

На правах рукописи



АБРАХИН Сергей Иванович

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2013

Работа выполнена на кафедре физики и прикладной математики ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

Научный руководитель

Аракелян Сергей Мартиросович
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Бутковский Олег Ярославович
доктор физико-математических наук,
профессор, Владимирский филиал
ФГБОУ ВПО «Финансовый универси-
тет при Правительстве Российской Фе-
дерации», профессор кафедры «Мате-
матика и информатика»

Демидов Константин Владимирович
кандидат физико-математических наук,
ООО «Фирма Инрэко ЛАН», г. Влади-
мир, генеральный директор

Ведущая организация

Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий), г. Москва

Защита состоится «15» ноября 2013 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.064.03 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, Иваново, Рабфаковская, 34, аудитория Б-237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01.
e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «10» октября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Шульпин Андрей
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам охраны окружающей среды и прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характеров. Для их решения необходим комплексный подход, с использованием больших объемов экологической, картографической и другой количественной информации о состоянии компонент природной среды, что требует использования современных инструментов математического моделирования. Наиболее эффективными методами обработки и анализа подобных объёмов информации на сегодняшний день являются методы, основанные на использовании географических информационных систем, позволяющих проводить одновременный анализ многомерных данных и аналитическую обработку с использованием цифровых карт. Это упрощает процедуры прогнозирования, делает их наглядными и позволяет оценить комплексное воздействие техногенных факторов на природную среду с возможностью оперативного выявления аномалий и принятия необходимых мер для их устранения. Поэтому разработка и создание новых подходов на основе достижений современных информационных технологий, а также адекватного математического обеспечения и предложение конкретных средств для моделирования и прогнозирования последствий ЧС является актуальной задачей в аспекте информационно-аналитического обеспечения и поддержки принятия управленческих решений.

Целью работы является разработка базовых методов для комплексного анализа, моделирования и прогнозирования последствий ЧС природного и техногенного характера с применением современных технологий математического моделирования и вычислительного эксперимента с отображением результатов в географической информационной системе (ГИС) и их использованием на конкретной территории – Владимирской области.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие **задачи**:

1) разработаны математические модели на базе утвержденных в Министерстве Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям, и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС) методик прогнозирования последствий распространения ЧС;

2) созданы алгоритмы для анализа многофакторных ситуаций, которые реализованы на базе ГИС ArcView Gis 3.3 и ArcGIS 9.3;

3) проведены вычислительные эксперименты по прогнозированию последствий ЧС с использованием данных по конкретной территории;

4) предложена технология и выполнена визуализация распространения последствий ЧС с применением ГИС-технологий;

5) предложены технологии для прогнозирования ряда ЧС.

Методы исследований

Поставленные задачи решались методами численного решения дифференциальных уравнений, теории нечетких множеств, вычислительного эксперимента.

Соответствие диссертации паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.13.18. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»:

в части формулы специальности – «...применение математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, фундаментальных и прикладных проблем...»;

в части области исследования – п. 5: «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента».

Достоверность основных научных положений и выводов работы подтверждается их сравнением с экспериментальными данными, а также опытом практического использования разработок в производственной и научной областях.

Обоснованность научных результатов подтверждается корректным использованием математического аппарата, адекватного решаемым задачам.

Научная новизна работы определяется разработкой в едином комплексе фундаментальных основ и прикладных методов для проведения математического моделирования, численных экспериментов и использования созданных комплексов программ для реализации сформулированной цели и решения обозначенных задач и сводится к следующему:

- разработке адекватных математических моделей и оригинальных алгоритмов для прогнозирования последствий ЧС, в том числе на базе теории нечетких множеств, опирающихся на утвержденные в МЧС методики;
- анализу точности оценки последствий ЧС, которые в значительной степени определяются правильным выбором управляющих параметров, положенных в основу вычислений;
- разработке методов компьютерной поддержки отображения последствий ЧС на основе ГИС-технологий с соответствующим программно-аналитическим обеспечением;
- созданию информационной системы с привязкой к реальной местности для наглядной оценки и анализа последствий ряда ЧС в динамике их развития;
- впервые проведенному с единых позиций зонированию и оценки риска конкретной территории (на примере Владимирской области) с учетом последствий и путей распространения ЧС – прорыва плотины, аварии на нефтепродуктопроводе, лесных пожаров.

Практическая ценность работы заключается в разработке и реализации математических подходов и методик, программных средств моделирования, анализа и прогнозирования последствий ЧС и путей их распространения, в т.ч. с применением аппарата нечетких множеств и ГИС-технологий.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели и алгоритмы, созданные в едином комплексе для моделирования, анализа и отображения последствий ЧС с применением аппарата нечетких множеств и ГИС-технологий.

2. Прикладные аспекты сопряжения разнообразных математических методов, моделей и алгоритмов с инструментарием современных информацион-

ных технологий, для которых разработаны соответствующие программно-аналитические модули, интерфейсы и сервисы.

3. Приложение разработанных подходов и методик для зонирования и оценки рисков конкретной территории (на основе созданной аналитической базы данных по Владимирской области) в условиях распространения последствий ряда ЧС: прорыва плотины, аварии на нефтепродуктопроводе, лесных пожаров.

Личный вклад автора состоит в самостоятельном проведении вычислительных экспериментов, а также в участии в обсуждениях на всех этапах работы, как при постановке задач, так и при реализации и интерпретации полученных результатов. Общее направление исследований определялось научным руководителем диссертации.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: «Экология речных бассейнов. Вторая международная научно-практическая конференция», 2002, г. Владимир; «Экология и рациональное природопользование», 2002, г. Санкт–Петербург, Санкт–Петербургский государственный горный институт (технический университет); «Математические методы, информационные технологии и физический эксперимент в науке и производстве». Научно-техническая конференция факультета информатики и прикладной математики, 2003, г. Владимир; «Современные геоинформационные системы для предупреждения и ликвидации ЧС. Теория и практика» Первая всероссийская конференция, 2003, г. Москва; «XII Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2005», 2005, г. Санкт–Петербург; «Экология речных бассейнов», 3-я международная научно-практическая конференция, 2005, г. Владимир; «XIII Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2006», 2006, г. Санкт–Петербург; «XIV Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика-2007», 2007, г. Санкт–Петербург; «XV Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2008», 2008, г. Санкт–Петербург; «XVI Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2009», 2009, г. Санкт–Петербург; «Интеллектуальные системы (INTELS 2010)», Девятый Международный симпозиум, 2010, г. Владимир.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 24 изданиях, в том числе в 11 статьях, из которых 4 – из списка ВАК Минобрнауки, а также представлены в научно-технических отчетах НИР в рамках ряда федерально-целевых и ведомственных научно-технических программ, в том числе для решения задач в сфере ответственности региональных подразделений МЧС. Имеется 5 свидетельств об официальной регистрации разработанных программ на ЭВМ.

