

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева» на кафедре информационно-управляющих систем.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Доррер Георгий Алексеевич

Официальные оппоненты: **Дмитриев Михаил Геннадьевич**
доктор физико-математических наук,
профессор, Институт системного анализа
ФИЦ «Информатика и управление» РАН,
г. Москва, главный научный сотрудник

Нежевенко Евгений Семенович
доктор технических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение
науки «Институт автоматизации и
электрометрии СО РАН», г. Новосибирск,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Федеральный
исследовательский центр «Красноярский
научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук», г. Красноярск

Защита состоится «25» октября 2019 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева по адресу: 660037 г. Красноярск, проспект имени газеты «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте: <http://www.sibsau.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

Панфилов
Илья Александрович

Общая характеристика работы

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, т.е. 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.

Задачи исследования:

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 Всероссийской 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 международной базе 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 182 наименований.

Основное содержание диссертации

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и указаны задачи исследования, дана краткая характеристика содержания работы, приведены сведения о её общей структуре, приведены основные научные и практические результаты проведенных исследований, показана их научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

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

В п. 1.1 приведены примеры природных и антропогенных процессов на поверхности Земли:

- распространения лавовых потоков Толбачинского трещинного извержения, произошедшего на полуострове Камчатка в 2012–2013 гг.;
- процесс очагового распространения сибирского шелкопряда в Приенисейской темнохвойной тайге в период с 2013-2017 гг.;
- карта интегрального риска от наводнений на реках бассейна оз. Байкал, разработанная в 2016 году по результатам обобщенного анализа полученных удельных показателей и сравнения частных карт рисков;
- контур лесного пожара в Иркутской области в 2016 г., полученный с помощью обработки спутниковых снимков MODIS и LANDSAT;
- композиция четырех радиолокационных снимков ASAR Envisat, показывающая распространение нефтяного пятна с 26.04.10 по 2.05.10 в Мексиканском заливе;
- 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 излучения мощностью 10ПБк.

Рассмотрены следующие свойства таких процессов, которые в данной работе приняты как допущения:

1. все указанные процессы могут быть описаны как подвижные области, имеющие способность 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 наблюдению и контролю аэрокосмическими методами и 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.

Рассмотрена классификация рассматриваемых процессов по двум признакам:

- по природе возникновения;
- по степени подвижности (от экспансивного развития с образованием новых очагов до затухающего процесса).

В п. 1.2 дается определение ряда понятий, используемых в данной работе, и приведен метод описания динамики распределенных процессов на языке классической механики.

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

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} \frac{dx}{dt} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \hat{V} \text{grad} S = \frac{\partial S}{\partial t} + p \hat{V}(x, t) = 0 \quad (2)$$

и системе дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x} = \partial H / \partial p \\ \dot{p} = -\partial H / \partial x \end{cases} \quad (3)$$

с начальными условиями

$$x(\alpha, t_0) = x(\alpha), p(\alpha, t_0) = p_0(\alpha), \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V_n |\text{grad} S| = 0, \quad (5)$$

при начальных условиях (4).

Уравнение (5) в дальнейшем используется для создания методов и алгоритмов численного моделирования процессов распространения и локализации.

В п. 1.3 рассматривается взаимодействие человека с процессом на поверхности Земли. Это взаимодействие 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, Г.Н. Коровина, Е.Н. Горовой, С.В. Ушанова и Г.А. Доррера. 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) и 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:

$$\Phi = \int_0^T dt = \int_0^{2\pi} t' d\varphi \rightarrow \min \quad (6)$$

Здесь и далее штрих обозначает производную по φ .

Ограничения задачи:

$$\rho(\varphi) \geq r(\varphi) = r_0(\varphi) + v(\varphi)t \quad (7)$$

$$(\rho')^2 = \rho^2 + u^2(t')^2, \rho(\varphi_0) = \rho(\varphi_0 + 2\pi) = \rho_0, t(\varphi_0) = 0. \quad (8)$$

Решая задачу условной оптимизации (7) – (8), можно показать, что оптимальная локализационная линия состоит из двух участков (рисунок 1).

