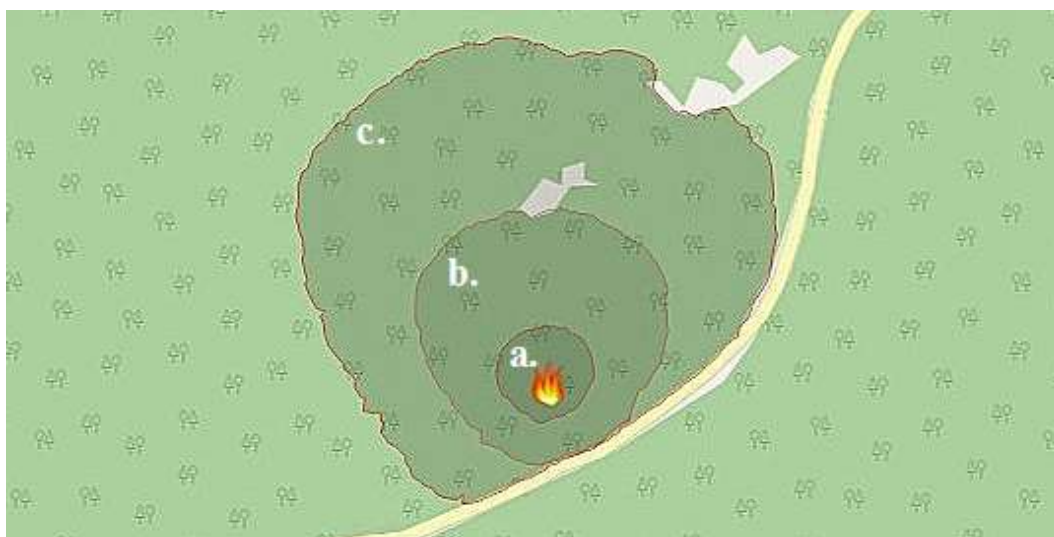


Рисунок 3.11 – Пример моделирования пожара (скорость распространения фронта – 2 м/мин, ветер под пологом леса – ю/з 0.7 м/с); а). время распространения – 2 ч, площадь – 4,7 га; б). время распространения – 5 ч, площадь – 35 га; с). время распространения – 9 ч, площадь – 110 га;

В результате проведенного эксперимента были получены данные, представленные в таблице 3.3. В качестве значений площадей в таблице принято среднее арифметическое 5 пожаров, которые были смоделированы при равном значении скорости распространения фронта. В таблице значения округлены до сотых долей.

Таблица 3.3 - Площади (га) лесных пожаров при разной продолжительности их действия и различных среднесуточных скоростях распространения огня по фронту, полученные в результате моделирования

$v_{\text{фр}}$, м/мин	Время с момента возникновения пожара, ч									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,0	2,59	9,81	22,34	39,92	62,38	90,27	122,4	157,26	198,43	242,14
2,5	1,70	6,56	15,39	27,66	43,2	63,17	85,45	112,52	141,2	173,25
2,0	1,13	4,7	10,99	20,16	31,35	44,49	60,25	78,03	96,97	119,18
1,5	0,67	2,73	6,56	12,02	18,95	27,19	36,64	47,54	59,46	72,95
1,0	0,4	1,55	3,51	6,24	9,41	13,36	17,98	23,26	29,34	36,61
0,5	0,1	0,56	1,45	2,68	4,12	5,78	7,63	9,72	12,1	14,77
0,25	0,08	0,36	0,73	1,21	1,8	2,49	3,3	4,23	5,28	6,42

Из таблицы 3.2 и 3.3 были сформированы две выборочные совокупности. Данные совокупности являются связанными и представлены в таблице 3.4. В данной таблице в столбце $S_{факт}$ приведены фактические значения, в столбце $S_{мод}$ – полученные в результате моделирования, i – номер эксперимента.

Таблица 3.4 – Выборочная совокупность площадей (га) смоделированных и фактических лесных пожаров

i	$S_{факт}$	$S_{мод}$	i	$S_{факт}$	$S_{мод}$	i	$S_{факт}$	$S_{мод}$
1	0,07	0,084	25	6	6,244	49	38	36,605
2	0,1	0,104	26	6,6	6,556	50	40	39,922
3	0,3	0,361	27	6,7	6,420	51	42	43,197
4	0,4	0,398	28	7	6,564	52	43	44,488
5	0,6	0,729	29	7,3	7,629	53	47	47,543
6	0,6	0,561	30	9,5	9,721	54	58	60,251
7	0,7	0,667	31	10	9,414	55	60	59,457
8	1,1	1,211	32	10	9,809	56	62	62,378
9	1,2	1,127	33	11	10,985	57	63	63,174
10	1,5	1,551	34	12	12,103	58	73	72,954
11	1,7	1,797	35	12	12,017	59	76	78,033
12	1,8	1,453	36	14	13,36	60	86	85,453
13	1,8	1,699	37	14,8	14,772	61	90	90,274
14	2,4	2,492	38	16	15,390	62	95	96,965
15	2,4	2,680	39	18	18,945	63	112	112,516
16	2,5	2,586	40	19	17,979	64	118	119,182
17	2,9	2,728	41	20	20,105	65	120	122,399
18	3,3	3,302	42	22	22,342	66	142	141,197
19	3,4	3,513	43	24	23,257	67	160	157,257
20	3,7	4,116	44	26	27,184	68	175	173,246
21	4,3	4,232	45	28	27,662	69	200	198,427
22	4,7	4,701	46	30	31,349	70	250	242,137
23	5,3	5,778	47	31	29,338			
24	5,4	5,279	48	36	36,642			

1.3.2 Проверка адекватности модели статистическими критериями

Перед проверкой адекватности модели с помощью формальных статистических критериев, рассчитали различные показатели ошибок, т.е. расхождений между фактическими значениями площадей и значениями, полученными в результате моделирования. Для расчета были использованы данные из таблицы 3.4.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |S_{факт} - S_{мод}| = 0,6673 \text{ га}$$

Средняя абсолютная ошибка (*MAE*) имеет ту же размерность, что и прогнозируемый показатель, зависит от масштаба измерения уровней временного ряда. Получили среднюю ошибку, равную 0,6673 га, что является хорошим показателем при прогнозировании крупного пожара (более 25 га), однако для мелких пожаров (до 2 га) данная ошибка довольно велика. Таким образом, для оценки точности модели распространения пожара использовать ошибку *MAE* не совсем корректно, т.к. существует большой разброс фактических значений (от 0,01 га до 250 га и более).

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|S_{факт} - S_{мод}|}{S_{факт}} * 100\% = 4,085 \%$$

Расчет средней относительной ошибки (*MAPE*) полезен в том случае, когда размер или значение прогнозируемой величины важны в оценке точности прогноза. *MAPE* подчеркивает, насколько велики ошибки прогноза в сравнении с действительными значениями ряда. Данный метод в особенности хорош тогда, когда фактические значения ряда велики. Если же фактические значения временного ряда близки к 0, то в знаменателе окажется очень маленькое число, что сделает значение *MAPE* близким к бесконечности. Например, фактическая площадь пожара $S_{факт} = 0,1$ га, а прогнозная $S_{мод} = 1$ га, тогда $MAPE = 100\% * (0,1 - 1)/0,1 = 900\%$, хотя в действительности мы ошиблись, всего на 0,9 га, что для крупных пожаров не является критичным. Таким образом, ошибку *MAPE*

рекомендуется использовать для пожаров, площадь которых превышает 1 га. Для пожаров, площадь которых не превышает 1 га, лучше использовать ошибку *MAE*.

Полученная относительная ошибка позволяет оценить точность реализованной модели, как высокую, т.к. значение средней относительной ошибки менее 10%. Т.е. площади моделируемых пожаров практически не отличаются от статистических данных.

$$MPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(S_{факт} - S_{мод})}{S_{факт}} \cdot 100\% = -1,011\%$$

Средняя процентная ошибка (*MPE*) используется для оценки смещения прогноза моделируемой величины. Данная оценка показывает, является ли прогноз переоценивающим или недооценивающим. Т.к. $-1,011\% < 0$, то прогноз считается переоценивающим, т.е. характерно систематическое завышение прогнозируемого показателя по сравнению с фактическими значениями. Однако на практике считается допустимым значение *MPE*, не превышающее 5% по модулю, следовательно, ошибка равная $-1,011\%$ считается вполне допустимой.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_{факт} - S_{мод})^2 = 1,6327$$

При расчете среднеквадратичной ошибки (*MSE*) каждое значение отклонения возводится в квадрат. Этот метод подчеркивает большие ошибки прогноза. В нашем случае сильно выделяется ошибка моделируемого значения при скорости движения фронта 3 м/мин и продолжительности распространения 10 часов. Значение этой ошибки 61.8233093, что сильно увеличивает значение средней квадратичной ошибки для всей выборки. Тем не менее, $MSE = 1,6327$ в целом можно считать приемлемой.

Оценка адекватности реализованной в системе модели была выполнена с использованием формальных статистических критериев. Как правило, адекватность модели обосновывается с помощью сравнения характеристик центральной тенденции (Критерий Стьюдента [164]) и сравнения характеристик рассеяния (Критерий Фишера [165]). Одним из основных условий корректного применения критериев Стьюдента и Фишера состоит в том, что анализируемые

выборки должны происходить из нормально распределенных генеральных совокупностей. В противном же случае, необходимо воспользоваться непараметрическими аналогами данных критериев.

Оценку нормальности выборки начали с построения гистограммы распределения $S_{факт}$, которая приведена на рисунке 3.12. Границы группирования на гистограмме округлены до целых значений. Анализируя полученную гистограмму можно сказать, что большинство площадей пожаров в выборке имеет значение менее 25 га. После 25 га площади пожаров распределены практически равномерно. Вид полученной гистограммы позволяет утверждать, что закон распределения, которому принадлежит выборка $S_{факт}$ значительно отличается от нормального закона.



Рисунок 3.12 - Гистограмма распределения фактических значений площадей лесных пожаров (выборка $S_{факт}$)

Т.к. предположение о нормальности распределения исследуемых выборок не оправдалось, то для проверки адекватности модели воспользовались непараметрическими аналогами критериев Стьюдента и Фишера, которые не используют информацию о виде функции распределения случайной величины. Данные критерии основаны на оперировании только частотами или рангами и являются менее мощными, чем параметрические.

Критерий Вилкоксона для связанных выборок (Wilcoxon signed-rank test)

Сравнение зависимых выборок с помощью критерия Вилкоксона [166] осуществляется сходно с тем, как это делается при помощи парного критерия Стьюдента.

Сформулировали нулевую гипотезу H_0 и альтернативную гипотезу H_1 :

H_0 : медиана разницы фактических и смоделированных значений в выборках равна нулю;

H_1 : медиана разницы фактических и смоделированных значений в выборках не равна нулю.

Для того чтобы проверить нулевую гипотезу, рассчитали тестовую статистику W данного критерия. Произвели вычисление разностей для каждой пары результатов. Затем проранжировали положительные и отрицательные разности (кроме нулевых), чтобы наименьшая абсолютная величина (без учета знака) получила первый ранг. Отдельно вычислили сумму рангов положительных и отрицательных разностей, меньшую из двух сумм без учета знака назвали R и приняли за статистику W данного критерия.

Сумма отрицательных рангов равна 1150, положительных рангов – 1335. Таким образом, $R = 1150$.

Если число ненулевых разностей больше 20, то статистика W приближается к стандартному нормальному распределению, т.е. необходимо рассчитать нормированную и центрированную статистику Вилкоксона [167]:

$$\tilde{T} = \frac{R - \frac{N(N+1)}{4}}{\sqrt{\frac{N(N+1)(2N+1)}{24}}} = \frac{1242,5}{\sqrt{29198,75}} = 0,54132689$$

\tilde{T} асимптотически имеет стандартное нормальное распределение. Нулевая гипотеза (против альтернативы H_1) отвергается, если $\tilde{T} \geq \Phi_{1-\alpha/2}$, где $\Phi_{1-\alpha}$ есть $(1-\alpha)$ – квантиль стандартного нормального распределения. При $\alpha = 0,05$ значение квантиля $\Phi = 1,959964$.

Т.к. $0,54132689 < 1,959964$, то отвергнуть нулевую гипотезу нет оснований и можно сказать, что между фактическими площадями пожаров и площадями пожаров, вычисленными по модели **нет** статистической разницы.

Однако отсутствие статистической разницы между средними значениями выборок еще не гарантирует полного их сходства. Поэтому следующий этап в попытке различить выборки - сравнение степени рассеяния значений в них, то есть определение дисперсии и связанного с ней среднеквадратичного отклонения результатов от среднего. Одним из непараметрических критериев сравнения дисперсий является ранговый критерий Сиджела-Тьюки (непараметрический аналог критерия Фишера). Применение данного критерия накладывает ряд ограничений:

1) должно соблюдаться равенство медиан сравниваемых генеральных совокупностей, что должно быть предварительно подвергнуто проверке на основании критерия знаков;

2) объем каждой выборки должен быть не меньше десяти: $n_i \geq 10$.