Объем и структура диссертации

Диссертация изложена на 184 страницах машинописного текста. Состоит из введения, четырех глав, списка использованных источников из 83 наименований, заключения и 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цели и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе, являющейся обзорной, проводится анализ вопросов, связанных с прогнозированием последствий ЧС. Рассмотрены вопросы об опережающем отражении развития ЧС на основе информации об объекте прогнозирования, раскрывающей его характер на разных временных промежутках, а также закономерностей его функционирования, и использовании профильной информации для построения математической модели поведения объекта, которая позволяет с использованием того или иного математического аппарата определять неизвестные параметры модели, прогнозировать состояние интересующего объекта в некоторые будущие интервалы времени.

Основу существующих методов, способов и методик прогнозирования составляют два подхода – эвристический и математический. Суть эвристического подхода состоит в использовании мнений специалистов-экспертов. Он предпочтителен для прогнозирования многофакторных и комплексных процессов, формализовать которые сложно, но по истории развития которых, имеется достаточное количество данных на основе предшествующего опыта.

Математический подход заключается в использовании имеющихся данных о некоторых базовых характеристиках прогнозируемого объекта, их обработке математическими методами, моделировании и в итоге – получении зависимости, связывающей указанные характеристики со временем, в т.ч. в рамках определенных уравнений, и вычислении с помощью найденной зависимости характеристик объекта в нужный момент времени.

Оба этих подхода предполагают применение математических методов обработки данных и/или экстраполяции известных в предыдущие периоды времени зависимостей на нужный временной интервал.

В настоящее время накоплен значительный объем утвержденных методик оперативного прогнозирования последствий ЧС природного и техногенного характера. Акцент в данной главе сделан на анализе математических методов.

Важным блоком в задачах математического моделирования в прикладном аспекте является привязка к конкретным особенностям территорий, которая требует визуализации расчетных данных. Наиболее эффективными для этих задач являются ГИС, позволяющие проводить моделирование ЧС, географических условий и рельефа местности, а также автоматизировать районирование территорий по комплексу признаков, причем обмен данными между использованными моделями и ГИС является двунаправленным. Исходные данные для моделирования берутся из ГИС. В свою очередь, ГИС отображают результаты моделирования.

При решении задач математического моделирования в различных областях особое внимание разработчиков прикладных систем уделяется построению моделей, основанных на нечетких, приближенных рассуждениях экспертов и использованию их в компьютерных системах. Этот подход описан в теории не-

четких множеств. Применение данного аппарата в задачах математического моделирования ЧС обусловлено тем, что описание условий и методов решения задачи происходит на языке, близком к естественному, а также тем, что согласно теореме ФАТ (Fuzzy Approximation Theorem) любая математическая система может быть аппроксимирована соответствующей системой, основанной на нечеткой логике.

Во второй главе, являющейся базовой, рассмотрены общие принципы математического прогнозирования последствий ЧС и разработан ряд общих моделей в соответствии с выбранными уравнениями для трех типов ЧС – прорыва плотины, аварии на нефтепродуктопроводе, распространения лесных пожаров.

Основные этапы работы над моделями прогнозирования последствий ЧС:

- сбор и обработка исходных данных, выбор и обоснование математических моделей по объекту прогнозирования;
- обработка информации об объекте прогнозирования, получение исходных данных для прогнозирования из ГИС;
- непосредственно прогнозирование – получение характеристик объекта в требуемый момент времени в будущем, исходя из его состояния в настоящее время;
- отображение результатов прогнозирования в ГИС.

В результате проведенных исследований решена задача математического обеспечения прогнозирования последствий ЧС, связанной с разрушением плотины на реке, разработаны математические модели для оценки последствий аварии на магистральном нефтепродуктопроводе, созданы алгоритмы для прогнозирования путей и темпов распространения возникших лесных пожаров.

Для решения задачи прогнозирования распространения волны прорыва речной плотины использовано одномерное уравнение кинематической волны, которое описывается следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} &= R_{oc} - I, \\ q &= \alpha \cdot \xi^m, \end{aligned} \quad (1)$$

где ξ – глубина слоя поверхностного стока; q – объём воды, проходящий через русло реки за единицу времени; R_{oc} и I – интенсивности осадков и фильтрации, соответственно; α и m – параметры, которые определяются в виде $\alpha = \sqrt{i_0 C}$; $m = \frac{3}{2}$ для квадратичного закона сопротивления водному потоку, i_0 – уклон дна, C – коэффициент шероховатости Шези для сухого русла.

Для замыкания задачи (1) необходимо задать начальные и граничные условия на пространственно-временной области $G = [0 \leq x \leq a], [0 \leq t \leq T]$.

Начальные условия определяются условием:

$$\xi(x, t)|_{t=0} = \xi(x, 0) = \xi_0(x), \quad 0 \leq x \leq a, \quad (2)$$

где a рассматриваемая дистанция распространения.

Для граничных условий имеем:

$$\xi(x, t)|_{x=0} = \xi(0, t) = \xi_1(t), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (3)$$

Получена явная разностная схема для численного решения задачи (1) – (3), для вычисления глубины стока в узлах равномерной сетки с шагами δ по координате и τ по времени:

$$\xi_{i+1,j} = \xi_{i,j} - \alpha_j \cdot m \cdot \frac{\tau}{\delta} \cdot (\xi_{i,j}^m - \xi_{i,j-1}^m) + (R_{oc} - I)_{i,j}. \quad (4)$$

При заданных начальных и граничных условиях, используя уравнение (4), находятся значения во всех узлах сетки, а, следовательно, и решение задачи (1) – (3). При этом третий член в правой части уравнения (4), отвечающий за осадки и фильтрацию, можно не учитывать, так как они не оказывают существенного влияния на результаты прогнозирования движения волны прорыва. Построенная разностная схема имеет первый порядок аппроксимации, с условием устойчивости:

$$\frac{1}{\tau} \geq \frac{\alpha m \xi^{m-1}}{\delta}. \quad (5)$$

Разработанная математическая модель использована в дальнейшем для отображения результатов моделирования на электронной географической карте.

В работе проведено моделирование распространения разлива нефтепродуктов при авариях на нефтепродуктопроводе. При возникновении аварии на магистральном нефтепродуктопроводе количество вытекшей нефти разделяется на три составляющие части: (1) нефть, оставшаяся на поверхности грунта, (2) нефть, впитавшаяся внутрь грунта (фильтрация), и (3) нефть, которая испарилась в атмосферу.

Проведено моделирование для случая (1) и рассмотрено распространение потока вылившейся нефти по земной поверхности. Процесс данного распространения жидкости в гидрологии называется процессом формирования стока. Механизм формирования стока нефтепродуктов аналогичен механизму формирования стока воды в речном водосборе. В связи с этим, в качестве математического аппарата, описывающего процесс формирования стока нефтепродуктов, используются математические модели, описывающие движение водных ресурсов (формирование стока воды), как в виде одномерного потока в установившихся руслах, так и в виде двумерного открытого потока с подвижными границами.

