

Расширение инструментария моделирования отказов с использованием сетей Петри

ISSN 1996-8493

DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77

© Технологии гражданской безопасности, 2023

В.В. Артюхин, В.М. Егоров

Аннотация

В работе обсуждается переход от деревьев отказов, используемых при анализе рисков негативных событий, к сетям Петри, а также польза, которая может быть получена посредством такого перехода. Кроме того дается описание нескольких программ для работы с сетями Петри и кратко обсуждаются их возможности. Научная новизна заключается в демонстрации относительной легкости представления деревьев отказов в виде сетей Петри, а цель работы заключается в расширении инструментария исследователей и практиков в области анализа рисков.

Ключевые слова: дерево отказов; сеть Петри; моделирование; временная динамика; граф.

Expansion of Failure Modeling Tools Using Petri Nets

ISSN 1996-8493

DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77

© Civil Security Technology, 2023

V. Artyukhin, V. Egorov

Abstract

This paper discusses transition from fault trees used in the risk analysis of negative events to Petri nets, as well as the benefits that can be obtained through such a transition. In addition, several programs for working with Petri nets are described and their capabilities are briefly discussed. The scientific novelty lies in demonstrating the relative ease of representing failure trees in the form of Petri nets, and the purpose of the work is to expand the tools of researchers and practitioners in the field of risk analysis.

Key words: fault tree; petri net; simulation; time dynamics; graph.

21.07.2023

Введение

В современном мире, где сложные технические системы и процессы играют ключевую роль во многих областях, важно обеспечить их надежное и эффективное функционирование. Одной из задач в разработке таких систем является анализ и прогнозирование возможных аварий и чрезвычайных ситуаций. Для этого используются различные методы и модели, такие как сети Петри, деревья отказов, анализ долговечности инженерных систем, экспертное прогнозирование и многие другие.

Дерево отказов — это графовая модель отказов системы. Существует достаточный объем публикаций по теории и практике применения этого метода [1, 2].

Метод обладает значимыми достоинствами, но также не лишен определенных недостатков:

- для его использования необходимы время и средства;

- сложно охватить все виды отказов;

- предполагается, что система либо исправна, либо отказала (без промежуточных состояний), поэтому имеются затруднения с представлением ситуаций, где элемент системы может до некоторой степени сохранять работоспособность;

- трудно получить аналитическое решение для деревьев, представляющих системы, содержащие резервные и восстанавливаемые узлы;

- наконец, результаты трудно проверить.

В рамках этой работы в первую очередь важно то, что синтаксическое описание модели в виде дерева отказов содержит информацию о причинно-следственных связях между событиями в форме дуг между соответствующими узлами (рис. 1).

Сети Петри — математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем, впервые описанный немецким математиком и исследователем в области информатики Карлом Петри в 1962 году. Модель в нотации Петри представляет двудольный ориентированный граф. Вершины одного семейства — это «условия» или «позиции». В позициях могут располагать «метки» или «фишки». Вершины другого — «события» или «переходы». Дуга (направленное ребро) графа не может соединять вершины одного и того же семейства. Таким образом, условие может соединяться только с событиями, а событие только с условиями [3].

С точки зрения семантики модели это означает, что событию предшествуют некоторые условия (предусловия), а само оно приводит к возникновению других условий (постусловий). Условие считается выполненным, если в соответствующей вершине находится как минимум столько меток, сколько дуг идет от условия к событию. Для запуска события необходимо, чтобы были выполнены все предусловия. В этом случае событие «происходит» и переход запускается, он удаляет из каждой вершины-предусловия столько меток, сколько дуг из предусловия идет к этому событию и помещает в каждое из постусловий столько меток, сколько дуг идет в него (рис. 2).