Таким образом, чтобы воспользоваться критерием Сиджела-Тьюки, сравнили медианы двух выборочных совокупностей [168, 169].

Применение непараметрического критерия знаков (sign test)

Сформулировали нулевую гипотезу H_0 и альтернативную гипотезу H_1 :

H_0 : медианы выборок фактических и смоделированных значений равны между собой;

H_1 : медианы выборок фактических и смоделированных значений не равны между собой.

Для проверки нулевой гипотезы значения двух выборок сравнили между собой, и подсчитали количество сдвигов: положительных, отрицательных и нулевых. Количество положительных сдвигов равно 38, количество отрицательных сдвигов – 32, нулевых – 0. В данном случае типичными являются положительные сдвиги, нетипичными - отрицательные. Подсчитали вероятность появления нетипичных сдвигов $P_n(k)$:

$$P_n(k) = \frac{1}{2^n} * \frac{n!}{k!(n-k)!} = 0,07372472,$$

где n – количество ненулевых сдвигов, k – количество нетипичных сдвигов.

Нулевая гипотеза о равенстве медиан не отвергается при выполнении неравенства $P_n(k) \geq 0,05$ (вероятность нетипичного сдвига велика). Альтернативная гипотеза о наличии достоверного сдвига считается верной, если $P_n(k) \leq 0,01$ (вероятность нетипичного сдвига мала). При выполнении неравенства $0,01 < P_n(k) < 0,05$ решение о нулевой гипотезе не принимается.

Т.к. $0,073 > 0,05$, то $P_n(k)$ попадает в область допустимых значений критерия, что не дает оснований для отвержения нулевой гипотезы. Таким образом, имеем право воспользоваться критерием Сиджела-Тьюки.

Непараметрический критерий Сиджела-Тьюки (Siegel-Tukey test)

Критерий Сиджела-Тьюки позволяет сравнить рассеяние показателей обеих выборок [170].

Сформулировали нулевую гипотезу H_0 и альтернативную гипотезу H_1 :

H_0 : показатели рассеяния выборок фактических и смоделированных значений равны между собой;

H_1 : показатели рассеяния выборок фактических и смоделированных значений не равны между собой.

Для того чтобы произвести проверку нулевой гипотезы, обе выборки объединили в единый вариационный ряд, отметив принадлежность каждого члена ряда той или иной выборке. Затем произвели ранжирование членов полученного ряда. Присвоили ранг R , равный 1, первому, минимальному члену ряда, ранг 2 — последнему, максимальному. Ранг 3 присваивают максимальному из оставшихся членов ряда, ранг 4 — минимальному из оставшихся и т.д. В случае если несколько членов ряда равны друг другу, им присваивали одинаковый ранг, равный их среднему арифметическому. Затем вычислили сумму рангов каждой выборки $R_1 = 4931$ и $R_2 = 4939$. За R_1 приняли меньшую сумму.

Рассчитали статистику критерия:

$$z = \frac{\left| R_1 - \frac{1}{2} n_1 (n_1 + n_2 + 1) \right| - \frac{1}{2}}{\sqrt{\frac{1}{12} n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}} = 0,0145865 ,$$

где n_1 – объем первой выборки, n_2 – объем второй выборки.

Сравнили полученное значение z с критическим значением квантиля нормального распределения $\Phi_{1-\alpha/2}$. Если $z \geq \Phi_{1-\alpha/2}$ принимается гипотеза о том, что дисперсии статистически различаются. При $\alpha = 0,05$ значение квантиля $\Phi = 1,959964$. Т.к. $0,0145865 < 1,959964$, то нулевую гипотезу о равенстве показателей рассеяния значений площадей фактических и смоделированных пожаров отвергнуть нет основания. А реализованную модель лесного низового пожара в имитационной агентно-ориентированной системе «Тайга-3» можно считать адекватной в принятых ограничениях. Результаты, представленные в параграфе, опубликованы в работах [171, 172].

1.4 Выводы по третьей главе

В данной главе представлена реализация разработанной агентной модели распространения и локализации динамических процессов в виде сетевой агентно-ориентированной имитационной системы. Разработка системы проводилась на примере конкретного типа процессов (природных пожаров) с использованием частных моделей для расчета скорости распространения фронта. Данная система позволяет моделировать развитие динамического процесса, находящегося под воздействием противодействующих сил, использует для работы данные ГИС и может быть использована совместно с существующими системами космического мониторинга. Систему предлагается использовать для оперативного определения параметров распространения стихийных распространяющихся динамических процессов, а также разработки комплекса мер по его предотвращению и противодействию.

Также было произведено исследование для оценки адекватности и точности реализованной в имитационной системе модели. Проверка была осуществлена статистическими методами на основе сравнения результатов вычислительных экспериментов с нормативными данными. По результатам проведенной проверки модель в разработанной имитационной агентно-ориентированной системе можно считать адекватной в принятых ограничениях.

Разработанная имитационная агентно-ориентированная система «Тайга-3» была внедрена в образовательный процесс ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» для оперативного прогнозирования динамики природных пожаров при изучении обучающимися факультета инженеров пожарной безопасности, дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров». Акт о внедрении представлен в приложении В.

Глава 4. Решение некоторых практических задач, возникающих при управлении динамическими процессами на поверхности Земли

Данная глава посвящена разработке алгоритмов, позволяющих решать практические задачи, возникающие при управлении стихийными динамическими процессами.

В начале главы предложен алгоритм для расчета оптимальных локализационных траекторий динамических процессов по критерию минимально затраченного времени. Данный алгоритм позволяет решать задачи, как по одностороннему, так и двустороннему охвату процесса на основе реальных картографических данных.

Затем представлена постановка оптимизационной задачи, а также предложен алгоритм схемы МИВЕР решения задач оптимального размещения агентов, противодействующих распространению стихийных природных динамических процессов (*B*-агентов), и их группировки (распределения) по локализуемым процессам. Алгоритм базируется на агентной модели, которая позволяет оценить последствия развития стихийного процесса, выполняя роль алгоритмически заданной целевой функции.

В конце главы представлен пример решения задачи оптимального размещения *B*-агентов с помощью предложенного алгоритма схемы МИВЕР и разработанной имитационной агентно-ориентированной системы «Тайга-3» путем проведения вычислительного эксперимента.

4.1 Алгоритм расчета оптимальных локализационных траекторий

В параграфе 1.3 была произведена постановка задачи локализационного управления. Для решения этой задачи был разработан алгоритм, позволяющий на основе разработанной агентной модели определять типовые траектории движения команды при локализации процесса (локализационные траектории) по критерию минимизации затраченного времени.

Напомним, что в определении данной задачи описаны два типа процессов. Первым является непосредственно сам динамический на процесс на поверхности Земли, а второй – это процесс локализации. Динамика распространения (области достижимости) обоих процессов может быть рассчитана с помощью представленной агентной модели с использованием A - и D -агентов (агентов, используемых для построения заградительных барьеров).

Рассмотрим принцип работы алгоритма на конкретных примерах. При решении задачи одностороннего охвата динамического процесса в начале работы алгоритма на карте выбираются две точки. Это стартовые точки распространения динамического процесса и процесса локализации (области достижимости агента D). Стартовую точку агента D обозначили маркером под номером 1. Затем пошагово строятся оба процесса до тех пор, пока они не пересекутся. Из двух точек пересечения, в зависимости от выбранного направления обхода, выбирается точка старта процесса локализации. Обозначили данную точку маркером под номером 2. Проведя прямую линию от 1 до 2, получили участок, который необходимо преодолеть агенту от своего начального размещения до точки непосредственного начала локализации. Затем область достижимости агента D уже строится из точки 2, находятся точки пересечения, и формируется следующий участок локализационной траектории. Таким образом, алгоритм продолжает работать до тех пор, пока локализационная траектория не замкнется, либо маркер под номером 1 не окажется в зоне распространения динамического процесса. В первом случае считается, что локализация успешно завершена (рисунок 4.1-А). Во втором - построение локализационной траектории при заданных входных параметрах считается невозможным (рисунок 4.1-Б).

На рисунке 4.1 схематично проиллюстрирована работа данного алгоритма. Процесс локализации строится упрощенно, исходя из условия, что скорость движения агента D принимается равной в любом направлении движения. Красным цветом изображена динамика распространения динамического процесса. Синим – процесс локализации. Ориентация охвата процесса – против часовой

стрелки. Сама локализационная траектория проходит через все выделенные маркеры и изображена черным цветом.

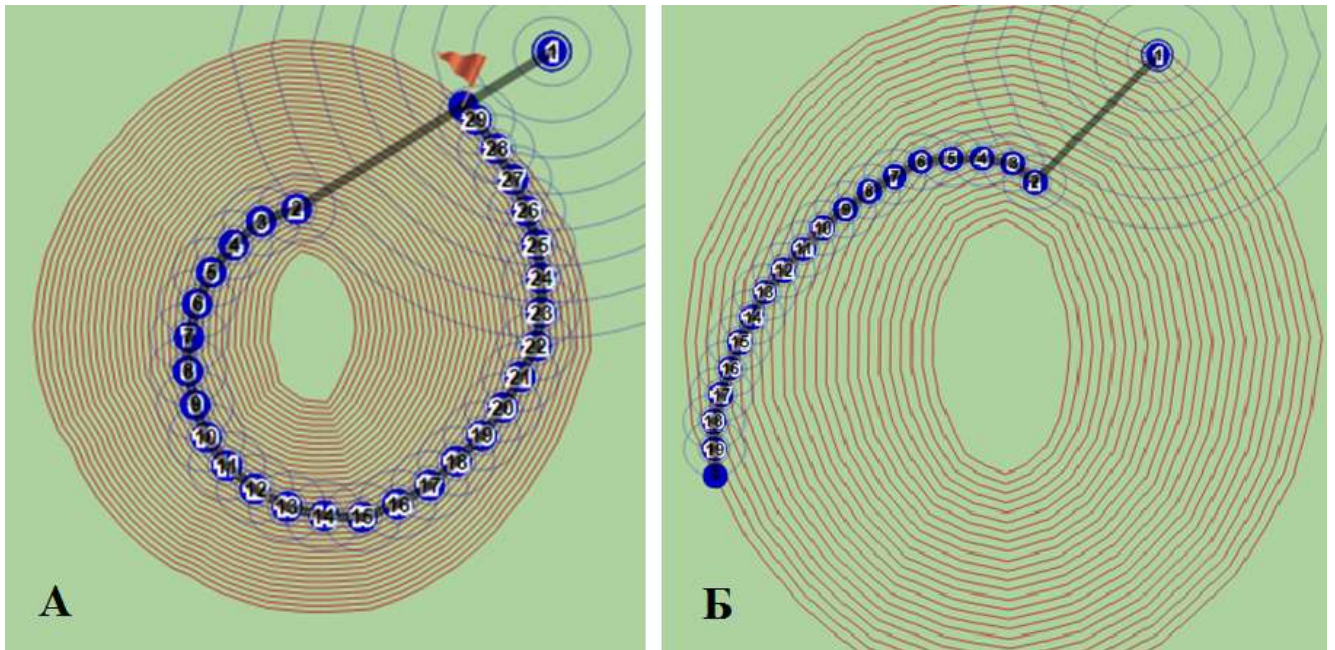


Рисунок 4.1 – Пример расчета локализационной траектории при одностороннем охвате процесса

На рисунке 4.2 приведен пример построения локализационной траектории при двустороннем охвате процесса. В данном случае не учитывается направление обхода динамического процесса, т.к. предполагается использование одновременно двух D -агентов.

В качестве новых точек старта процесса локализации выбираются обе точки пересечения процесса локализации и динамического. На рисунке – это синие маркеры 2 и 3. Затем из обеих точек продолжает строиться процессы локализации, до тех пор, пока локализационная траектория не замкнется, либо маркер под номером 1 не окажется в зоне распространения динамического процесса. Во втором случае считается, что построение локализационной траектории при заданных входных параметрах невозможно.

В более сложных случаях может быть задействовано большее число D -агентов, стартующих из различных начальных местоположений.