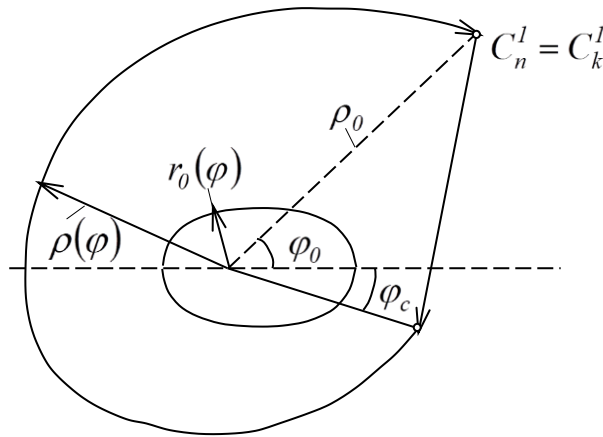


Рисунок 1 – Вид локализационной линии в схеме с одним центром

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:

$$T_1(\varphi_c) = T_2(\varphi_c), R_1(\varphi_c) = R_2(\varphi_c), R_1(\varphi_c) = T_2(\varphi_c), \quad (9)$$

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

В работе показано, что задача локализации разрешима при отношении скоростей распространения процесса и локализации $\gamma = \frac{u}{v} > 3.779$, при данном и меньшем отношении локализация невозможна.

В п. 1.4 представлен метод подвижных сеток С.К. Годунова, а также основанный на нем алгоритм построения фронта процесса распространения.

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 процессов – внешняя граница фронта процесса.

Сам алгоритм расчета контура процесса основан на численном интегрировании семейства характеристик уравнения Гамильтона-Якоби (5). 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 $p_i(t) = p_i(t, \omega_i)$, $i \in N(t)$, ω – параметр, задающий начальный контур. По мере развития процесса возможно нарушение упорядочения массивов по параметру ω . Для описания структуры контура для каждой точки указываются номера соседних точек. Таким образом, каждая точка контура $C_i(t)$ характеризуется вектором:

$$C_i(t) = \{\xi_i(t), p_i(t), L(i), R(i)\}, i \in N(t) \quad (10)$$

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 .

Данный метод реализован автором и используется в настоящей работе в задаче агентного моделирования процессов распространения.

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

В п. 2.1 приведен аналитический обзор понятий агента и мультиагентных систем. Представлены различные определения агентов, а также их возможные классификации по различным признакам. По степени развития внутреннего представления внешнего мира и способу поведения выделены два основных типа агентов (реактивные и когнитивные агенты.). Рассмотрены схемы внутреннего устройства данных агентов. Приведен сравнительный анализ свойств когнитивных и реактивных агентов. Представлены два основных направления в исследовании и разработке мультиагентных систем (МАС), на основании которых сформировались два ключевых типа архитектур построения МАС – делиберативная и реактивная архитектура. Данным понятиям посвящены работы M.J. Wooldridge, N.R. Jennings, В.И. Городецкого и др. Также рассмотрена наиболее распространенная на практике гибридная архитектура (А.В. Андрейчиков). Выделено понятие агентно-ориентированной системы (АОС), как гибридной системы, содержащей наряду с МАС и другие системы.

В п. 2.2 представлена имитационная агентная модель распространения и локализации динамических природных процессов. Работа модели основана на ГИС-данных и отражается на карте реальной местности. Предварительно на карту должны быть нанесены слои, отражающие различные особенности моделируемого процесса и местности: населенные пункты, реки, озера, дороги, овраги, лесные насаждения и другие объекты.

Предлагается использование частных моделей распространения динамического процесса, зависящих от его физической природы. Начальные

параметры процесса задаются вручную или автоматически перед началом имитации, в процессе которой эти данные можно корректировать.