Уравнения, которые определяют формирование речного стока воды на поверхности водосбора, и соответствуют данной модели, представлены в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R_{oc}(x, y) - I(x, y), \\ q_x = f_1(\xi), \\ q_y = f_2(\xi), \end{cases} \quad (6)$$

где ξ – слой поверхностного стока, R_{oc} – в данном случае интенсивность вытекания нефти, I – интенсивность фильтрации (просачивания нефти в почву).

Уравнение (6) рассматривается в области

$$D = \left\{ (x, y, t): 0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, \right. \\ \left. 0 \leq t \leq T \right\}$$

при начальных условиях $\xi(x, y, t)|_{t=0} = \xi(x, y, 0) = \xi_0(x, y), (x, y) \in S$,
 при граничных условиях: $\xi(x, y, t) = \mu_1(t), (x, y) \in \Gamma, 0 \leq t \leq T$,
 где S – область нефтесбора, Γ – его граница, ξ_0 и μ_1 – заданные функции, конкретизирующие в нашем случае условия вытекания, нефтепродуктов из нефтепродуктопровода.

Для решения поставленной задачи, строится явная разностная схема, на равномерной сетке с шагами h по координатам и τ по времени. Для конечно-разностной аппроксимации производных использован пятиточечный шаблон. В результате, получена явная разностная схема первого порядка аппроксимации:

$$\xi_{i,j}^{k+1} = \xi_{i,j}^k + \tau(R_{oc} - I)_{i,j} - b_x^+((\xi_{i,j}^k)^m - (\xi_{i-1,j}^k)^m) - b_x^-((\xi_{i+1,j}^k)^m - (\xi_{i,j}^k)^m) - b_y^+((\xi_{i,j}^k)^m - (\xi_{i,j-1}^k)^m) - b_y^-((\xi_{i,j+1}^k)^m - (\xi_{i,j}^k)^m), \quad (7)$$

где $b_x = \frac{sgnI_x \alpha_{1x} m \tau}{h}$, $b_y = \frac{sgnI_y \alpha_{1y} m \tau}{h}$, $\begin{cases} b_x^+ = \frac{(b_x + |b_x|)}{2} \\ b_x^- = \frac{(b_x - |b_x|)}{2} \end{cases}$ и $\begin{cases} b_y^+ = \frac{(b_y + |b_y|)}{2} \\ b_y^- = \frac{(b_y - |b_y|)}{2} \end{cases}$

$sgnI_x, sgnI_y$ – знак уклона дна;

с условием устойчивости: $\frac{\tau}{h} \leq \frac{1}{2\alpha_1 m \xi^{m-1}}$. (8)

При заданных начальных и граничных условиях, используя соотношение (7), определены значения ξ во всех внутренних узлах сетки, а, следовательно, и решение задачи (6).

В основу математической модели распространения возникшего лесного пожара положена «Методика оперативной оценки последствий лесных пожаров», утвержденная МЧС (далее – методика). Данная методика предназначена для прогнозирования последствий крупных лесных пожаров и может быть использована для оперативной оценки последствий лесных пожаров и принятия управленческих решений.

При построении математической модели слой горючего материала рассматривается в декартовой системе координат (x, y) . За контур пожара $G(t)$ принимается область охваченная огнем к определенному моменту времени. Кромка $K(t)$ лесного пожара определяется как граница контура. В каждый момент времени t кромка пожара представляет собой замкнутую линию. Целью прогнозирования является определение контура пожара $G(t+\Delta t)$ в момент времени $t+\Delta t$ по известному контуру $G(t)$ в момент времени t (рис. 1).

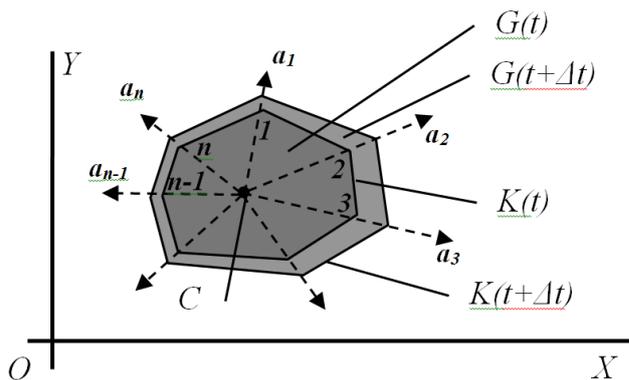


Рис. 1. Прогнозирование распространения контура пожара

Считается, что распространение пожара происходит от центра масс контура горения в направлении вектора a_i , соединяющего центр масс с каждым i -ым направлением. Вычисление нового местоположения кромки пожара определяется согласно соотношениям:

$$\begin{aligned}
 x_i(t+\Delta t) &= x_i + \Delta x_i, & \Delta x_i &= d_i \cos(\alpha), \\
 y_i(t+\Delta t) &= y_i + \Delta y_i, & \Delta y_i &= d_i \sin(\alpha), \\
 d_i &= v_i \Delta t,
 \end{aligned}$$

где α – азимут вектора a_i (угол, образованный направлением на север (ось OY) и вектором a_i), Δx_i – приращение по оси OX , Δy_i – приращение по оси OY , v_i – линейная скорость распространения пожара в i -том направлении, Δt – шаг по времени, d_i – линейное приращение контура горения по направлению вектора a_i

Таким образом, для того чтобы определить положение кромки пожара в следующий момент времени, необходимо определить линейные скорости v_i распространения лесного пожара по направлениям векторов a_i (рис. 2).

Основными элементами распространения лесного пожара являются 4 позиции: фронт, правый и левый фланги, тыл, которые определяются следующим образом:

- фронт – наиболее быстро распространяющаяся в направлении ветра кромка пожара;
- тыл –двигающаяся против ветра кромка огня;
- фланги – продвигающаяся перпендикулярно ветру кромка пожара.

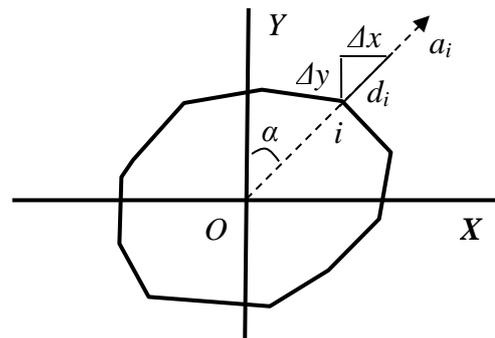


Рис. 2. Определение нового местоположения точек кромки пожара

Характер распространения лесного пожара в направлениях фронта, тыла и флангов хорошо изучен, и соответствующие скорости распространения лесного пожара можно оценить из графиков зависимостей скорости распространения лесного пожара от скорости ветра, типа пожара, класса лесных насаждений и прочих параметров, влияющих на распространение огня. Эти данные приведены в методике МЧС. Для определения соответствующих приближений указанных зависимостей используются методы аппроксимации функций полиномом пятой степени по методу наименьших квадратов.