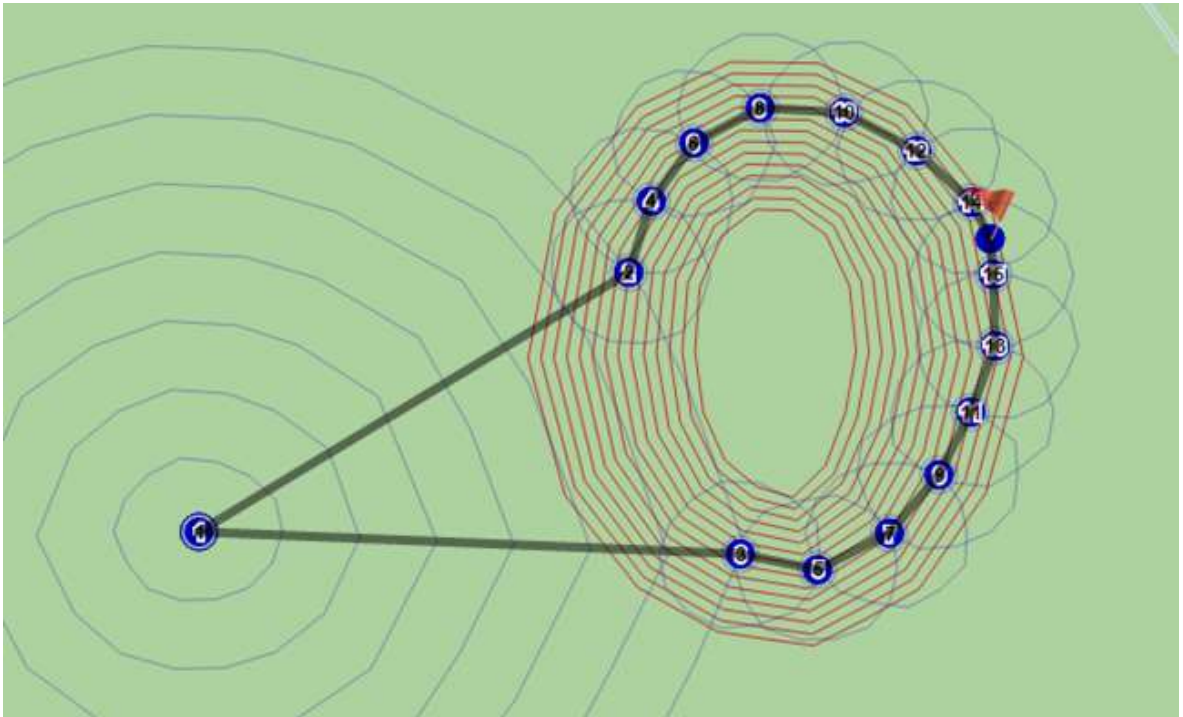


Рисунок 4.2 – Пример расчета локализационной траектории при двустороннем охвате процесса

На рисунке 4.3 показан пример использования данного алгоритма в имитационной системе «Тайга-3». Движение *D*-агента задается по рассчитанной локализационной траектории (черная линия с красными флажками). Процесс распространения пожара отображен на каждой итерации моделирования в виде непрерывной красной линии. Отображение *A*-агентов скрыто для более удобной читаемости рисунка. Белыми квадратами показана проложенная заградительная полоса.

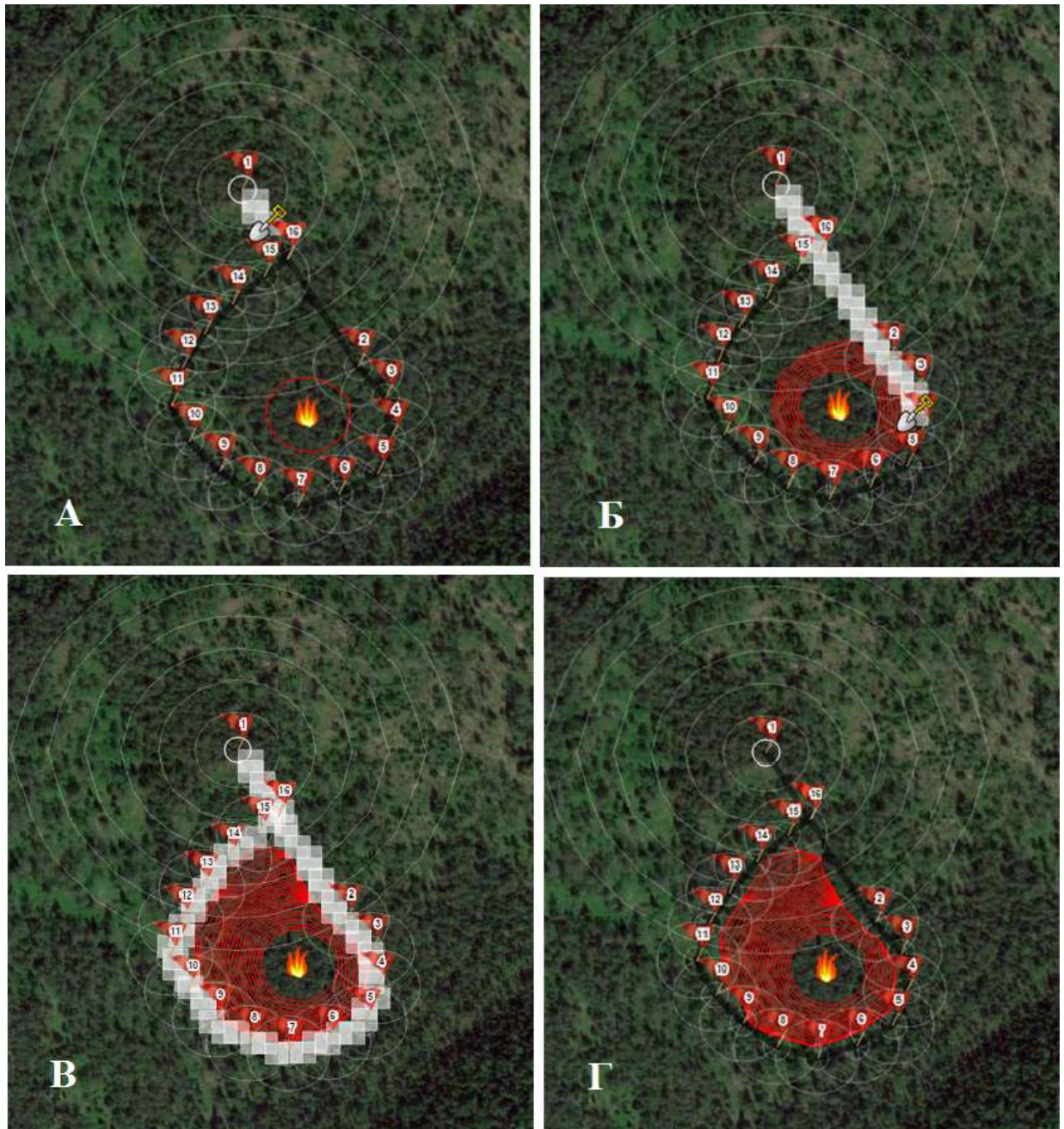


Рисунок 4.3 – Симуляция действия противопожарной бригады (*B*-агента), двигающейся по рассчитанной траектории в системе «Тайга-3»; *A* – начало движения агента; *B* – процесс локализации пожара; *B* – локализация пожара завершена; *Г* – контур пожара, после локализации

4.2 Алгоритм оптимального размещения и группировки сил и средств противодействия стихийным динамическим процессам

Постановка оптимизационной задачи

Ограниченность людских (агенты B) и материальных (агенты D) ресурсов при одновременной борьбе с множеством очагов динамических процессов, обуславливает необходимость выбора вариантов решения локализационных задач, оптимальных по критерию наносимого процессом ущерба K_y при ограничении имеющихся ресурсов $R < R_{max}$, либо двухкритериальной задачи оптимизации: минимизация ущерба K_y при одновременной минимизации затрачиваемых ресурсов R .

Второй вариант задачи более сложен. Тем не менее, для такой задачи фронт Парето-оптимальных решений может быть рассчитан путем решения серии задач. На начальных этапах обучения персонала тактике борьбы со стихийными природными процессами и принятию решений о распределении имеющихся ресурсов достаточно реализовать следующую упрощенную модель. Обозначим число имеющихся агентов типа B как N_A . В этом случае имеющиеся ресурсы – это как раз имеющиеся в распоряжении лица, принимающего решения, агенты типа B : $R = N_A \leq R_{max}$. Если процесс распространяется по территории, на которой нет важных объектов, таких как населенные пункты, предприятия и т.п., в качестве критерия, характеризующего нанесенный процессом ущерб, можно принять площадь поражения после локализации: $K_y = S$.

Как правило, лицо, принимающее решения, рассматривает ограниченное число возможных исходных позиций (точек) размещения B -агентов. Возможные позиции размещения определяются местами постоянной дислокации бригад, возможными местами съезда с дорог и т.д. Обозначим число возможных точек исходного размещения агентов типа B как N_p . Предполагается, что два и более агента могут при необходимости располагаться в одной и той же точке.

Зная исходное расположение агентов типа B , можно построить траектории движения для каждого из них, исходя из алгоритма движения и действия таких

агентов (см. параграф 2.2.2). Полученные траектории однозначно определяют смоделированную конфигурацию фронта процесса в каждый из моментов времени, которое принимается дискретным. Таким образом, развивающаяся ситуация моделируется в виде конечного автомата (F -схемы [173,174]), в котором исходное состояние определяется расположением агентов A и B , а логика переходов процесса из текущего состояния в следующее состояние определяется логикой действия данных агентов. При этом конечным состоянием такого автомата можно считать состояние, в котором последний агент типа A остановлен. Конечным состоянием однозначно определяется площадь, пройденная процессом по итогам локализации. Таким образом, мы имеем функцию (реализованную алгоритмически), отражающую множество возможных исходных точек расположения агентов типа B в количестве N_A (при этом множество возможных точек исходного расположения каждого из таких агентов – конечно и имеет мощность N_P) на множество вещественных чисел (площадь поражения S): $S = F(X_1, \dots, X_{N_A})$. Здесь F - функция, реализуемая конечным автоматом (агентно-ориентированной имитационной системой), X_i – точки исходного размещения каждого из N_A агентов типа B .

Обозначим развивающиеся стихийные процессы, требующие локализации, как C_k , $1 \leq k \leq N_C$, где N_C – число таких одновременно развивающихся процессов. Моделирование каждого из таких процессов с применением агентно-ориентированной имитационной системы будем производить независимо друг от друга. Для упрощения модели предположим, что, если агент типа B занят локализацией одного из таких процессов, то он не участвует в локализации другого независимо от времени, требующегося для локализации каждого из процессов.

Моделируется распространение одного и того же процесса (с одним и тем же исходным состоянием) на некоторой реальной местности, при различных вариантах начального размещения на местности ограниченного количества агентов B (противодействующих команд), а также группировки (кластеризации) агентов по локализуемым процессам. Решение задачи заключается в выборе

такого начального размещения команд на территории, которое позволит получить максимальное или минимальное значение выбранного критерия. Параметры среды в каждой имитации не изменяются и задаются заранее.

Обозначим возможные точки изначального расположения агентов B как P_j , $1 \leq j \leq N_P$. Введем булевы переменные y_{ijk} , каждая из которых принимает значение 1, если i -й агент изначально располагается в точке P_j и в дальнейшем задействуется в локализации процесса C_k , и 0 – в противном случае. Пусть эти переменные образуют трехмерную матрицу $Y = [y_{ijk}]$. Тогда задачу выбора оптимального размещения с одновременной группировкой агентов типа B по локализуемым процессам можно представить как задачу псевдобулевой комбинаторной оптимизации [175]:

$$\min S(Y), \quad (4.1)$$

$$\sum_{j=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{N_C} y_{ijk} \leq 1 \quad \forall i = \overline{1, N_A}, \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{N_C} y_{ijk} \leq N_A, \quad (4.3)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i = \overline{1, N_A}, j = \overline{1, N_P}, k = \overline{1, N_C}. \quad (4.4)$$

Подходы к решению подобных задач известны [176,177]. В частности, к подобным задачам успешно применяются методы линейризации [178] с последующим решением задачи целочисленного линейного программирования, метод релаксаций, а также жадные алгоритмы [177, 178]. Такую задачу можно рассматривать как задачу об оптимальной загрузке производственных мощностей, в роли которых выступают агенты типа B , с одновременным решением задачи об их оптимальном размещении.

В качестве процедур локального поиска, последовательно улучшающих текущее решение y_{ijk}^* , могут быть использованы следующие.

Процедура №1. Изменение начального положения агента:

Для каждого $k = \overline{1, N_C}$: Для каждого $i = \overline{1, N_A}$:

$$j = \arg \min_{j=1, N_P} S(Y'), \text{ где } Y' - \text{измененная матрица } Y^*, \text{ в которой } y'_{ijk} = 1,$$

$$y'_{ij'k} = 0 \quad \forall j' \neq j.$$

Конец цикла; Конец цикла

Процедура №2. Изменения процесса, локализуемого агентом:

Для каждого $j = \overline{1, N_C}$: Для каждого $i = \overline{1, N_A}$:

$k = \arg \min_{k=\overline{1, N_C}} S(Y')$, где Y' – измененная матрица Y^* , в которой $y'_{ijk}=1$,
 $y'_{ijk}=0 \quad \forall k' \neq k$.

Конец цикла; Конец цикла

Жадная процедура №3. Сокращение числа агентов.