В модели используется несколько типов агентов, обозначаемых символами A , B , D и M .

A -агенты предназначены для моделирования динамики процесса распространения. Описание этих агентов основывается на двух моделях: модели физических явлений, происходящих во фронте процесса, и модели процесса распространения. В качестве первой модели может быть использована любая теоретическая или экспериментальная модель рассматриваемого природного явления. Моделью же процесса распространения служит разработанный в рамках данной работы алгоритм, основанный на приведенном в первой главе описании движущихся фронтов распределенных процессов, и методе подвижных сеток С.К. Годунова.

Агенты A могут находиться в активном и пассивном состояниях. A -агент, находящийся в активном состоянии, является источником энергии для дальнейшего распространения процесса. Интенсивность выделения энергии может снижаться под воздействием агентов типа B . При уменьшении величины $I(t)$ до нуля A -агент переходит в пассивное состояние и больше не участвует в процессе моделирования.

Агенты типа B моделируют действие сил, противодействующих процессу распространения, и воздействуют на A -агентов. Они преследуют единственную цель – снизить выделяемую агентами типа A энергию, т.е. перевести их в пассивное состояние. Для этого B -агент движется по среде моделирования к ближайшему A -агенту и, подойдя к нему, уменьшает интенсивность выделения энергии $I_A(t)$:

$$I_A(t + 1) = I_A(t) - \Delta I_B(t), \quad (11)$$

где $\Delta I_B(t)$ – снижение интенсивности выделения энергии, вызываемое B -агентом за один шаг моделирования. «Обезвредив» очередного A -агента, B -агент перемещается к ближайшему активному A -агенту и продолжает свои действия.

Кроме рассмотренных, в модели используются и другие типы агентов.

Агенты типа D (D -агенты) представляют собой силы и средства, используемые при косвенном методе борьбы с динамическим процессом, например, путем его локализации. Данные агенты могут быть различных типов (например, бульдозеры, катера, вертолеты, самолеты и другие). Данные агенты осуществляют косвенное воздействие на A -агентов, посредством изменения характеристик среды распространения в соответствующем слое на карте.

Агент типа M представляет собой координатора или менеджера в рассматриваемой модели. Он регулирует действия других агентов в процессе моделирования, синхронизирует перемещение агентов по карте.

Перед началом моделирования задается число, расположение и характеристики A - и B -агентов. Производительность B -агентов определяется инструкциями по борьбе с соответствующими процессами. Также в процессе моделирования пользователь может использовать D -агентов для дополнительного воздействия на распространяющийся процесс, путем построения барьеров (препятствий) на пути распространения.

Параграф 2.3 посвящен разработке алгоритма для расчета конфигурации фронтов динамических процессов.

Процесс распространения и меры противодействия ему рассматриваются 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.

Модель процесса распространения основана на уравнении Гамильтона-Якоби (2), рассмотренного в первой главе, при начальных условиях

$$X(0) = X_0(\alpha), P(0) = P_0(\alpha), \quad (12)$$

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 ветра и уклона местности, где происходит горение. Поэтому нормальная скорость движения фронта процесса в уравнении (5) может быть представлена как функция нескольких аргументов, например,

$$V_n = V_n(m, X, t, W, E, \beta, \gamma), \quad (13)$$

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:

$$V_n(m, X, t, W, E, \beta, \gamma) = V_0(m, X, t, W, E) * \chi_n(P, W, E), \quad (14)$$

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.

Основная идея предлагаемого метода состоит в том, что каждый узел сетки, построенной по методу С. К. Годунова, представляется динамическим агентом типа А. 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). Множество А-агентов образует контур процесса в момент времени t . Пространственные координаты агентов этого типа $X_i(t)$ 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.

Алгоритм расчета включает в себя следующие этапы.

1. Создание A -агентов и их расстановка в области моделирования (первая итерация).