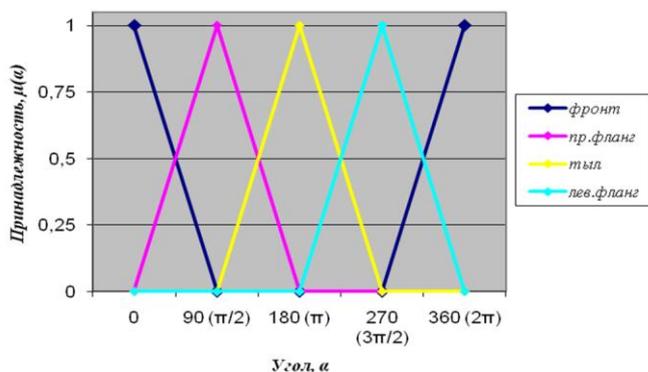


Рис. 3. Представление нечеткой переменной

функции принадлежности треугольного вида (рис. 3). В дальнейшем при проведении дополнительных и более детальных исследований их вид может быть изменен для достижения более точных результатов прогноза; при этом сама математическая модель останется без изменений.

Математическая модель вычисления линейной скорости распространения лесного пожара базируется на применении аппарата нечетких множеств. Она заключается в анализе каждой точки контура горения пожара по отношению к нечетким множествам, характеризующим «фронт», «правый фланг», «тыл», «левый фланг» лесного пожара. Используются нормальные

Для проведения анализа продвижения лесного пожара по каждому направлению к точке кромки пожара на предмет принадлежности к нечетким множествам необходимо определить угол отклонения α_i направления на каждую точку от направления ветра (рис. 4).

После проведения анализа на принадлежность каждой точки контура горения к фронту, тылу и соответствующему флангу (в зависимости от угла отклонения, от направления севера), получены 4 значения степеней принадлежности, которые используются для расчета скорости v распространения пожара в соответствующих направлениях.

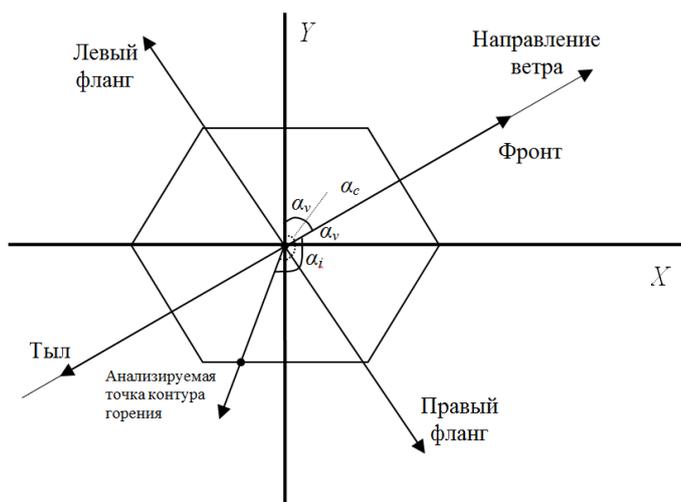


Рис. 4. Угол отклонения направления на заданную точку контура горения

вого фланга, тыла и левого фланга, соответственно (определяются по обозначенной методике).

Достоинством изложенного метода является то, что он позволяет анализировать каждую точку не только в отношении принадлежности к тому или иному множеству (фронт, тыл, правый и левый фланги), но и учитывает все значимые характеристики – погодные и лесные – на анализируемой территории.

В третьей главе проводится разработка и реализация методов получения базовых данных для прогнозирования последствий распространения ЧС на основе математических моделей, рассмотренных во второй главе, в ассоциации с методами отображения результатов прогнозирования последствий распространения ЧС при использовании ГИС-технологий.

Для оценки последствий ЧС, связанной с прорывом плотины, в качестве эталона прогнозирования и оценки масштабов затопления местности применена программа «Волна 2.0», которая представляет собой программную реализацию утвержденной в МЧС методики оценки последствий разрушения гидроузлов.

Для получения данных о створах по руслу реки создана электронная карта конкретной местности района водохранилища и русла реки ниже по течению относительно гидроузла. Для получения прогноза местность, расположенная ниже по течению реки относительно гидроузла, разбита на створы – перпендикулярные сечения к руслу реки; они представлялись как новые линейные слои.

Полученные степени принадлежности играют роль коэффициентов в соотношении для скорости распространения кромки пожара, используемого для определения местоположения кромки пожара на следующем временном шаге.

Его можно записать в виде:

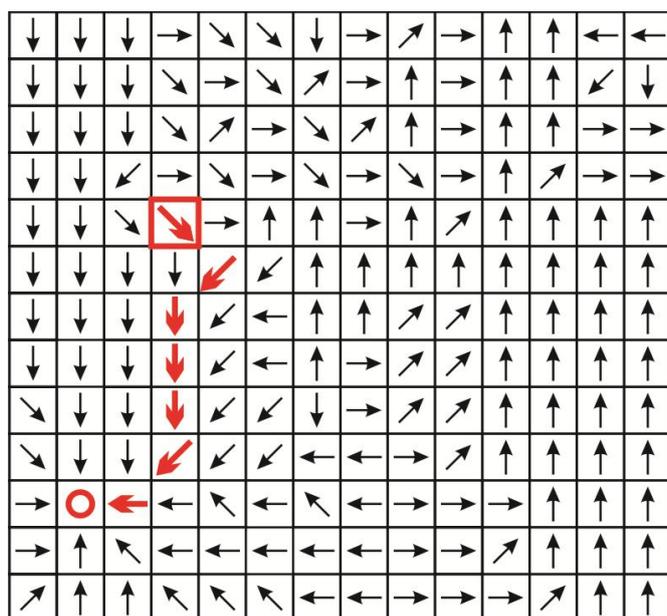
$$v = \alpha \times v_{фр.} + \beta \times v_{н.ф.} + \gamma \times v_{т.} + \delta \times v_{л.ф.},$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты, характеризующие степень принадлежности; $v_{фр.}, v_{н.ф.}, v_{т.}, v_{л.ф.}$ – скорости перемещения фронта, правого фланга, тыла и левого фланга, соответственно (определяются по обозначенной методике).

Необходимыми данными о створе реки являются: удаление створа от гидроузла, отметка уреза воды, глубина и ширина реки, скорость течения. В данные о створе включается информация о правом и левом берегах реки, а именно – отметки высоты согласно принятой системе высот: 3-х горизонталей и расстояния от оси реки до этих горизонталей. После получения исходных данных для моделирования выполняется расчет параметров волны прорыва с использованием программы «Волна 2.0». Вычисляется максимальный уровень затопления в каждом створе и максимальная отметка высоты уровня затопления согласно принятой системе высот.