Присвоить $S' = +\infty$;

Для каждого $k = \overline{1, N_C}$: Для каждого $i = \overline{1, N_A}$: Для каждого $j = \overline{1, N_P}$:

Если $y^*_{ijk} = 1$:

Присвоить $Y' = Y^*$; Присвоить $y'_{ijk} = 0$;

Если $S(Y') < S'$, то присвоить $S' = S(Y')$, $i' = i, j' = j, k' = k$.

Конец если

Конец цикла; Конец цикла; Конец цикла.

Последняя процедура может применяться необходимое число раз, пока не будет выполняться ограничение (4.3). Применение данной процедуры позволяет привести изначально недопустимое произвольное решение задачи к допустимому.

Метод жадных эвристик [177] предлагает ряд подходов к решению подобных задач. В частности, предлагается комбинировать различные схемы организации глобального поиска с жадными эвристическими процедурами и процедурами локального поиска. Одной из эффективных схем организации глобального поиска является метод изменяющихся вероятностей (МИВЕР) [179]. Данный метод последовательно генерирует случайным образом начальные решения задачи псевдодобулевой оптимизации (возможно – недопустимые, т.е. с избыточным числом переменных, значения которых равны 0). Вероятность того, что переменная y_{ijk} примет при этом значение 1, обозначим через p_{ijk} . К полученному решению y_{ijk} применяются процедуры локального поиска, чередующиеся с жадными процедурами. В итоге получается некоторое допустимое решение y_{ijk} , и

в зависимости от соответствующего ему значения $S(y_{ijk})$ меняются вероятности p_{ijk} .

Процедура №4 генерации начальных решений задачи.

Дано: вероятности p_{ijk} .

Присвоить $y_{ijk} = 0 \forall i = \overline{1, N_A}, j = \overline{1, N_P}, k = \overline{1, N_C}$.

Для каждого $i = \overline{1, N_A}$:

Для каждого $j = \overline{1, N_P}, k = \overline{1, N_C}$:

Сгенерировать случайное $r \in [0; 1)$.

Присвоить $x_{jk} = r p_{ijk}$.

Конец цикла

Выбрать пару индексов j, k , которой соответствует максимальное x_{jk} .

Присвоить $y_{ijk} = 1$.

Конец цикла

Возвратить в качестве результата матрицу Y .

Предложен алгоритм схемы МИВЕР для решения задачи оптимального размещения агентов типа B и их группировки по локализуемым процессам.

1. Присвоить $p_{ijk} = \frac{2N_A}{N_P N_C} \forall i = \overline{1, N_A}, j = \overline{1, N_P}, k = \overline{1, N_C}$.

2. Сгенерировать два начальных решения Y' и Y'' .

3. Пока $\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{N_C} y'_{ijk} > N_A$:

3.1. для Y' применять последовательно процедуры №1 и №2, пока решение не перестанет улучшаться. Затем применить процедуру №3.

3.2. Конец цикла 3.

4. Пока $\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_P} \sum_{k=1}^{N_C} y''_{ijk} > N_A$:

4.1. для Y'' применять последовательно процедуры №1 и №2, пока решение не перестанет улучшаться. Затем применить процедуру №3.

4.2. Конец цикла 4.

5. Для каждого $i = \overline{1, N_A}, j = \overline{1, N_P}, k = \overline{1, N_C}$:

5.1. Если $S(Y') > S(Y'')$ и $y'_{ijk} > y''_{ijk}$, то присвоить $p_{ijk} = p_{ijk} / 1.5$.

5.2. Если $S(Y') < S(Y'')$ и $y'_{ijk} > y''_{ijk}$, то присвоить $p_{ijk} = 1.5 p_{ijk}$.

5.3. Если $S(Y') > S(Y'')$ и $y'_{ijk} > y''_{ijk}$, то присвоить $p_{ijk} = 1.5 p_{ijk}$.

5.4. Если $S(Y') < S(Y'')$ и $y'_{ijk} > y''_{ijk}$, то присвоить $p_{ijk} = p_{ijk} / 1.5$.

Если не выполняются условия останова (ограничение на число итераций, на практике достаточно 10-50), то повторять с шага 2.

4.3 Пример решения задачи оптимального размещения агентов типа B и их группировки по локализуемым процессам

В данном параграфе представлен пример решения задачи оптимального размещения B -агентов с помощью предложенного алгоритма схемы МИВЕР и разработанной имитационной агентно-ориентированной системы «Тайга-3».

Проведена серия вычислительных экспериментов с каждым из вариантов исходного размещения агентов B .

Исходные данные проведения эксперимента

Тип основных проводников горения (ОПГ) – сухомшистый, класс пожарной опасности по условиям погоды – IV, направление ветра – С/З в первые 4 часа имитации, С/В после 4-х часов, скорость ветра под пологом леса – 2 м/с первые 4 часа имитации, 2,5 м/с после 4-х часов, противопожарные силы – отряды по 5 человек, площадь пожара в момент обнаружения пожара – 0,179 га, время свободного распространения пожара (до размещения команд) – 3 часа, критерии оптимальности – площадь гари после локализации, время локализации. Начальное размещение команд №1 и 2 совпадает, однако они имеют разное направление обхода пожара α (аналогично и с командами №3 и 4). Некоторые из решений, сгенерированных алгоритмом в ходе работы, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Координаты вариантов начального размещения агентов *B*

№	Противодействующие команды №1 и 2		Противодействующие команды №3 и 4	
	X, ° в. д.	Y, ° с. ш.	X, ° в. д.	Y, ° с. ш.
1	93.2792	55.7126	93.2708	55.7166
2	93.2766	55.7111	93.2738	55.7180
3	93.2757	55.7116	93.2734	55.7185
4	93.2755	55.7117	93.2742	55.7178
5	93.2745	55.7117	93.2743	55.7180
6	93.2737	55.7117	93.2759	55.7179
7	93.2726	55.7122	93.2768	55.7173
8	93.2699	55.7135	93.2797	55.7157
9	93.2705	55.7133	93.2785	55.7159
10	93.2683	55.7149	93.2809	55.7149

В таблице 4.2 представлены результаты проведенных вычислительных экспериментов с каждым из вариантов размещения, приведенным в таблице 4.1.

Таблица 4.2 – Результаты проведения вычислительных экспериментов

№	Площадь охвата процесса после локализации, га	Время, затраченное на локализацию
1	15,931	5 ч 50 мин
2	18,382	6 ч 55 мин
3	12,845	4 ч 15 мин
4	10,576	3 ч 25 мин
5	9,062	3 ч 15 мин
6	10,189	3 ч 10 мин
7	9,148	3 ч 0 мин
8	> 23,603	локализация невозможна
9	>43,555	локализация невозможна
10	18,540	6 ч 25 мин

Варианты различаются размером смоделированного ущерба – площади гари. При этом в качестве критерия $F()$ может использоваться критерий затрачиваемого на локализацию времени. Структура алгоритма при этом не меняется. В данном примере в качестве оптимального варианта начального размещения противодействующих агентов по критерию минимальной площади алгоритм

выбирает вариант №5, по критерию минимального затраченного времени - №7. Стоит также обратить внимание на варианты размещения №8 и 9, при которых локализовать процесс в данных условиях вообще не удастся.

4.4 Выводы по четвертой главе

В данной главе показана эффективность использования предложенной агентной модели и основанной на ней имитационной системы для решения практических задач, возникающих при управлении стихийными динамическими процессами.

Предложен алгоритм, позволяющий рассчитывать оптимальные локализационные траектории динамических процессов по критерию минимально затраченного времени. Данный алгоритм позволяет решать задачи, как по одностороннему, так и двустороннему охвату процесса на основе реальных картографических данных.

Впервые предложен алгоритм схемы МИВЕР решения задач оптимального размещения агентов, противодействующих распространению стихийных природных динамических процессов, и их группировки (распределения) по локализуемым процессам. Алгоритм базируется на агентной модели, которая позволяет оценить последствия развития стихийного процесса, выполняя роль алгоритмически заданной целевой функции. Работа алгоритма проиллюстрирована вычислительным экспериментом.

Результаты, представленные в главе, опубликованы в работах [180,181,182,183].

Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие результаты.

1. Проведен анализ и классификация распределенных динамических процессов на поверхности Земли как объектов моделирования и управления. Показана возможность применения единой методики для моделирования распространения и локализации данных процессов.

2. Предложен алгоритм расчета конфигурации фронтов динамических процессов на поверхности Земли, основанный на использовании математического аппарата гамильтоновой механики, метода подвижных сеток и агентного моделирования.

3. Разработана модель распространения и локализации динамических процессов на поверхности Земли на основе агентного подхода. Функционирование модели описано с помощью двухуровневой вложенной цветной сети Петри. Данная модель позволяет на основе единого подхода решать задачи, как по расчету динамики процесса, так и по его локализации и ликвидации, что позволяет повысить эффективность принимаемых решений при разработке мероприятий по борьбе с негативным влиянием данных природных процессов.

4. Предложенная модель реализована в виде сетевой агентно-ориентированной имитационной системы. Данная система позволяет моделировать развитие динамического процесса, находящегося под воздействием противодействующих сил, использует для работы данные ГИС и может быть использована совместно с существующими системами космического мониторинга. Систему предлагается использовать для оперативного определения параметров распространения стихийных распространяющихся динамических процессов, а также разработки комплекса мер по его предотвращению и противодействию.

5. На основе результатов вычислительных экспериментов произведена оценка адекватности и точности использованной модели для свободно

распространяющегося стихийного динамического процесса статистическими методами, путем сравнения с нормативными данными.

6. Предложен алгоритм, позволяющий рассчитывать оптимальные локализационные траектории динамических процессов по критерию минимально затраченного времени. Данный алгоритм базируется на агентной модели и позволяет решать задачи, как по одностороннему, так и двустороннему охвату процесса на основе реальных картографических данных.

7. Предложен алгоритм схемы МИВЕР решения задач оптимального размещения агентов, противодействующих распространению стихийных динамических процессов, и их группировки (распределения) по локализуемым процессам на основе разработанной агентной модели с применением предложенного алгоритма расчета оптимальных локализационных траекторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колмогоров А.Н., Петровский И.Г., Пискунов Н.С. Исследование уравнения диффузии, соединенного с возрастанием количества вещества и его применение к одной биологической проблеме // Вопросы кибернетики. – М.: Наука, 1975. Вып. 12. С. 3.
2. Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / Отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 421 с.
3. Gordeev E.I., Muravyov Ya.D., Samoilenko S.B., Volynets A.O., Melnikov D.V., Dvigalo V.N., Melekestsev I.V. First Results from the 2012-2013 Tolbachik Fissure Eruption (англ.) // Bulletin of the Volcanological Society of Japan, 2013. № 2.
4. Информационная система "Динамические модели в биологии" [Электронный ресурс] / Каф. биофизики Москов. гос. ун-та им. М. В. Ломоносова. – Электрон. дан. – М., 2009. URL: <http://dmb.biophys.msu.ru> (дата обращения 25.05.2019).
5. Ученые Института леса им. В.Н. Сукачева проанализировали воздействие изменений климата на массовое размножение сибирского шелкопряда [Электронный ресурс] / ФАНО России. – Электрон. дан., 2017. URL: https://fano.gov.ru/ru/press-center/card/?id_4=38860 (дата обращения 25.05.2019).
6. Абдулкасимов А.А. Глобальные и региональные проблемы опустынивания аридных и семиаридных ландшафтов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. – Воронеж, 2006. С. 20-24.
7. Балкин С.В., Рябченко А.К. Чрезвычайная ситуация природного характера – наводнение // Вологдинские чтения. – Вологда, 2005. № 55. С. 54-56.
8. Динамика высокоэнергетических геофизических образований (фронты, оползни, сели, плотностные течения): отчет о НИР / Моск. физико-техн. ин-т; рук. Б.К. Ткаченко // Информационный бюллетень РФФИ. – М.: МФТИ, 1996. Т. 4. № 5. 385 с.
9. Борисова Т.А. Картографирование природных рисков от наводнений на реках бассейна озера Байкал // Успехи современного естествознания, 2016. № 4.

С. 121-125. URL: <http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=35874> (дата обращения 25.05.2019).

10. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований: учебник // М.: Академия, 2004. 336 с.

11. Региональная информационная система противопожарного обустройства лесов на примере Иркутской области [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – Москва: ЦЭПЛ РАН, 2016. URL: <http://cepl.rssi.ru/r-and-d-5> (дата обращения 25.05.2019).

12. Спутниковый мониторинг нефтяного загрязнения в Мексиканском заливе [Электронный ресурс] / ИКИ РАН. – Электрон. дан., 2010. URL: http://www.iki.rssi.ru/asp/dep_mex.html (дата обращения 25.05.2019).

13. Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л., Никитин В.С. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей // Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. — М., 2015. 699 с. ISBN 978-5-9907220-0-2 (в пер.).

14. Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров // Новосибирск: изд-во СО РАН, 2008. 404 с.