2. Для каждого агента вычисляется новый вектор координат в момент времени $t+1$:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + X_0(X, t) * \chi_n(P_i)\Delta t. \quad (15)$$

Здесь P_i – вектор нормали к фронту процесса в точке нахождения агента $A_i(t)$. Этот вектор определяется как нормаль в точке $X_i(t)$ к линии, проходящей через точки $X_{i-1}(t)$, $X_i(t)$, $X_{i+1}(t)$, Δt – временной шаг расчета.

3. Упорядочение контура. При моделировании распространения процесса по пересеченной местности расстояния между агентами изменяются, и структура контура может стать беспорядочной. Для того чтобы поддерживать эту структуру, предусмотрены два действия: добавление нового A -агента, если расстояние между соседними агентами превысит заданную максимальную величину l_{max} и исключение одного из агентов, если такое расстояние окажется меньше заданной величины l_{min} .

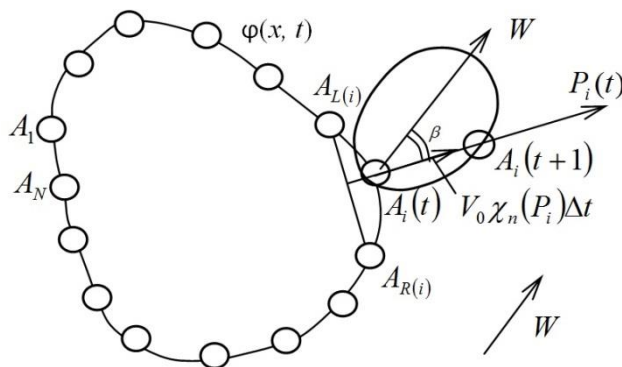


Рисунок 2 – Представление контура процесса как цепочки A -агентов

Параметры, которые учитываются при расчете, также могут быть различными. Их количество и наименования зависят как от используемой модели, так и от требований к системе и возможности построения информационной базы для расчета.

Параграф 2.4 посвящен формальному описанию функционирования агентной модели на основе формализмов сетей Петри. В работе для этой цели использовались цветные вложенные сети Петри (Colored Nested Petri Net). 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). Базовая часть содержит всю информацию о среде моделирования, осуществляет связь с ГИС и управляет взаимодействием сателлитных агентов, которые моделируют ситуацию на карте местности.

На рисунке 3 в качестве примера приведен фрагмент сателлитной части раскрашенной сети Петри, показывающей взаимодействие агентов типа A и B ,

управляемых системой сетью, которая представлена агентом M . Ниже кратко описана семантика поведения этих агентов.

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.

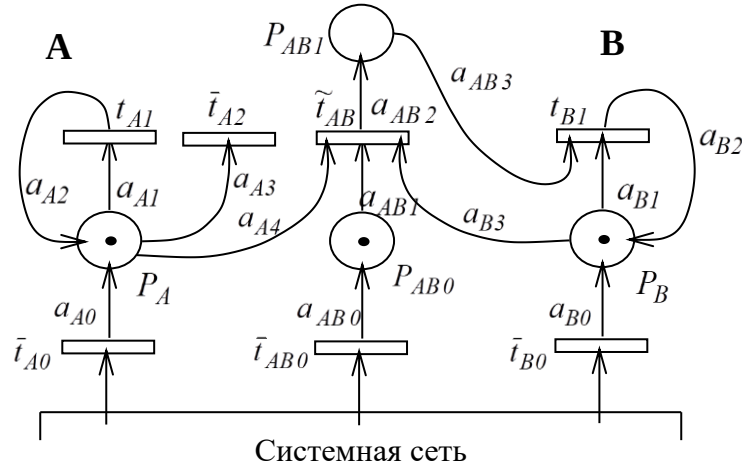


Рисунок 3 – Фрагмент сателлитной сети Петри, описывающей взаимодействие агентов A и B под управлением системной сети, моделируемой агентом M

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 (15). При $intensity_A=0$ агент A становится пассивным.