После проведения вычислений строятся зоны затопления для каждого створа. Для этого в атрибутивной информации линейных слоев, характеризующих створы по реке, добавляется информация о максимальной глубине затопления и максимальной отметке затопления, в соответствии с проведенными вычислениями. Зона затопления строится как поверхность, соответствующая максимальной отметке затопления.

Операции по получению исходных данных для вычислений, а также процедуры построения зон затопления автоматизированы. В процессе реализации вычислений был разработан ряд оригинальных методов получения исходных данных для моделирования волны прорыва, а также технологии отображения полученных результатов.



-  – начальная ячейка наиболее вероятного пути водотока,
-  – наиболее вероятный путь водотока,
-  – конечная точка (локальный минимум)

Рис. 5. Выделение наиболее вероятного пути водотока в полностью заполненной решетке направлений

Данная задача решена на основе средств модуля Spatial Analyst системы ArcView GIS, который имеет группу функций для поддержки гидрологического

При моделировании распространения нефтепродуктов как движения жидкого потока в установившихся руслах при возникновении аварии на нефтепродуктопроводе, решена задача поиска пути наиболее вероятного водотока с применением метода D-8, который строит решетку направлений потока из цифровой модели рельефа (ЦМР) анализируемой местности. Метод определяет максимальный уклон между каждой ячейкой ЦМР и 8-ю соседними ячейками, и показывает направление потока из каждой ячейки ЦМР.

Наиболее вероятный путь движения жидкости (рис. 5) состоит из ячеек, связанных между собой. Переход от ячейки к ячейке осуществляется в соответствии с извлеченным из решетки направлений направлением потока.

моделирования. Гидрологические функции позволяют на основе ЦМР выделить гидрологические водосборы и построить решетку направлений разной подробности, что и использовалось в расчетах.

В процессе построения наиболее вероятного пути водотока присутствует вероятность попадания в ячейку, которая соответствует локальному понижению рельефа.

При попадании в такую ячейку переход к следующей ячейке в пути наиболее вероятного водотока осуществляться не будет.

Для решения этой проблемы находится точка, в которой жидкость вытекает из области водораздела (водораздел – это область в которую входят все ячейки, наиболее вероятный путь водотока для которых заканчивается в одной точке локального понижения рельефа) – это самая низкая точка на границе водораздела. Считается что при этом происходит заполнение соответствующего объема разлившимися нефтепродуктами.

Для продолжения наиболее вероятного пути водотока берется уже найденная ячейка с минимальной высотой на границе водораздела. Среди её соседних ячеек, не принадлежащих данному водоразделу, ищем начальную точку следующего участка пути наиболее вероятного водотока по методу D-8. С помощью такой процедуры решается проблема с локальным понижением рельефа.

Для прогнозирования распространения лесных пожаров, решены задачи аналитической геометрии. В данной задаче полигон, представляющий контур пожара разбивается на множество точек; при этом первоначально он разделяется на множество отрезков $\{(1,2);(2,3);...;(n-1,n);(n,1)\}$, образующих замкнутый контур (рис. 2). Каждый отрезок, для которого известны координаты начала и конца отрезка (x_1, y_1) и (x_2, y_2) разбивается на множество точек с заданным интервалом. Чтобы найти координаты точки (x,y) , находящейся внутри отрезка, составляется каноническое уравнение прямой, проходящей через две точки:

$$\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x - x_1 & y - y_1 \end{vmatrix} = 0, \quad \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}, \quad y = y_1 + \frac{(x - x_1)(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}.$$

Согласно предложенной математической модели распространение пожара производится от центра масс области (полигона), характеризующего контур пожара. Для координат точки, являющейся центром данной области, считается, что все точки контура горения имеют одинаковую единичную массу: $m_i = 1$ при $\forall i$. Тогда координаты центра масс в области определяются соотношением:

$$\vec{R} = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i},$$

где r_i – радиус-вектор i -той точки контура горения, который совпадает с ее координатами.

Поскольку $m_i = 1$ при $\forall i$, то $\vec{R} = \sum_i \vec{r}_i / n$,

где n – количество точек, на которые разбит контур горения при проводимом векторном суммировании (т.е. координаты x_i и y_i складываются отдельно). Получаемые в результате расчетов координаты вектора совпадают с координатами центра масс.

Для определения угла отклонения на фиксированную точку (см. рис. 4) решается тригонометрическая задача определения градусной меры угла отклонения этого направления на точку от направления ветра, проходящего через центр масс контура горения. Начало отсчета углов отклонения точки контура пожара производится от направления на север.

Если координаты «северного» вектора – (x_0, y_0) , координаты анализируемой точки кромки пожара – (x_i, y_i) , то обсуждаемое отклонение от направления на север запишется в виде:

$$\alpha_c = \arccos \frac{x_0 x_i + y_0 y_i}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2} \sqrt{x_i^2 + y_i^2}}.$$

Угол между направлением ветра и направлением на анализируемую точку кромки пожара α_i определяется в виде:

$$\alpha_i = \begin{cases} \alpha_c - \alpha_v, & \alpha_c > \alpha_v \\ 360 + (\alpha_c - \alpha_v), & \alpha_c < \alpha_v \end{cases}.$$

Эти соотношения позволяют проводить дальнейшую процедуру прогнозирования.

В четвертой главе приведены результаты использования разработанных математических моделей распространения последствий ЧС и их отображения в наглядном виде для информационно-аналитического обеспечения поддержки принятия решений на базе адаптированного к данным задачам инструментария ГИС-технологий.

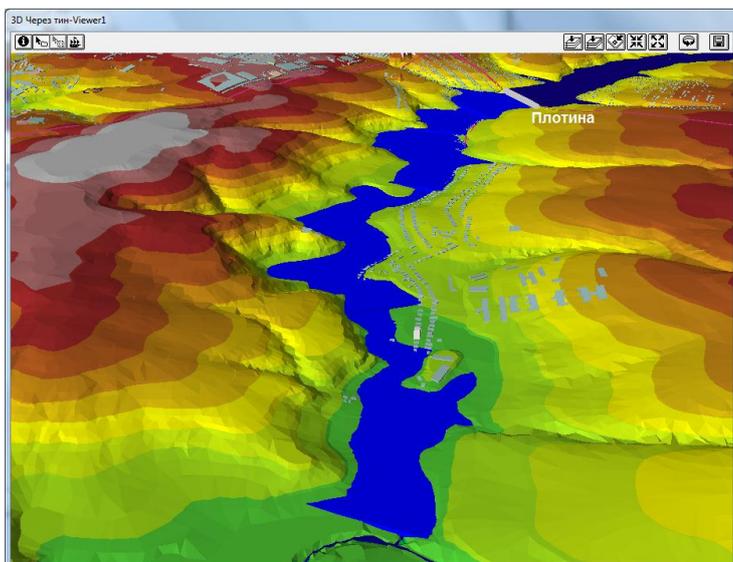


Рис. 6. Прогноз распространения волны прорыва речной плотины

Полученные с помощью программы «Волна 2.0» результаты прогноза о динамике распространения волны прорыва плотины, были отображены на созданной для этих целей электронной карте (рис. 6). Прогноз выполнен при условии полного взрывного/мгновенного разрушения плотины (наихудший вариант развития событий).