15. Рунд Х. Дифференциальная геометрия финслеровых пространств // М.: Наука, 1981. 340 с.

16. Albin F.A. A model for fire spread in wildland fuels by radiation // Combustion Science and Technology, 1985. Vol. 42. pp. 229-258.

17. Albin F.A. Computer-based models of wildland fire behavior: a user's manual // USDA Forest Service. Ogden, 1976. 68 p.

18. Коровин Г.Н., Добротворский М.М. АСУ – охраны, леса (от пожара): задачи, принципы, перспективы // Лесное хозяйство, 1974. № 8. С. 78-81.

19. Горовая Е.Н. Моделирование процесса тушения лесного пожара // Экономико-математическое моделирование лесохозяйственных мероприятий. Сб. науч. Тр. ЛенНИИЛХ. – Л., 1980. С. 42-51.

20. Горовая Е.Н., Коровин Г.Н. Имитационная модель лесного пожара // Экономико-математическое моделирование лесохозяйственных мероприятий. Сб. науч. Тр. ЛенНИИЛХ. – Л., 1980. С. 31-42.
21. Доррер Г.А., Ушанов С.В., Бархатов Н.Г. Математическое моделирование процессов распространения лесных пожаров и борьбы с ними // Известия вузов. Лесной журнал, 2000. № 2. С. 31-36.
22. Годунов С.К., Прокопов Г.П. Об использовании подвижных сеток в газодинамических расчетах // Журн. вычислит. матем. и математ. физики, 1972. Т. 12. № 2. С. 429-439.
23. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход (2-е издание) // Издательский дом "Вильямс", 2006. 1408 с.
24. Wooldridge M., Jennings N.R. Intelligent agent: theory and practice // The Knowledge Engineering Review, 1995. Vol. 10. № 2. P. 115-152.
25. Heyes-Roth B. An architecture for adaptive intelligent systems // Artificial Intelligence, 1995. Vol. 72. P. 329-365.
26. Цибульский Г.М. Мультиагентный подход к анализу изображений: Монография // Отв. ред. В.В. Москвичев. Новосибирск: Наука, 2005. 188 с.
27. Тарасов В.Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта, 1998. № 2. С. 5-63.
28. Городецкий В.И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения // Новости искусственного интеллекта, 1996. № 1. С. 44-59.
29. Fisher K., Muller J.P., Heimig I., Scheer A.W. Intelligent Agents in Virtual Enterprises // Proc. of the First International Conference on the Practical Applications of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (London, UK). P. 205-224.
30. Chaib-Draa B., Moulin M., Mandiau R., Millot P. Trends in Distributed Artificial Intelligence // Artificial Intelligence Review, 1992. Vol. 6. P. 35-66.
31. Agre P., Chapman D. Pengi: an Implementation of a Theory of Activity // Proceedings of the 6th National Conference on Artificial Intelligence. P. 268-272.

32. Brooks R.A Robust Layered Control System for a Mobile Robot // IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986. Vol. 2, № 1. P. 14-23.
33. Brooks R. Intelligence without Representation // Artificial Intelligence, 1991. Vol. 47. P. 139-159.
34. Ferber J., Jacopin E. The Framework of Eco-Problem Solving // Decentralized Artificial Intelligence II / Ed. by Y. Demazeau, J.-P. Muller. – Amsterdam: Elsevier North-Holland, 1991.
35. Murray D. Developing Reactive Software Agents // AI Expert, 1995. P. 27-29.
36. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
37. Durfee E.H., Lesser V. Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning. Distributed Artificial Intelligence, Gasser L. and Huhns M. ed. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1989. Vol. II. pp. 229-244.
38. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 864 с.
39. Поспелов Д.А. От коллектива автоматов к мультиагентным системам // Труды Международного семинара «Распределенный искусственный интеллект и многоагентные системы» (DAIMAS'97, Санкт-Петербург, Россия, 15-18 июня 1997), 1997. С. 319-325.
40. Зайцев И.Д. Многоагентные системы в моделировании социально-экономических отношений: исследование поведения и верификация свойств с помощью цепей Маркова: дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2014. 142 с.
41. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии // М.: Наука, 1988.
42. Пэранек Г.В. Распределенный искусственный интеллект // Искусственный интеллект: применение в интегрированных производственных системах / Под. ред. Э. Кьюсиака. – М.: Машиностроение, 1991. С. 238-267.

43. Gasser L. An overview of DAI // Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis / Ed. by L. Gasser and N.M. Avouris. - Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1992.

44. Rasmussen J., Brehmer B., Leplat J. (Eds.). Distributed Decision-Making. Cognitive Models for Cooperative Work. – New York: J. Wiley and Sons, 1991.

45. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. 384 с.

46. Wooldridge M.J., Jennings N.R. Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey // Intelligent Agents. ECAI-94 Workshop on Agent Theories, Architecture and Languages, Amsterdam, The Netherlands, August 8–9, 1994. pp. 3-39.

47. Городецкий В.И. Информационные технологии и многоагентные системы // Проблемы информатизации, 1998. Вып. 1. С. 3-14.

48. Brooks R.A. Intelligence without reason // Proceedings of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-91). – Sydney, Australia, 1991. pp. 569–595.

49. Langton C. (Ed.). Artificial Life. – Redwood City: Addison-Wesley, 1992.

50. Deneubourg J.-L. et al. Self-Organization and Life: from Simple Rules to Global Complexity // Proc. of Second European Conference on Artificial Life, Bruxelles, 1993.

51. Drogoul A., Ferber J. Multi-Agent Simulation as a Tool for Studying Emergent Processes in Societies // Simulating Societies: Computer Simulation of Social Phenomena/ Ed. by N. Gilbert and J. Doran, UCL Press, 1994. pp. 127-142.

52. Steels L. Cooperation Between Distributed Agents Through Self-Organization // Decentralized Artificial Intelligence / Ed.by Y. Demazeau and J.-P. Muller. – Amsterdam: Elsevier North-Holland, 1990. pp. 175-196.

53. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интеллектуальные информационные системы: учебник для студентов вузов, обучающихся по спец. "Прикладная информатика в экономике" // М.: Финансы и статистика, 2004. 423 с.

54. Швецов А.Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям / Всероссийский конкурсный отбор

обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению "Информационно-телекоммуникационные системы", 2008. 101 с.

55. Петренко Е.О., Верамьев А.А. Робототехническая мультиагентная система для прохождения односвязных лабиринтов // Инженерный вестник. – М: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Баумана», 2015. № 12. С. 509-518.

56. Тимофеев А.В. Мультиагентные системы и нейросетевые технологии в робототехнике и информатике // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – Нальчик: Кабардино-Балкарский научный центр РАН, 2011. № 1. С. 249-252.

57. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П., Крюченков Е.Н., Кучерский Р.В., Диане С.А. Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения // Мехатроника, автоматизация, управление. – М: Новые технологии, 2012. № 2. С. 22-32.

58. Костенко П.М., Швецова Е.В. Мультиагентные системы в логистике // Научно-методический электронный журнал «Концепт», 2014. Т. 20. С. 3271–3275. URL: <http://e-koncept.ru/2014/54918.htm> (дата обращения 25.05.2019).

59. Морозова Ю.А. Мультиагентные системы в логистике: анализ опыта и перспективы // Логистика и управление цепями поставок. – М.: Эс-си-эм консалтинг, 2015. № 2 (67). С. 69-76.

60. Семченко А.Ю., Болховская А.Д., Барлиани А.Г. Мультиагентные системы для управления потоковыми процессами в логистике // Новосибирск: Интерэкспо Гео-Сибирь, 2017. Т. 9. № 2. С. 95-99.

61. Шуть В.Н. Мультиагентное управление движением транспортных средств в улично-дорожной сети города // Искусственный интеллект. – Донецк, Украина, 2014. №4 (66). С. 123-128.

62. Завадский А.А., Шуть В.Н. Управление дорожным движением на перекрестках при помощи мультиагентных систем // Вестник ХНТУ. – Херсон, Украина, 2016. №3 (58). С. 90-98.

63. Гончаренко А.Н. Возможности управления транспортной сетью горнопромышленного предприятия на основе мультиагентных систем // Горный

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: Горная книга, 2015. № 1. С. 164-172.

64. Дорофеюк Ю.А., Мендель А.С., Покровская И.В., Чернявская А.Л. Мультиагентные системы в задачах управления лечебным процессом в крупномасштабных медицинских комплексах // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015. Материалы Восьмой международной конференции: В 2 томах. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. С. 337-340.

65. Дорофеюк А.А., Дорофеюк Ю.А., Мендель А.С., Покровская И.В., Чернявская А.Л. Мультиагентные системы в задачах управления лечебным процессом // Управление развитием крупномасштабных систем. Материалы Восьмой международной конференции: В 2 томах. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. – С. 265-271.

66. Vermeulen I. et al. Multi-agent Pareto appointment exchanging in hospital patient scheduling // Springer, SOCA 1, 2007. pp. 185-196.

67. Vermeulen I. et al. Improving patient activity schedules by multi-agent Pareto appointment exchanging // Proc. IEEE intern. conf. on E-commerce technology, CEC/EEE, 2007. pp.56-63.

68. Amandi Daknou et al. Toward a multi-agent model for the care of patients at the emergency department // MAMECTIS'08 Proc. Of the 10th WSEAS intern. conf. on Math. Methods, computational techniques and intelligent systems, 2008. pp. 264-269.

69. Manel Taboada et al. Agent-based emergency decision-making aid for hospital emergency departments // Emergencias, 2012. Vol. 24. pp. 189-195.

70. Anke K. Hutzschenreuter et al. Agent-based Patient Admission Scheduling in Hospitals // Proc. of 7th intrn. conf. on autonomous agents and multiagent systems (AAMAS 2008) – Industry and application track, May, 12-16, 2008. pp. 45-52.

71. Келеберда И.Н., Лесная Н.С., Репка В.Б. Использование мультиагентного онтологического подхода к созданию распределенных систем дистанционного обучения // Образовательные технологии и общество, 2004. Т. 7, № 2. С. 190–205.

72. Peca C., Marzo J., de la Rosa J. Curriculum Sequencing for an e-learning System Based on Learning Styles // Proceedings of 5th International Conference on Information Technology Based Higher Education & Training (ITHET 2004). Istanbul, Turkey. May 31–June 2, 2004. pp. 167–172.

73. Vassileva J., Deters R., Greer J., McCalla G., Kumar V., Mudgal C. A Multi-Agent Architecture for Peer-Help in a University Course // Proceedings of the Workshop on Pedagogical Agents at the 4th International Conference on Intelligent Tutoring Systems (ITS'98). San Antonio, USA. August 16–19, 1998. pp. 64-68.

74. Пашкин М.П. Многоагентная интеллектуальная система дистанционного обучения // Труды СПИИРАН, 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 126-137.

75. Батищев С.В., Лахин О.И., Минаков И.А., Ржевский Г.А., Скобелев П.О. Разработка мультиагентной системы дистанционного обучения для интернет-портала «Оптик-сити» // Известия Самарского научного центра РАН, 2003. Т. 5, № 1. С. 91-95.

76. Архипов И.Л., Иванов А.М., Холкин Д.В., Мольский А.В., Новицкий Д.А., Сорокин Д.В. Мультиагентная система управления напряжением и реактивной мощностью. // Сборник докладов XXII конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем» (Москва, 2014). М.: ОАО "СО ЕЭС", 2014. С. 243-252.

77. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Мультиагентные технологии управления в системах электроснабжения с активными потребителями // Труды братского государственного университета. Серия: естественные и инженерные науки. – Братск: Братский государственный университет, 2016. Т. 2. С. 145-154.

78. Третьяков Е.А. Мультиагентное управление распределением электрической энергии в системе электроснабжения нетяговых потребителей железных дорог // Наука и образование в XXI веке: теория, практика, инновации. Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 4 частях. – М.: ООО «АР-Консалт», 2014. С. 45-48.

79. Борисевич А.В., Вольский С.И., Дякин Н.В. Многоагентный подход для управления распределенной генерацией электроэнергии в интеллектуальных

сетях // Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "Инфотех-2015". Материалы международной научно-практической конференции. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2015. С. 57-58.

80. Скобелев П.О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Приложение к теоретическому и прикладному научно-техническому журналу «Информационные технологии», 2013. № 1. С. 1-32.

81. Карасев В.О. Мультиагентные модели в системах управления жизненным циклом сложных технических изделий // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2015). Труды международной конференции. Под ред. А.В. Толока. – М.: ООО «Аналитик», 2015. С. 274-277.

82. Сергушичева М.А. Модели и методы управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования промышленного предприятия: дис. канд. техн. наук. – Вологда, 2010. 184 с.

83. Аксенов К.А., Гончарова Н.В. Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов // Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. 311 с.

84. Прудский М.В., Симонов П.М. Модель локальных конфликтов // Вестник ТГУ, 2013. Вып. 5. Т. 18, С. 2650-2651.