Пространственное положение агента типа B определяется в соответствии с алгоритмом движения противодействующих сил. Состояние этого 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 $\bar{t}_{B1}$.

Полностью вложенная сеть Петри, описывающая взаимодействие агентов данной модели, приведена в приложении к диссертации.

Третья 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 п. 3.1 приведен анализ существующих методов, моделей и систем, использующихся для моделирования природных пожаров. Сформулированы основные проблемы, возникающие при моделировании данного типа процессов. Представлена классификация используемых моделей, а также описаны существующие подходы для решения задачи прогнозирования фронта процесса, находящегося под внешним управлением/воздействием сил, противодействующих его распространению.

Классифицировать основные модели природных можно по целому ряду признаков. Наиболее распространенными являются классификации:

- по назначению (фундаментальное, оперативно-тактическое и стратегическое моделирование);
- по способу описания физических явлений, протекающих по фронту процесса и построению контура фронта процесса (аналитические и экспериментальные модели).

Аналитические модели опираются на описание физико-химических процессов, протекающих по фронту распространения природного пожара, в основе этих моделей лежат законы сохранения энергии, массы и импульса. Такие модели позволяют достаточно точно рассчитывать параметры процесса трехмерном пространстве, однако в силу своей сложности они требуют большого объема исходных данных и очень сложных вычислений. Здесь можно отметить работы А.М. Гришина, Ю.А. Гостинцева, Л.А. Суханова, D. Morvan, R.R. Linn, W. Mell и др.

Экспериментальные (или статистические) же модели основываются на упрощенных представлениях о процессе и использовании данных экспериментов или статистики. Эти модели, в силу своей простоты, имеют высокую скорость расчета параметров распространяющегося процесса, однако обладают, как правило, ограниченной точностью прогнозирования. Исследователями в данной области являются Н.П. Курбатский, Г.Н. Коровин, Г.А. Иванова, М.А. Софронова, R.C. Rothermel, F. Albinì и др.

В данном параграфе приведены также примеры разработанных моделей и систем, основанных на агентном подходе. Это работы В.Б. Кухты, D. Dai, Y. Zhang, M. Niazi, M. Yang, M. Albers, H. Boros, R. Burema, A. Minelli, X. Hu, M. Torini, Y. Sun.

В современной литературе предлагается несколько подходов к решению задачи прогнозирования процесса распространения природного пожара, находящегося под внешним управлением/воздействием противодействующих сил. Первый – это метод расчета объема необходимых противодействующих сил на основе упрощенной модели динамики процесса, разработанный G.M. Parks и M. Parlar. Второй подход – это определение траекторий движения противодействующих сил для локализации процесса путем построения непреодолимого для процесса препятствия. Данный подход используется в работах Г.Н. Коровина, F. Albinì, Г.А. Доррера, С.В. Ушанова. Также можно выделить третий подход, основанный на агентном представлении ситуации. Примером здесь может служить проект Bushfire, разработанный M. Albers, H. Boros, R. Burema, работы X. Hu и Y. Sun. и др.

В п. 3.2 рассмотрена программная реализации имитационной агентно-ориентированной системы. В качестве частной модели для расчета скорости

распространения фронта была использована модель природного пожара Р. Ротермела, которая является стандартом в США и признана во многих странах мира.

Агентно-ориентированная имитационная система была разработана с использованием web- и ГИС-технологий (JavaScript, PHP, MySQL, OpenLayers) и получила название «Тайга-3». В качестве карт реальной местности в данной системе могут быть использованы любые современные картографические сервисы (OpenStreetMap, Google, Yandex и др.). На рисунке 4 приведен пример работы системы.