Полученные результаты обладают существенным недостатком: «дискретностью» отображения зон затопления, который связан с ограничением, налагаемым

программой «Волна 2.0»: моделирование проводится лишь для восьми створов. Для моделирования на расстояние в несколько километров этого часто бывает недостаточным.

Для решения данной проблемы была использована математическая модель движения волны прорыва, описанная в главе 2 и основанная на уравнении кинематической волны. На основе данной модели создана информационная система, с применением ГИС-технологий, которая позволяет прогнозировать динамику распространения волны прорыва в виде характерных зон затопления. Прогноз осуществлен на примере плотины на р. Содышка в окрестностях г. Владимира (рис. 7).

Погрешность вычислений по сравнению с эталонной программой «Волна 2.0» не превысила 5%.

Разработанная система прогнозирования внедрена в опытную эксплуатацию в центре мониторинга ЧС управления по делам ГО и ЧС г. Владимира для осуществления оперативной оценки возможных последствий прорыва плотины на р. Содышка.

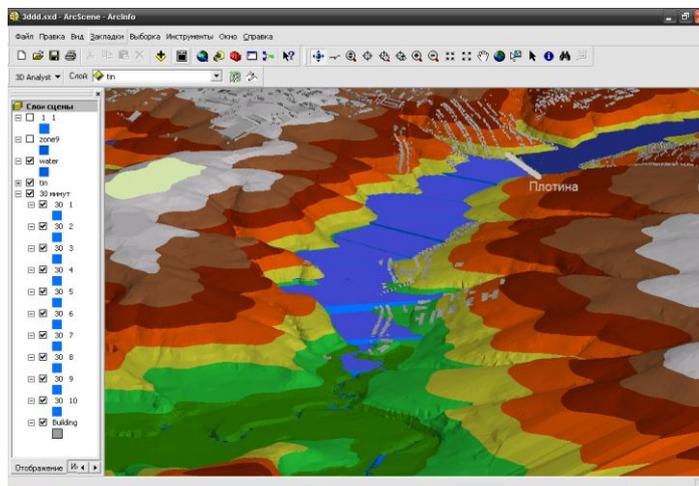


Рис. 7. Прогноз распространения волны прорыва через 30 мин после аварии

Для моделирования распространения загрязнений при аварии на нефтепродуктопроводе в качестве картографической основы использована карта масштаба 1:200000 части Александровского района Владимирской области с

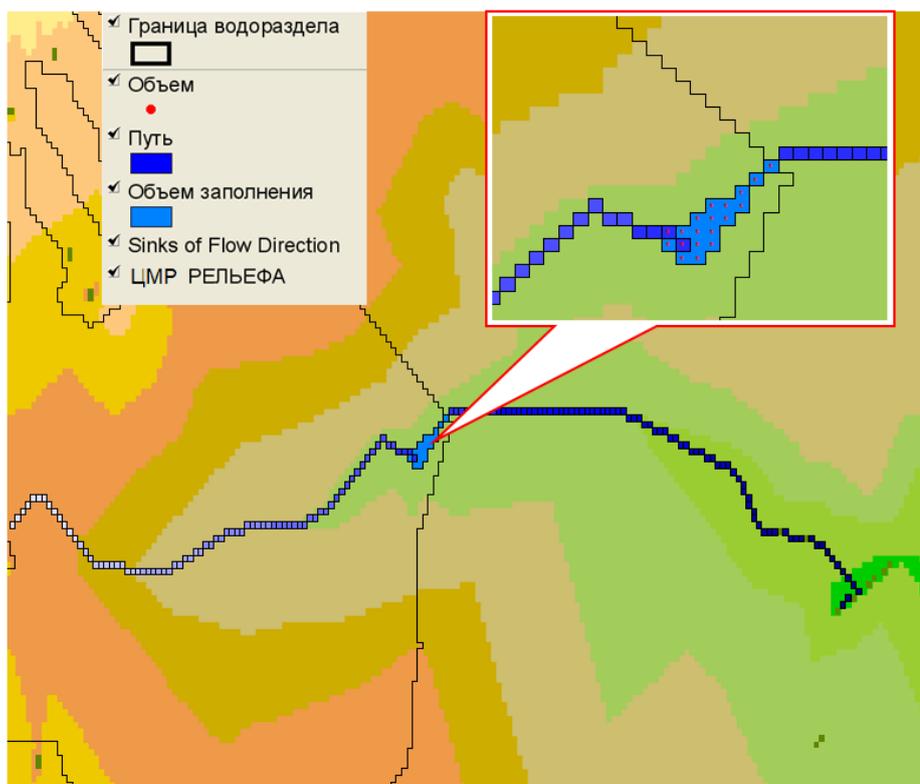


Рис. 8. Прогноз распространения нефтепродуктов в установившихся руслах

нефтепродуктопроводом Ярославль-Москва. С помощью модуля Spatial Analyst создана цифровая модель рельефа (ЦМР), для которой были применены подходы, описанные в предыдущих главах.

Результаты прогнозирования путей распространения нефтепродуктов, как одномерного потока в установившихся руслах, показаны на рис. 8.

Динамика распространения нефтепродуктов для случая моделирования дву-

мерного открытого потока с подвижными границами представлена на рис. 9.

Результаты моделирования аварийных ситуаций при эксплуатации нефтепродуктопроводов являются основой для оценки и расчета вредного воздействия последствий аварийных разливов на население и территорию.

Они могут быть использованы также для планирования мероприятий по ликвидации последствий этого аварийного разлива, в т.ч. финансовых затрат для утилизации разлившейся нефти и восстановления загрязненной почвы, расчета необходимых сил и средств для проведения требуемых работ.