85. Дегтерев Д.А. Распространение культурных норм и ценностей: агентное моделирование // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Международные отношения. – М.: РУДН, 2016. № 1, Т. 16. С. 141-152.

86. Боуш Г.Д., Куликова О.М., Шелков И.К. Агентное моделирование процессов кластерообразования в региональных экономических системах // Экономика региона. – Екатеринбург: Институт экономики Уральского отделения РАН, 2016. № 1, Т. 12. С. 64-77.

87. Шульц Д.Н., Якупова И.Н. Агентное моделирование влияния микроструктуры на свойства экономики // Журнал экономической теории. –

Екатеринбург: Институт экономики Уральского отделения РАН, 2016. № 1. С. 70-81.

88. Евсеев Е.А., Ефимова Е.Д. Имитационная модель избирательной кампании // Проблемы управления в социальных системах. – Томск: НИТГУ, 2015. № 12, Т. 8. С. 114-129.

89. Jensen K. Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Berlin: Spingler, 1997. Vol. 2. 174 p.

90. Ломазова И.А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределенных систем с объектной структурой. М.: Научный мир, 2004. 208 с.

91. Доррер Г.А., Яровой С.В., Казаковцева О.Б. Мультиагентная система моделирования динамических процессов на поверхности Земли // Системы управления и информационные технологии, 2018, № 2 (72). С. 42-47.

92. Доррер Г.А., Яровой С.В. Моделирование динамических процессов на поверхности Земли // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении, 2018. № 4 (8). С. 53-57.

93. Georgy Dorrer, Sergey Yarovoy. Use of Agent-Based Modeling for Wildfire Situations Simulation // IEEE Xplore Digital Library 2018. 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) 8-25 Aug. 2018. DOI 10.1109/RPC.2018.8481677.

94. Georgy Dorrer, Alexandra Dorrer, Sergey Yarovoy. Modeling of dynamic process on the Earth's surface // IOP Conference Series: MIP: Engineering, 2019. Vol. 537.

95. Яровой С.В. Агентный подход при моделировании лесопожарных ситуаций // Программные продукты и системы, 2016. Т. 29. № 3. С. 101-108.

96. Яровой С.В., Доррер Г.А. Применение агентного подхода для моделирования процессов распространения и локализации природных пожаров // Хвойные бореальной зоны. - Красноярск: СибГТУ, 2016. Вып.3-4. С. 223-228.

97. Яровой С.В. Применение агентного подхода для моделирования динамики распространения и локализации природных пожаров // Материалы XX Всероссийской научной конференции с международным участием "Сопряженные

задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии", 21-23 сентября, 2016 г., Томск / Рос. фонд фундам. исслед. ; Том. гос. ун-т, Мех.-мат. фак. ; под ред. Д.П. Касимова. - Томск: Томский государственный университет, 2016. С. 46-48. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000548592> (дата обращения 25.05.2019).

98. Доррер Г.А., Яровой С.В. Описание процессов распространения и ликвидации природных пожаров с помощью агентных моделей // Сибирский лесной журнал, 2017. № 5. С. 105–113.

99. Доррер Г.А., Яровой С.В. Агентное моделирование процессов управления борьбой с природными пожарами // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – М: ООО «Институт новых информационных технологий», 2017. № 3. С. 25-33.

100. Georgy Dorrer, Alexandra Dorrer, Sergey Yarovoy. Using nested Petri nets for modeling multiagent systems // IOP Conference Series: MIP: Engineering, 2019. Vol. 537.

101. Доррер Г.А., Шаталов П.С. Моделирование природных пожаров и процессов борьбы с ними // Информационные технологии в науке, образовании и управлении: труды международной конференции IT + S&E`15 (Гурзуф, 22 мая–01 июня 2015 г) / под. ред. проф. Е.Л. Глориезова. М.: ИНИТ, 2015. С. 295-307.

102. Волокитина А.В. Прогнозирование пирологических ситуаций в бореальных лесах // Вестник КрасГАУ. – Красноярск: КрасГАУ, 2014. № 1 С. 77-83.

103. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. – Новосибирск: СО РАН, 2002. 314 с.

104. Волокитина А.В., Софронов М.А., Корец М.А. Прогноз поведения лесных пожаров // Красноярск: СО РАН, 2010. 211 с.

105. Rothermel R.C. How to predict the spread and intensity of forest and range fires // USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. Int-143. Ogden, 1983. 111 p.

106. Доррер Г.А., Коморовский В.С. Методика расчета параметров лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли с использованием

данных космического мониторинга // Красноярск: Вестник СибГАУ, 2010. Вып. 3 (29). С. 47-51.

107. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров // Томск: Изд-во ТГУ, 1981. 278 с.

108. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними // Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.

109. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: дис. д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05 / Перминов Валерий Афанасьевич.- Томск, 2011. 279 с.

110. Фильков А.И., Сладкова Т.Е., Горина И.А. О влиянии плотности и неоднородности состава РЕМ на скорость распространения пожара // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф. Материалы 7-й международной конференции. - Томск: Томский государственный университет, 2008. С. 112-113.

111. Гостинцев Ю.А., Суханов Л.А. Конвективная колонка над линейным пожаром в однородной изотермической атмосфере // Физика горения и взрыва, 1977. № 5. С. 675-685.

112. Morvan D., Hoffman C., Rego F., Mell W. Numerical simulation of the interaction between two fire fronts in grassland and shrubland // Fire Safety Journal, 2011. Vol. 46. pp. 469-479.

113. Linn R.R., Winterkamp J., Colman J.J. Modeling interaction between fire and atmosphere in discrete element fuel beds // International Journal of Wildland Fire, 2005. Vol. 14. pp. 37-48.

114. Linn R.R., Reisner J., Colman J.J., Winterkamp J. Studying wildfire behavior using FIRETEC // International Journal of Wildland Fire, 2002. Vol. 11. pp. 233-246.

115. Linn R.R., Dupuy J.L., Pimont F. Coupled slope and wind effects on fire spread with influences of fire size: a numerical study using FIRETEC // International Journal of Wildland Fire, 2012. Vol. 21. pp. 828-842.

116. Dupuy J.L., Morvan D. Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model // *International Journal of Wildland Fire*, 2005. Vol. 14. pp. 141-151.

117. Morvan D., Dupuy J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation // *International Journal Combustion and Flame*, 2004. Vol. 138. pp. 199-210.

118. Mell W., McDermott R.J., Forney G.P. Wildland fire behavior modeling: perspectives, new approaches and applications // *Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conference*, Spokane, Washington, USA, 2010. pp. 45–62.

119. McGrattan K.B., McDermott R., Hostikka S., Floyd J.E. Fire Dynamics Simulator (Version 6): User's Guide // *NIST Special Publication 1019*, 2013. 262 p.

120. Mell W., Olson S.L., Kashiwagi T. Flame spread along free edges of thermally thin samples in microgravity [Электронный ресурс] – URL: <http://fire.nist.gov/bfrlpubs/fire01/PDF/f01014.pdf> (дата обращения 25.05.2019).

121. Mell W., Jenkins M.A., Gould J., Cheney Ph. A physics-based approach to modeling grassland fires // *International Journal of Wildland Fire*, 2007. Vol. 16. pp. 1-22.

122. Mell W., Maranghides A., McDermott R.J., Manzello S.L. Numerical simulation and experiments of burning Douglas fir trees // *International Journal Combustion and Flame*, 2009. Vol. 156. pp. 2023-2041.

123. Mell W., McNamara D., Maranghides A., McDermott R.J., Forney G.P., Hoffman C., Ginder M. Computer modeling of wildland-urban interface fires // *Fire & Materials 12th International Conference*, San-Francisco, CA, 2011. pp. 23-35.

124. Fons W.L. Analysis of fire spread in light forest fuels // *Journal of Agricultural Resources*, 1946. Vol. 72. № 3. pp. 93-121.

125. Rothermel R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels // *USDA Forest Service Research Paper INT-115*, Ogden, 1972. 40 p.

126. Byram G.M. Forest fire behavior. // *Forest Fire: Control and Use*, New York, 1959. pp. 113-126.

127. Anderson D.G., Catchpole E.A., de Mestrem N.J., Parkes T. Modeling the spread of grass fires // Journal of Australian Mathematical Society (series B), 1982. Vol. 23. pp. 451-466.

128. Brown J.R., Morsden M.A. Estimating fuel weights of grasses, forests, and small woody plants // USDA Forest Service Research Notes INT-210, Ogden, 1976. 11 p.

129. Davis J.R., Dieterich J.N. Prediction rate of fire spread (ROS) in Arizona oak chaparral: field work book // USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RM-24, Fort Collins, 1976. 8 p.

130. Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen J.D. The national fire-danger rating system // USDA Forest Service Gen. Techn, Rep. INT-39, Ogden, 1977. 65 p.

131. Lindermuth W., Davis J.R. Predicting fire spread in Arizona's Oak Chaparral // USDA Forest Service Research Paper RM-101, Fort Collins, 1973. 11 p.

132. Курбатский И.П., Телицын Г.П. Современная теория распространения лесных низовых пожаров // Современные исследования типологии и пирологии леса. – Архангельск, 1976. С. 90-96.

133. Амосов Г.А. Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров // Возникновение лесных пожаров, 1964. С. 152-171.

134. Коровин Г.Н. Методика расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров // Сборник научно-исследоват. работ по лесному хозяйству / Труды ЛенНИИЛХ. Вып. XII - Л., 1969. С. 244-262.

135. Курбатский Н.П., Иванова Г.А. Статистическая многофакторная модель кромки низового лесного пожара // Моделирование в охране лесов от пожаров. - Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1979. С. 17-32.

136. Софронов М.А. Лесные пожары в горах Южной Сибири // М.: Наука, 1967. 150 с.

137. Andrews P.L. BEHAVE: Fire behavior prediction and modeling system - BURN subsystem part 1 // USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. INT-194. – Ogden, 1986. 126 p.

138. Andrews P.L., Bevins C.D., Seli R.C. BehavePlus fire modeling system, version 2.0: User's Guide // USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RMRS-GTR-106WWW. – Ogden, 2003. 107 p.

139. Finney M.A. FARSITE: Fire are simulator model, development and evaluation // USDA Forest Service, Res. Paper RMRS-RP-4. Ogden, 1998. 47 p.

140. Tymstra C., Bryc R.W., Wotton B.M., Taylor S.W., Armitage O.B. Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model. Information Report NOR-X-417, 2010. URL: <http://www.firegrowthmodel.ca/documentation.html> (дата обращения 25.05.2019).

141. Кухта В.Б. Метод моделирования распространения низового пожара в лесных насаждениях с использованием агентного подхода // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник, 2014. № 5. С. 92-97.

142. Dai D., Zhang Y. Simulating fire spread in a community using an agent-based model // Proceedings of the 12th International Conference on GeoComputation. LIESMARS Wuhan University, Wuhan, China, 2013. pp. 130-132.

143. Himoto K., Tanaka T. Development and Validation of A Physics-based Urban Fire Spread Model // Fire Safety Journal, 2008. Vol. 43. № 7. pp. 477–494.

144. Parks G.M. Development and application of a model for suppression of forest fires // Manage Science, 1964. Vol. 10. № 4. pp. 61-68.

145. Parlar M., Vicson R.G. Optimal Forest Fire Control: an Extension of Park's Model // Forest Science, 1982. Vol. 28. № 2. pp. 345-355.

146. Albers M., Boros H., Burema R. Project Bushfire [Электронный ресурс] // Department of Information and Computing Sciences, Utrecht University – Электрон. дан, 2013. URL: <http://bushfire.sourceforge.net/> (дата обращения 25.05.2019).

147. Hu X., Sun Y. Agent-based modeling and simulation of wildland fire suppression // Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference: From the program chair. Proceedings - Winter Simulation Conference, URL: <https://doi.org/10.1109/WSC.2007.4419732> (дата обращения 25.05.2019).

148. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров: приказ Федеральной службы лесного хозяйства России от 30.06.95 № 100. – М: [б.и.], 1995. 104 с.

149. Иванов В.А., Иванова Г.А., Москальченко С.А. Справочник по тушению природных пожаров // 2-е изд. перераб. и доп. Красноярск: ПРООН/МКИ, 2011. 130 с.

150. Щетинский Е.А. Тушение лесных пожаров: пособие для лесных пожарных // изд. 3-е, перераб. и доп. М: ВНИИЛМ, 2002. 104 с.

151. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Адаптация модели Ротермела для реализации в программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров // Технологии техносферной безопасности, 2011. Вып. 6 (40). 6 с.

152. Вонский С.М., Жданко В.А. Принципы разработки метеорологических показателей пожарной опасности в лесу (методические рекомендации). // Л., 1976. 47 с.

153. Волокитина А.В., Софронов М.А. Классификация и картографирование растительных горючих материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 314 с.