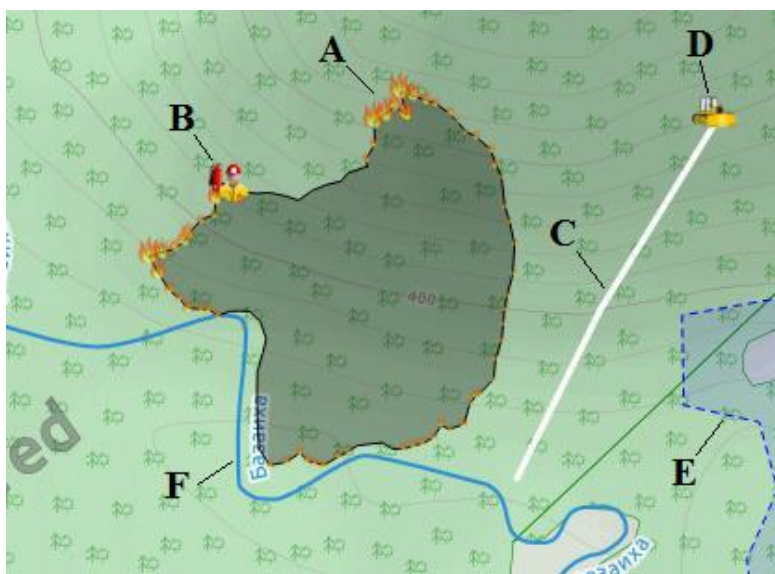


Рисунок 4– Пример работы агентно-ориентированной имитационной системы:

А – фронт процесса (агенты типа-А), **В** – команда противодействующих сил (агент типа-В), **С** – искусственное препятствие на пути распространения процесса, **Д** – бульдозер (агент типа-Д), **Е** – населенный пункт (объект защиты), **Ф** – река (естественное препятствие)

В п. 3.3 исследована точность моделирования параметров природных пожаров в разработанной системе. В качестве фактических данных используются статистические данные о зависимости площадей, пройденных пожарами, от природных и погодных условий, представленные в нормативных документах, регламентирующих борьбу с пожарами.

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

- комплекс природных и погодных данных ограничен данными, содержащимися в таблицах соответствующих регламентирующих документов;
- производилось моделирование свободно распространяющихся процессов, т. е. использовались только А-агенты;
- в качестве основного исследуемого параметра динамического процесса использовалась величина площади, охваченной распространяющимся процессом. Полученные значения площади в определенные моменты времени сравнивались с фактическими значениями, приведенными в регламентирующем документе.

Для нескольких (до семи) различных значений скоростей распространения фронта процесса было смоделировано по 5 вариантов

развития процесса, время распространения которых продолжалось 10 часов, причем в качестве результирующего значения эксперимента было принято среднее арифметическое по всем исследованным процессам. Общее количество смоделированных процессов равно 35. Для каждого процесса каждый час записывались данные о текущем значении общей площади, охваченной процессом. Моделирование производилось при различных скоростях и направлении ветра, а также при различных значениях показателя интенсивности протекания процесса в отсутствие факторов, усиливающих естественное протекание (ветра).

По результатам эксперимента были рассчитаны различные показатели ошибок: *средняя абсолютная ошибка (MAE) = 0,6673 га, средняя относительная ошибка (MAPE) = 4,085 %, средняя процентная ошибка (MPE) = -1,011 %, среднеквадратическая ошибка (MSE) = 1,6327*. В соответствии с требованиями регламентирующих документов, Можно утверждать, что предлагаемая модель с приемлемой точностью описывает прирост площади процесса по имеющимся данным. При этом следует учитывать простоту использованной математической модели процессов и, как правило, низкую точность измерения их параметров на практике. Проверка адекватности модели была выполнена с использованием формальных статистических критериев. Оценка нормальности выборки $S_{факт}$ показала, что закон распределения, которому принадлежит данная выборка значительно отличается от нормального. Следовательно, для проверки адекватности воспользовались непараметрическими критериями Вилкоксона для связанных выборок (Wilcoxon signed-rank test) и критерием Сиджела-Тьюки (Siegel-Tukey test). По результатам расчета данных критериев можно сказать, что реализованная модель процесса распространения природного пожара адекватна в принятых ограничениях, и ее можно использовать для решения практических задач.