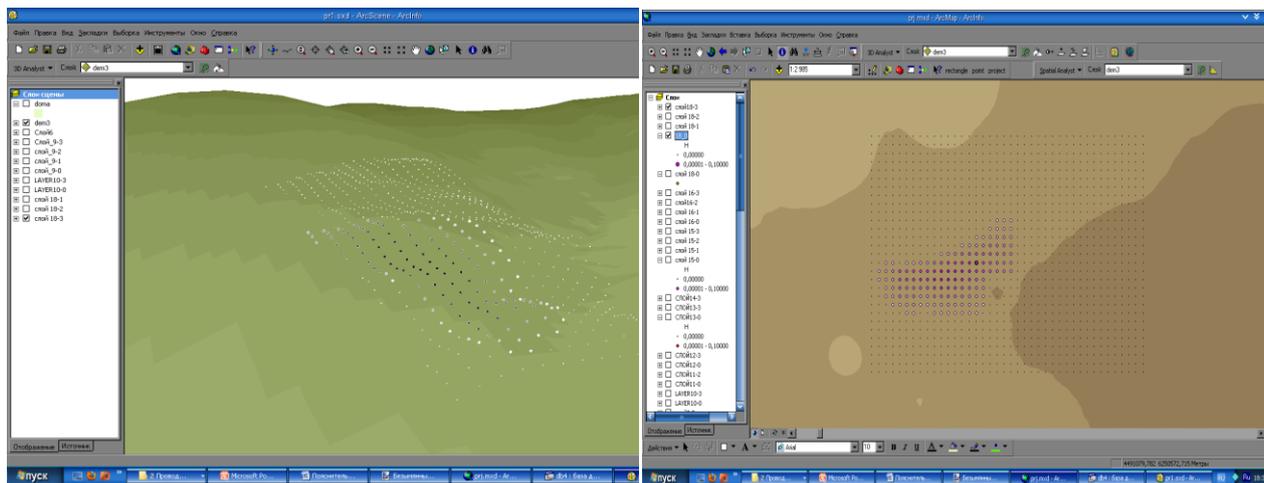


Рис. 9. Прогноз распространения нефтепродуктов через 2 часа после аварии

Для прогнозирования лесных пожаров, в качестве картографической основы была использована специально созданная для этих целей карта лесных кварталов Владимирской области. Лесные массивы на этой карте разбивались на отдельные полигоны – лесные кварталы, атрибутивные данные по которым содержат информацию о классе горимости лесных насаждений и другую необходимую техническую информацию.

На основе разработанных в предыдущих главах подходов к прогнозированию распространения лесных пожаров создана информационно-аналитическая система с привязкой к реальной местности, позволяющая получать прогнозы распространения пожаров в наглядной форме на электронной карте, например, контуры горения в зависимости от времени распространения пожара при изменении направления ветра (рис. 10).

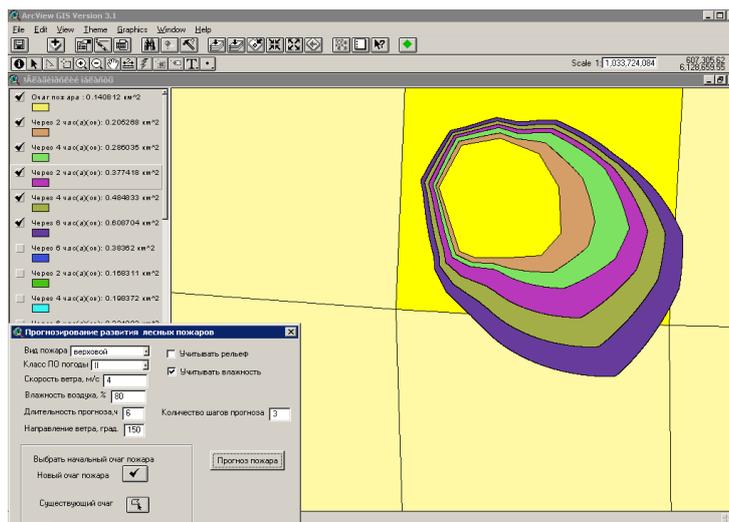


Рис. 10. Прогноз распространения пожара при изменении направления ветра

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе, сводятся к разработке математических моделей на базе утвержденных в МЧС методик прогнозирования последствий ЧС различного типа и предложению ряда оригинальных методов по компьютерной поддержке отображения ЧС и их последствий:

1. Построена математическая модель прогнозирования процесса распространения волны прорыва, возникающей вследствие одновременного (взрывного) разрушения плотины, на основе уравнения кинематической волны. Предложены и реализованы автоматизированные методики получения исходных данных для моделирования волны прорыва, а также методики отображения результатов моделирования на электронной карте.

2. Созданы математические модели путей распространения разлива нефти при аварии на нефтепродуктопроводе. Процесс распространения нефтепродуктов описывается или как движение одномерного неустановившегося потока жидкости в русле, или как движение двумерного открытого потока с подвижными границами.

3. На основе утвержденной методики оперативной оценки последствий лесных пожаров разработана математическая модель прогнозирования путей распространения лесных пожаров с использованием аппарата нечетких множеств, позволившая выявить ряд ключевых параметров, существенно влияющих на распространение пожара.

Прикладной аспект выполненной работы связан с опытным внедрением принципиальной части полученных результатов в виде прототипа программно-аналитического комплекса, который основывается:

- на разработанных методиках, реализованных на базе ГИС «ArcView Gis» и «ArcGIS»;
- на созданных электронных географических картах для получения исходных данных по моделированию и прогнозированию последствий распространения ЧС, а также визуализационному отображению результатов моделирования;
- на результатах выполненных вычислительных экспериментов по прогнозированию последствий распространения ЧС с возможностью широкого варьирования значениями управляемых параметров.

Информационно-аналитическая поддержка и обеспечение принятия управленческих решений при оценке возможных последствий рассмотренных ЧС связана с получением наглядных картин отображения этих последствий в динамике распространения ЧС с применением ГИС-технологий для трех типов ЧС – для прорыва речной плотины, для распространения нефтепродуктов при аварии на нефтепродуктопроводе, для распространения пожара в лесных массивах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Духанов А.В., Бухановский А.В., Абрахин С.И., и др. Облачные технологии в задачах интерактивной 3D-визуализации: опыт организации межвузовской мобильности молодых ученых // под. ред. д. т. н., проф. В. Б. Авдеев. - Москва: Радиотехника, 2012. – № 11. – С. 25-33. - 81 с. - ISSN 2070-0814.
2. Абрахин С. И., Троицкий Д.П., Шамин П.Ю., Пухов А.В. Разработка методов оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Современные проблемы науки и образования –Москва: Академия естествознания – 2012 – № 6, С. 57 – ISBN 1817-6321
3. Абрахин С.И. Прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера с применением ГИС технологий // Современные наукоемкие технологии М.: РАЕ – 2008 – № 3, С. 20.
4. Абрахин С.И., Прокошев В.Г., Зуев К.И., Трифонова Т.А., Аракелян С.М. Прогнозирование процессов нефтяных загрязнений в природных средах при аварии на нефтепроводе с применением математических моделей // Записки горного института – Санкт-Петербург: СПбГУ – 2001 – №3, С. 269.