154. Волокитина А.В., Софронов М.А., Карнаухова Е.А. Прогнозирование поведения и последствий низовых пожаров с использованием крупномасштабных карт растительных горючих материалов // Лесное хозяйство. М, 2004. № 1. С. 41.

155. Доррер Г.А., Яровой С.В. Полигоны растительных горючих материалов «Wildfire base». Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2017621134. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ г. Москва, 02.10.2017 г.

156. Волокитина А.В. Защита населенных пунктов от чрезвычайных ситуаций, связанных с природными пожарами (практические рекомендации) // Красноярск: СО РАН, 2002. 63 с.

157. Brown D.F., Dunn W.E., Lazaro M.A., Policastro A.J. The smoke-fireplume model: tool for eventual application to prescribed burns and wildland fires. Joint Fire Science Program Conference and Workshop, Boise, 1999. 12 p.

158. Мальбахов В.М., Шлычков В.А., Лежнин А.А., Дубровская О.А. Численная модель распространения дымового шлейфа при лесных пожарах с параметрическим учетом процессов горения // География и природные ресурсы, 2004. спец. выпуск. С. 170-174.

159 Яровой С.В., Буслов И.А., Доррер Г.А. Платформа для учебно-тренажерной системы по основам тактики борьбы с лесными пожарами («Тайга-3»). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015662521. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ г. Москва, 26.11.2015 г.

160. Доррер Г.А., Яровой С.В. Агентно-ориентированная модель распространения и локализации природных пожаров «Wildfire agent». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662419. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ г. Москва, 07.11.2017 г.

161. Яровой С.В., Буслов И.А., Доррер Г.А. Учебно-тренажерная система по основам тактики борьбы с лесными пожарами // Технологии техносферной безопасности. Вып. 3 (61). – 2015. – С.328-337.

162. Georgy Dorrer, Alexandra Dorrer, Igor Buslov, Sergey Yarovoy. System of personnel training in decision making in fighting wildfires // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. Vol. 450. DOI:10.1088/1757-899X/450/6/062018.

163. Васильев К.К., Служивый М.Н. Математическое моделирование систем связи: учебное пособие // Ульяновск: УлГТУ, 2008. 170 с.

164. Student. The probable error of a mean // *Biometrika*, 1908. № 6 (1). pp. 1-25.

165. Lomax R.G. *Statistical Concepts: A Second Course* // Lawrence Erlbaum Associates, 2007. 10 p.

166. Wilcoxon F. Individual comparisons by ranking methods // *Biometrics Bulletin*, 1945. № 1 (6). pp. 80-83.

167. Oyeka I.C.A. Modified Wilcoxon Signed-Rank Test // *Open Journal of Statistics*, 2012. pp. 172-176.

168. Conover W.J. Chapter 3.4: The Sign Test // Practical Nonparametric Statistics (Third ed.), Wiley, 1999. pp. 157-176.

169. Sprent P. Applied Nonparametric Statistical Methods (Second ed.) // Chapman & Hall, 1989.

170. Lehmann, E.L. Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks // Springer, 2006. pp. 9,11–12.

171. Яровой С.В., Дорпер Г.А. Проверка адекватности и точности модели распространения кромки природного пожара основанной на методе подвижных сеток // Хвойные бореальной зоны. Красноярск: СибГТУ, 2015. Вып. 5-6. С. 253-259.

172. Яровой С.В. Оценка качества модели распространения природного Пожара в учебно-тренажерной системе «Тайга-3» // Проблемы информатизации региона. ПИР-2015: Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2015. С.227-234.

173. Booth T.L. Sequential Machines and Automata Theory (1st ed.). New York: John Wiley and Sons, Inc. Library of Congress, 1967. Card Catalog Number 67-25924.

174. Roth C.H., Jr. Fundamentals of Logic Design. Thomson-Engineering, 2004. pp. 364–367.

175. Antamoshkin A.N., Saraev V.N., Semenkin E.S. Optimization of Unimodal Monotone Pseudoboolean Functions // Kybernetika. 1990. Vol. 26. pp. 432-442.

176. Antamoshkin A., Masich I. Pseudo-boolean optimization in case of an unconnected feasible set // Springer Optimization and Its Applications, 2007. Vol. 4. pp. 111-122.

177. Kazakovtsev L.A., Gudyma M.N., Antamoshkin A.N. Genetic Algorithm with Greedy Heuristic for Capacity Planning // 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) – S.-Petersburg, 2014, 6-8 October, 2015. pp. 607-613.

178. Казаковцев Л.А. Метод жадных эвристик для систем автоматической группировки объектов: диссертация доктора технических наук: 05.13.01 // Казаковцев Лев Александрович; [Сиб. федер. ун-т]. - Красноярск, 2016. 429 с.

179. Антамошкин А.Н., Казаковцев Л.А. Применение метода изменяющихся вероятностей для задач оптимального размещения на сети // Вестник СибГАУ, 2014. № 5 (57). С. 10-19.

180. Яровой С.В., Доррер Г.А., Казаковцев Л.А. Формирование решений по группировке сил и средств противодействия стихийным динамическим процессам с применением алгоритмов комбинаторной оптимизации// Системы управления и информационные технологии, 2019. № 2 (76). С. 92-98.

181. Yarovoy S.V., Dorrer G.A., Shaporova Z.E., Kazakovtsev L.A. Optimal location and grouping of forces against spontaneous dynamic processes with pseudo-Boolean optimization algorithms // IOP Conference Series: MIP: Engineering, 2019. Vol.537.

182. Яровой С.В., Доррер Г.А. Применение метода подвижных сеток для решения задач локализационного управления // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки: Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием). Сборник статей студентов, аспирантов молодых ученых. – Красноярск: СибГТУ, 2015. Том 3. С.133-136.

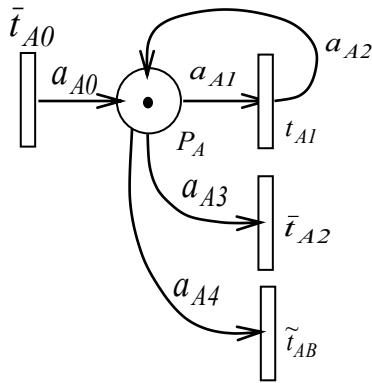
183. Яровой С.В., Доррер Г.А. Применение метода подвижных сеток для расчета локализационных траекторий при управлении лесопожарной ситуацией // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сборник статей по материалам V всероссийской научно-практической конференции. Железногорск, 2015. С. 54-58.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Описание системной и сателлитных цветных сетей Петри

ОПИСАНИЕ САТЕЛЛИТНЫХ СЕТЕЙ

Описание агента типа $A - D_PROCESS$



Пространственное положение агента типа A определяется системной сетью в соответствии с динамикой фронта процесса на основе используемой частной модели. Состояние этого агента определяется маркировкой позиции P_A : при наличии ресурса $load_A$ в этой позиции агент считается активным. При начале работы ресурс активизируется путем срабатывания перехода \bar{t}_{A0} по дуге a_{A0} по сигналу системной сети. Активное состояние агента поддерживается по дугам a_{A1} , a_{A2} при срабатывании перехода t_{A1} . При отсутствии ресурса для распространения на участке местности, занимаемом агентом, ресурс обнуляется через переход \bar{t}_{A2} . При взаимодействии с агентом типа B ресурс $load_A$ уменьшается на каждом шаге моделирования на величину $delta_load_A$, которая передается по дуге a_{A4} при срабатывании перехода \tilde{t}_{AB} . При $load_A=0$ агент типа A становится пассивным.

Цветовые множества

$COLOR\ NO_A = integer$

$COLOR\ STATUS_A = Boolean (true = move; false = stay)$

$COLOR\ COORD_A = real\ array(x, y)$

$COLOR\ DELTACOORD_A = real\ array(x, y)$

$COLOR\ TIME = real$

$COLOR\ DELTA\ TIME_A = real$

$COLOR\ LOAD = real$

$COLOR\ DELTALOAD = real$

$COLOR\ D_PROCESS = product(NO_A * STATUS_A * COORD_A * TIME * DELTA\ TIME_A * LOAD_A * DELTALOAD_A)$

Переменные

$VAR_A:$

$no_A: NO_A$

$status_A: STATUS_A$

$coord_A: COORD_A$

$delta_coord_A: DELTACOORD_A$

$time_A: TIME$

$delta_time_A: DELTATIME_A$

$load_A: LOAD$

$delta_load_A: DELTALOAD_A$

$process: D_PROCESS$

Список позиций: $P = \{P_A\}$

Список переходов $T = \{\bar{t}_{A0}, t_{A1}, \bar{t}_{A2}, \tilde{t}_{AB}\}$

Цветовая функция

$C(P_A) = D_PROCESS$

Функции на переходах

$G(\bar{t}_{A0}, t_{A1}, \bar{t}_{A2}, \tilde{t}_{AB}): empty$

Список дуг

$A = \{a_{A0}, a_{A1}, a_{A2}, a_{A3}, a_{A4}\}.$

Выражения на дугах:

$E(a_{A0}) = 1' process;$

$E(a_{A1}) = 1' process;$

$E(a_{A2}) = if(load\ A > 0\ and\ status_A = true)\ then$

$begin(1' process; load_A - deltaload_A; time_A + deltatime_A; coord_A + delta_coord_A)\ end;$

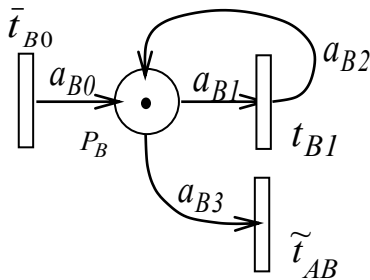
$else\ 1' process; status_A := false;$

$E(a_{A3}) = \text{if } status_A = \text{false then } l' \text{ process};$
 $E(a_{A4}) = \text{if } (status_A := \text{true and } status_B = \text{true}) \text{ then}$
 $\text{begin } (l' \text{ process}; load_A - \text{deltaload_B}; time_A + \text{deltatime_A}; coord_A +$
 $\text{delta_coord_B}) \text{ end}$

Инициализация

$P_A(0) = \text{empty}$

Описание агента типа *B* - *FIGHTER*



Пространственное положение агента типа *A* определяется системной сетью в соответствии с динамикой фронта процесса на основе используемой частной модели. Состояние этого агента определяется маркировкой позиции P_A : при наличии ресурса $load_A$ в этой позиции агент считается активным. При начале работы ресурс активизируется путем срабатывания перехода \bar{t}_{A0} по дуге a_{A0} по сигналу системной сети. Активное состояние агента поддерживается по дугам a_{A1} , a_{A2} при срабатывании перехода t_{A1} . При отсутствии ресурса для распространения на участке местности, занимаемом агентом, ресурс обнуляется через переход \bar{t}_{A2} . При взаимодействии с агентом типа *B* ресурс $load_A$ уменьшается на каждом шаге моделирования на величину $delta_load_A$, которая передается по дуге a_{A4} при срабатывании перехода \tilde{t}_{AB} . При $load_A=0$ агент типа *A* становится пассивным.

Пространственное положение агента типа *B* определяется системной сетью в соответствии с алгоритмом движения противоборствующих сил. Состояние этого агента является булевой переменной и определяется маркировкой позиции P_B : при наличии ресурса в этой позиции агент считается активным. Ресурс при начале работы активизируется через переход \bar{t}_{B0} по дуге a_{B0} из системной сети. Активное состояние агента поддерживается по дуге a_{B1} при срабатывании

перехода t_{B1} . При активации перехода \tilde{t}_{AB} происходит воздействие на агент типа A – уменьшение величины ресурса $load_A$ в позиции P_A , как описано выше.

Взаимодействие агентов управляется системной сетью.