Четвертая глава посвящена решению некоторых практических задач, возникающих при управлении динамическими процессами.

В п. 4.1 предложен алгоритм, позволяющий на основе разработанной агентной модели решать задачу расчета оптимальных локализационных траекторий, постановка которой приведена в параграфе 1.3.

В начале работы алгоритма на карте выбираются две точки. Это стартовые точки распространения динамического процесса и процесса локализации, который представляет собой области достижимости агента D (агента, используемого для построения заградительного барьера). Стартовую точку агента D обозначим маркером под номером 1.

Затем пошагово строятся оба процесса, 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 B 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. В этом случае считается, что локализация успешно завершена. В противном же случае построение локализационной траектории при заданных входных параметрах считается невозможным. Процесс локализации строится упрощенно, исходя из условия, что скорость движения агента D принимается равной в любом направлении движения.

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

В п. 4.2 приведена постановка задачи оптимального размещения агентов типа B , и их группировки (распределения) по локализуемым процессам по критерию наносимого стихийным процессом ущерба K_y . Задача решается при ограничении имеющихся ресурсов $R < R_{max}$.

Обозначим число имеющихся агентов B как N_A . В этом случае имеющиеся ресурсы – это как раз агенты типа B : $R = N_A \leq R_{max}$. В качестве критерия, характеризующего нанесенный процессом ущерб, принимаем площадь, охваченная процессом после локализации: $K_y = S$. Обозначим число возможных точек исходного размещения агентов B как N_p . Зная исходное расположение агентов типа B , можно построить оптимальные локализационные траектории для каждого из них, которые однозначно определяют смоделированную конфигурацию фронта процесса в каждый из моментов времени. Таким образом, мы имеем функцию (реализованную алгоритмически), отражающую множество возможных исходных точек расположения агентов B в количестве N_A на множество вещественных чисел (площадь поражения S): $S = F(X_1, \dots, X_{N_A})$. Здесь F - функция, реализуемая 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.

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:

$$\min S(Y), \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_C} y_{ijk} \leq 1 \quad \forall i = \overline{1, N_A}, \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{k=1}^{N_C} y_{ijk} \leq N_A, \quad (18)$$

$$y_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i = \overline{1, N_A}, j = \overline{1, N_p}, k = \overline{1, N_C}. \quad (19)$$

Подходы к решению подобных задач известны. В частности, к подобным задачам успешно применяются методы линеаризации с последующим решением задачи целочисленного линейного программирования, метод релаксаций, а также жадные алгоритмы. 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}^* , предложено использовать следующие:

Процедура №1. Изменение начального положения агента:

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

$j = \arg \min_{j = \overline{1, N_P}} S(Y')$, где Y' – измененная матрица Y^* , 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 (18).

Одной из эффективных схем организации глобального поиска является метод изменяющихся вероятностей (МИВЕР), который последовательно генерирует случайным образом начальные решения задачи псевдобулевой оптимизации. 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} .

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

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

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

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 $p_{ijk} = 1.5p_{ijk}$.

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

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.

В п. 4.3 представлен пример решения задачи оптимального размещения В-агентов с помощью предложенного алгоритма схемы МИВЕР и разработанной имитационной агентно-ориентированной системы.

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

В таблице 1 представлены результаты проведенных вычислительных экспериментов. Варианты различаются размером смоделированного ущерба – площади гари. При этом в качестве критерия 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.

Таблица 1 – 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

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты и выводы

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 основных публикаций по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

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

2. **Яровой С.В.**, Доррер 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.

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

4. **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.

5. 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.

6. 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.

7. **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.

В изданиях, индексируемых в базе Scopus:

8. 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.

9. 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.

10. **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.

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

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

Другие издания:

13. **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.

14. **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.

15. **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.

16. **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.

17. 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.

18. 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.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

19. **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.

20. 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.

21. 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.