Свидетельства об официальной регистрации программ на ЭВМ

1. Абрахин С.И., Аракелян С.М., Прокошев В.Г. Информационно-аналитическая система прогнозирования распространения лесных пожаров. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2012610059, Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 10 января 2012 г.
2. Абрахин С.И., Аракелян С.М., Прокошев В.Г. Информационная система прогнозирования последствий прорыва плотины на реке. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2012610060, Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 10 января 2012 г.
3. Аракелян С.М., Абрахин С.И., Духанов А.В., Рожков М.М., Черанев И.Е. База данных специализированных репозитариев информационных ресурсов науки и образования. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2009620463, Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 18 сентября 2009 г.
4. Аракелян С.М., Абрахин С.И., Тулякова И.В., Бойкова Е.В., Троицкий Д.П., Князев К.А. Ситуационный центр региональной информационно-аналитической системы внешнего финансового контроля. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2009612876, Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 03 июня 2009 г.
5. Рычагов М.Г., Прокошев В.Г., Абрахин С.И., Квасов Д.С. Система анализа информационно-аналитического комплекса «Внешний государственный финансовый контроль» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2007611385, Дата регистрации в Реестре программ для ЭВМ – 29 марта 2007 г.

Публикации в других изданиях

1. Абрахин С.И., Давыдов Н.Н., Осокин А.А. Математическое моделирование движения волны при прорыве плотины // Технологии обеспечения комплексной безопасности, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций – проблемы, перспективы, инновации: материалы XVI международной научно-практической конференции – Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011 – С. 297-297.
2. Абрахин С.И., Чугунова Н.Е. Прогнозирование последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Технологии обеспечения комплексной безопасности, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций – проблемы, перспективы, инновации: материалы XVI международной научно-практической конференции, – Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011 – С. 298-298.

3. Абрахин С.И., Климошенко Н.В. Моделирование распространения лесных пожаров. // Технологии обеспечения комплексной безопасности, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций – проблемы, перспективы, инновации: материалы XVI международной научно-практической конференции – Москва: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011 – С. 299-299.
4. Абрахин С.И., Аракелян С.М., Прокошева Н.С., Прокошев В.Г., Трифонова Т.А. Математическое моделирование и прогнозирование последствий аварии на магистральном нефтепроводе // Экология речных бассейнов»: материалы второй международной научно-практической конференции – Владимир: ВлГУ – 2002, С. 219-221.
5. Абрахин С.И., Лапшин В.В., Прокошев В.Г., Трифонова Т.А. Математическая модель разлива нефти на основе численного расчета двумерного открытого потока с подвижными границами // Телематика 2003: материалы конференции – том 1 – Санкт-Петербург: СПБИТМО – 2003г, С. 224.
6. Абрахин С.И., Ивакина Е.А., Прокошев В.Г., Трифонова Т.А. Информационно-аналитическая система мониторинга и прогнозирования лесных пожаров // Телематика 2003: материалы конференции – том 1 – Санкт-Петербург: СПБИТМО – 2003 г, С. 24-25.
7. Абрахин С.И., Прокошев В.Г., Аракелян С.М. Математическое моделирование и прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций с применением ГИС-технологий. // Математические методы, информационные технологии и физический эксперимент в науке и производстве: материалы научно-технической конференции факультета информатики и прикладной математики – Владимир: ВлГУ – 2003, С. 47.
8. Абрахин С.И., Прокошев В.Г., Аракелян С.М., Трифонова Т.А. Информационно аналитическая система мониторинга и прогнозирования распространения лесных пожаров // Алгоритмы, методы и системы обработки данных – Муром: МИ ВлГУ – 2004 – № 9-1. С. 140-148.
9. Абрахин С.И., Прокошев В.Г., Аракелян С.М. Математическое моделирование последствий прорыва плотины на реке с использованием ГИС технологий // Алгоритмы, методы и системы обработки данных – Муром: МИ ВлГУ – 2004 – № 9-1. С. 174-179.
10. Абрахин С.И., Пайкова М.Н., Прокошева Н.С., Аракелян С.М. Математическое моделирование распространения загрязнений при аварии на нефтепроводе с учетом сложного рельефа // Алгоритмы, методы и системы обработки данных – Муром: МИ ВлГУ – 2004 – № 9-1. С. 3-17.
11. Абрахин С.И., Прокошев В.Г., Аракелян С.М. Математическое моделирование распространения загрязнений при аварии на нефтепроводе с учетом сложного рельефа. // XII Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2005», Санкт-Петербург, СПБИТМО – 2005, т. 1, С. 217-219.
12. Абрахин С.И., Прокошев В.Г., Аракелян С.М. Математическое моделирование последствий прорыва плотины на реке с применением ГИС-технологий. // XII Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2005»: Санкт-Петербург, СПБИТМО – 2005, т. 1, С. 216-217.
13. Абрахин С.И., Аракелян С.М., Брюханова Ю.В., Коршунов А.Е. Математическое моделирование формирования стока жидкости с применением нечеткой логики // Экология речных бассейнов: труды 3-й международной научно-практической конференции – Владимир: ВлГУ – 2005, С. 378-381.
14. Абрахин С.И., Аракелян С.М., Коршунов А.Е. Математическое моделирование последствий прорыва плотины на реке с использованием ГИС-технологий. // Экология речных бассейнов: труды 3-й международной научно-практической конференции – Владимир: ВлГУ – 2005, С. 387-391.
15. Абрахин С.И. Математическое моделирование последствий прорыва плотины на реке с использованием ГИС-технологий // XIII Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2006»: Санкт-Петербург: СПБИТМО – 2006, т. 2 – С. 289.
16. Абрахин С.И., Голубев А.С., Троицкий Д.П. Типовая региональная геоинформационная

- система «Учреждения образования». // XIV Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2007»: Санкт-Петербург: СПБИТМО – 2007, т. 1, С. 271-272.
17. Абрахин С.И. Информационно-аналитическая система прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций // XV Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2008»: Санкт-Петербург: СПБИТМО – 2008, т. 1, С. 139-140.
 18. Абрахин С.И. Прогнозирование распространения лесных пожаров с применением теории нечетких множеств // Нечеткие системы и мягкие вычисления (НСМВ-2008): сборник научных трудов второй всероссийской научной конференции с международным участием – Т 2. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – С. 3-9.
 19. Абрахин С.И. Моделирование последствий прорыва плотины на реке с использованием теории нечетких множеств. // // Нечеткие системы и мягкие вычисления (НСМВ-2008): сборник научных трудов второй всероссийской научной конференции с международным участием – Т 2. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – С. 9-23.
 20. Абрахин С.И., Аракелян С.М., Прокошев В.Г., Жигалов И.Е., Козубай М.П., Поленов А.Э. Создание учебно-методической базы подготовки оперативно-диспетчерского состава системы «112» с применением технологий дистанционного обучения. // Всероссийская научно-методическая конференция «Телематика – 2009»: Санкт-Петербург: СПБИТМО – 2009, т. 1, С.35.

Подписано в печать 26.09.13.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Заказ 214

Издательство

Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.