Цветовые множества

$COLOR\ NO_B = integer$

$COLOR\ STATUS_B = Boolean (true = fight; false = moving)$

$COLOR\ COORD_B = real\ array(x, y)$

$COLOR\ DELTACOORD_B = real\ array(x, y)$

$COLOR\ TIME = real$

$COLOR\ DELTA\ TIME_B = real$

$COLOR\ DELTALOAD_B = real$

$COLOR\ FIGHTER = product (NO_B * STATUS_B * COORD_B * DELTACOORD_B * TIME * DELTA\ TIME_B * DELTALOAD_B)$

Переменные

$VAR_B:$

$no_B: NO_B$

$status_B: STATUS_B$

$coord_B: COORD_B$

$deltacoord_B: DELTACOORD_B$

$time_B: TIME$

$delta_time_B: DELTATIME_B$

$delta_load_B: DELTALOAD_B$

$fighter: FIGHTER$

Список позиций: $P = \{P_B\}$

Список переходов $T = \{\bar{t}_{B0}, t_{B1}, \tilde{t}_{AB}\}$

Цветовая функция: $C(P_B) = FIGHTER$

Функции на переходах

$G(\bar{t}_{B0}, t_{B1}, \tilde{t}_{AB}): empty$

Список дуг: $A = \{a_{B0}, a_{B1}, a_{B2}, a_{B3}\}$

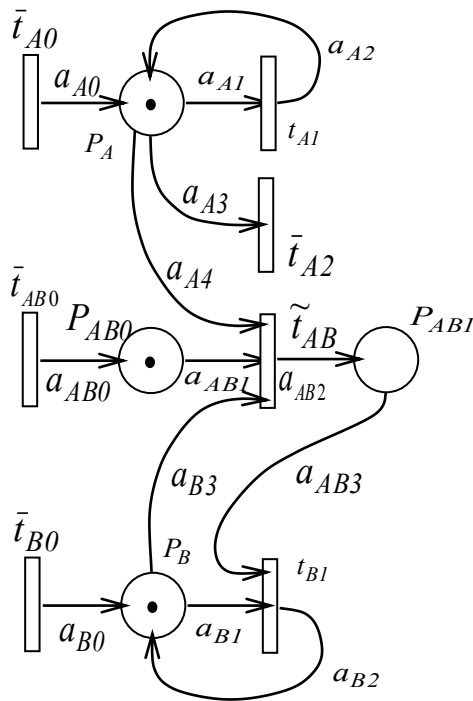
Выражения на дугах:

$E(a_{B0}) = 1' \text{ fighter};$
 $E(a_{B1}) = 1' \text{ fighter};$
 $E(a_{B2}) = \text{if}(\text{status_}B = \text{true});$
then begin (1' fighter; $\text{time} := \text{time_}B + \text{deltatime_}B$) *end;*
else begin (1' fighter; $\text{time_}B + \text{deltatime_}B;$) *end;*
 $E(a_{B3}) = \text{if } \text{status_}B = \text{false then } (1' \text{ fighter; } \text{time_}B + \text{deltatime_}B; \text{coord_}B :=$
 $\text{coord_}B + \text{delta_coord_}B) \text{ else empty.}$

Инициализация

$P_B(0) = \text{empty}$

Описание взаимодействия агентов A и B - *MANAGER*



Пространственное положение агента типа A определяется системной сетью в соответствии с динамикой фронта процесса на основе используемой частной модели. Состояние этого агента определяется маркировкой позиции P_A : при наличии ресурса $load_A$ в этой позиции агент считается активным. При начале работы ресурс активизируется путем срабатывания перехода \bar{t}_{A0} по дуге a_{A0} по сигналу системной сети. Активное состояние агента поддерживается по дугам a_{A1} , a_{A2} при срабатывании перехода t_{A1} . При отсутствии ресурса для распространения на участке местности, занимаемом агентом, ресурс обнуляется через переход \bar{t}_{A2} .

При взаимодействии с агентом типа B ресурс $load_A$ уменьшается на каждом шаге моделирования на величину $delta_load_A$, которая передается по дуге a_{A4} при срабатывании перехода \tilde{t}_{AB} . При $load_A=0$ агент типа A становится пассивным.

Пространственное положение агента типа B определяется системной сетью в соответствии с алгоритмом движения противоборствующих сил. Состояние этого агента является булевой переменной и определяется маркировкой позиции P_B : при наличии ресурса в этой позиции агент считается активным. Ресурс при начале работы активизируется через переход \bar{t}_{B0} по дуге a_{B0} из системной сети. Активное состояние агента поддерживается по дуге a_{B1} при срабатывании перехода t_{B1} . При активации перехода \tilde{t}_{AB} происходит воздействие на агент типа A – уменьшение величины ресурса $load_A$ в позиции P_A , как описано выше.

Взаимодействие агентов управляется системной сетью. Разрешение начать взаимодействие агентов определяется срабатыванием перехода \bar{t}_{AB0} . При наличии необходимых ресурсов в позициях P_A , P_B и P_{AB0} срабатывает переход \tilde{t}_{AB} , запускающий описанное выше взаимодействие агентов.

Цветовые множества

COLOR NO_A = integer

COLOR NO_B = integer

COLOR STATUS_A = Boolean (true = move; false = stay)

COLOR STATUS_B = Boolean (true = fight; false = move)

COLOR COORD_A = real array(x, y)

COLOR DELTACOORD_A = real array(x, y)

COLOR COORD_B = real array(x, y)

COLOR DELTACOORD_B = real array(x, y)

COLOR TIME = real

COLOR DELTA TIME_B = real

COLOR DELTALOAD_B = real

COLOR MANAGER = product (NO_A NO_B* STATUS_A* STATUS_B*
COORD_A* COORD_B* DELTACOORD_A* DELTACOORD_B* TIME*
DELTALOAD_B)*

Переменные

VAR manager: MANAGER

Список позиций: $P = \{P_{AB0}, P_{AB1}\}$

Список переходов: $T = \{\bar{t}_{AB0}, \tilde{t}_{AB}\}$

Функции на переходах

$G(\bar{t}_{AB0}, \tilde{t}_{AB})$: *empty*

Список дуг: $A = \{a_{AB0}, a_{AB1}, a_{AB2}, a_{AB3}\}$

Выражения на дугах:

$E(a_{AB0}) = I \text{ 'manager}$;

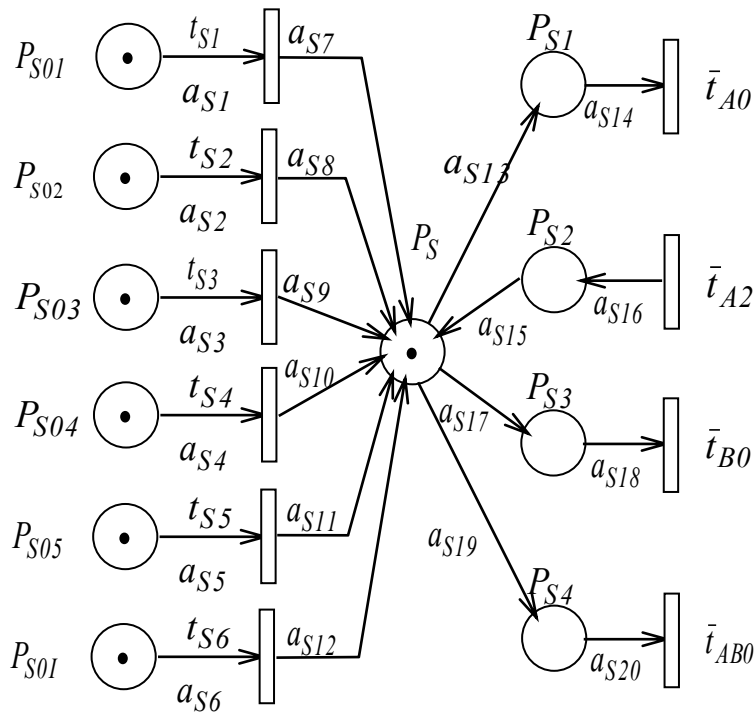
$E(a_{AB1}) = I \text{ 'manager}$;

$E(a_{AB2}) = \text{if (status_A = true and status_B = true) then I 'manager else empty}$;

$E(a_{AB3}) = I \text{ 'manager}$.

Инициализация

$P_{AB0}(0) = \text{empty}$; $P_{AB1}(0) = \text{empty}$

ОПИСАНИЕ СИСТЕМНОЙ СЕТИ**Цветовые множества**

$COLOR\ MAP = map$

$COLOR\ FUEL = map$
 $COLOR\ RATE_OF_SPREAD = real$
 $COLOR\ PARAM_1 = real$
 $COLOR\ PARAM_2 = real$
 $COLOR\ PARAM_3 = real$
 $COLOR\ D_PROCESS = product(NO_A * STATUS_A * COORD_A * TIME * DELTA\ TIME_A * LOAD_A * DELTALOAD_A)$
 $COLOR\ FIGHTER = product(NO_B * STATUS_B * COORD_B * DELTACOORD_B * TIME * DELTA\ TIME_B * DELTALOAD_B)$
 $COLOR\ MANAGER = product(NO_A * NO_B * STATUS_A * STATUS_B * COORD_A * COORD_B * DELTACOORD_A * DELTACOORD_B * TIME * DELTALOAD_B);$
 $COLOR\ SYSTEM = product(MAP * FUEL * RATE_OF_SPREAD * PARAM_1 * PARAM_2 * PARAM_3 * PROCESS * FIGHTER * MANAGER);$

Переменные

$VAR\ map: MAP;$
 $VAR\ fuel: MAP;$
 $VAR\ ros: RATE_OF_SPREAD;$
 $VAR\ param1: PARAM_1;$
 $VAR\ param2: PARAM_2;$
 $VAR\ param3: PARAM_3;$
 $VAR\ process: D_PROCESS;$
 $VAR\ fighter: FIGHTER;$
 $VAR\ manager: MANAGER;$
 $VAR\ system: SYSTEM;$

Список позиций:

$P = \{P_S, P_{S01}, P_{S02}, P_{S03}, P_{S04}, P_{S05}, P_{S06}, P_{S1}, P_{S2}, P_{S3}, P_{S4}\};$

Список переходов: $T = \{t_{S1}, t_{S2}, t_{S1}, t_{S3}, t_{S4}, t_{S5}, t_{S6}, \bar{t}_{A0}, t_{A1}, \bar{t}_{A2}, \tilde{t}_{AB}\}$

Список дуг: $A = \{a_{S1}, \dots, a_{S20}\}$

Выражения на дугах:

$E(a_{S1}) = 1' \text{map};$

$E(a_{S2}) = 1' \text{fuel};$

$E(a_{S3}) = 1' \text{ros};$

$E(a_{S4}) = 1' \text{param1};$

$E(a_{S5}) = 1' \text{param2};$

$E(a_{S6}) = 1' \text{param3};$

$E(a_{S7}) = 1' \text{map};$

$E(a_{S8}) = 1' \text{fuel};$

$E(a_{S9}) = 1' \text{ros};$

$E(a_{S10}) = 1' \text{param1};$

$E(a_{S11}) = 1' \text{param2};$

$E(a_{S12}) = 1' \text{param3};$

$E(a_{S13}) = 1' \text{process};$

$E(a_{S14}) = 1' \text{process};$

$E(a_{S15}) = 1' \text{status_A};$

$E(a_{S16}) = 1' \text{status_A};$

$E(a_{S17}) = 1' \text{fighter};$

$E(a_{S18}) = 1' \text{fighter};$

$E(a_{S19}) = 1' \text{manager};$

$E(a_{S20}) = 1' \text{manager};$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015662521

«Платформа для учебно-тренажерной системы по основам тактики борьбы с лесными пожарами («Тайга - 3»)

Приволаделец: *Федерального государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный технологический университет» (RU)*

Авторы: *Буслов Игорь Александрович (RU), Яровой Сергей Викторович (RU), Доррер Георгий Алексеевич (RU)*

Заявка № 2015619798

Дата поступления 13 октября 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Роспатре программ для ЭВМ 26 ноября 2015 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.И. Волков Г.И. Волков

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017662419

Агенто-ориентированная модель распространения и локализации природных пожаров «Wildfire agent»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева) (RU)*

Авторы: *Доррер Георгий Алексеевич (RU),
Яровой Сергей Викторович (RU)*

Заявка № **2017617993**

Дата поступления **08 августа 2017 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **07 ноября 2017 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Иванова

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2017621134

Полигоны растительных горючих материалов «Wildfire base»

Приниматель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» (СибГУ им. М.Ф. Решетнева) (RU)*

Авторы: *Доррер Георгий Алексеевич (RU), Яровой Сергей Викторович (RU)*

Заявка № 2017620867

Дата поступления 08 августа 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 02 октября 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Иванов Г.П. Иванов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УТВЕРЖДАЮ
 ВрИО начальника ФГБОУ ВО
 «Сибирская пожарно-спасательная
 академия ГПС МЧС России»
 полковник внутренней службы

С.В. Сахаров
 2019

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы С.В. Ярового на тему: «Имитационное моделирование распределенных динамических процессов на поверхности Земли на основе агентного подхода» по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

в образовательный процесс ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России».

Комиссия в составе:

начальника кафедры пожарно-технических экспертиз ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», кандидата педагогических наук, Лагунова Андрея Николаевича;

профессора кафедры пожарно-технических экспертиз ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно – спасательная академия ГПС МЧС России», кандидата технических наук, доцента, Пожарковой Ирины Николаевны;

начальника учебно-методического отделения ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» Чепелева Александра Викторовича;

настоящим подтверждает, что результаты диссертационной работы Ярового Сергея Владимировича «Имитационное моделирование распределенных динамических процессов на поверхности Земли на основе агентного подхода» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России» при изучении обучающимися факультета инженеров пожарной безопасности, дисциплины «Физико-химические основы развития и тушения пожаров» - использовано программное обеспечение для оперативного прогнозирования динамики природных пожаров в учебных целях.

_____ кандидат педагогических наук, А.Н. Лагунов
 _____ кандидат технических наук, доцент И.Н. Пожаркова
 _____ А.В. Чепелев