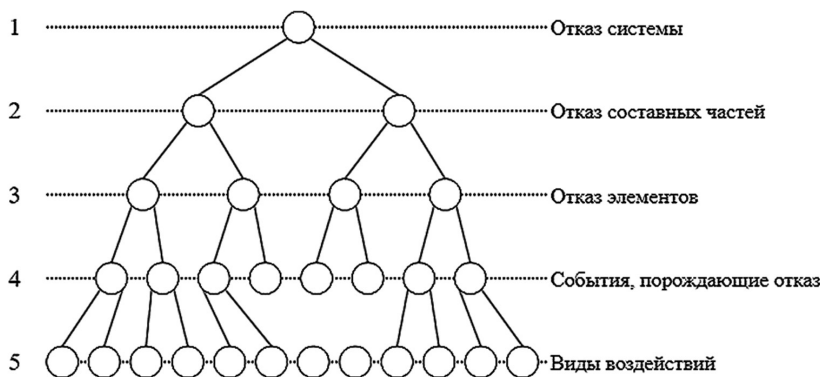


Рис. 1. Граф дерева отказов

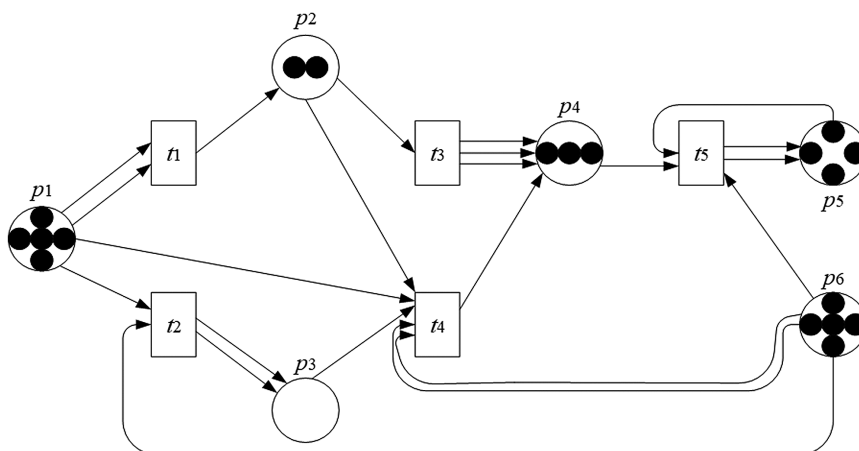


Рис. 2. Пример сети Петри (кругами показаны условия, прямоугольниками — события, а черными кругами — метки), в текущей конфигурации разрешены переходы t_1 , t_2 , t_3 и t_5 [4]

В простейшем случае без расширения концепции моделирования срабатывание перехода — это неделимое мгновенное событие; срабатывание двух или более переходов одновременно считается невозможным. Если маркировка (размещение фишек в условиях) соответствует состоянию модели, при котором может быть активировано более одного перехода, то каждый из них должен рассматриваться отдельно. В более сложных случаях предполагается, что, поскольку событие «происходит», его реализация занимает некоторое время. Это отличает сетевые события от событий на дереве отказов, где временная динамика не рассматривается (если не оговорено другое, но и в том случае учитывается лишь порядок реализации событий).

На самом деле, событиям на дереве отказов соответствуют не события/переходы, а условия/позиции в сети Петри. События же в том смысле, как они понимаются в сети Петри, в дереве отказов отсутствуют, что ограничивает сложность системы, ситуаций и вариантов развития событий, которые могут быть представлены таким образом (с помощью дерева).

Исследования с применением деревьев отказов наиболее часто применяют в целях:

определения всех путей, приводящих к главному нежелательному событию;

количественной оценки вероятности нежелательного события при определенных комбинациях условий;

идентификации общего характера отказов или их общих причин;

анализа чувствительности отдельных событий к отклонениям параметров системы.

Целями применения метода в промышленности являются:

оценка надежности оборудования (частоты и вероятности отказов);

определение комбинаций условий, повлиявших на возникновение инцидента;

идентификация воздействий, которые могут повысить надежность и безопасность (а также оценка влияния этих воздействий).

Во многих случаях представляется целесообразным дополнить модель в виде дерева отказов моделью в виде сети Петри, поскольку помимо большинства целей, достижением которых обуславливается применение

аппарата деревьев отказов, сети Петри позволяют достичь дополнительных целей, связанных с моделированием временной динамики разворачивающихся аварийных ситуаций. [5, 6]. При этом указанное преимущество обеспечивается посредством незначительного увеличения сложности моделирования и графического представления модели (последнее иногда оказывается даже проще и компактнее за счет устранения дубликатов условий, хотя возможно и разрастание графа за счет дополнительных вершин-переходов).

Пример перехода от дерева отказов к соответствующей сети Петри

В этом разделе мы рассмотрим пример простого дерева отказов для пожара и аналогичную ему сеть Петри, моделирующую тот же процесс (насколько вообще можно говорить о соответствии между статической структурой дерева отказов и динамической сетью Петри) (рис. 3 и 4).

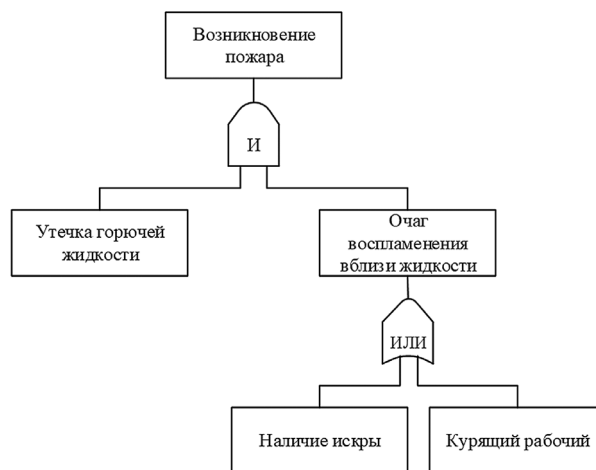


Рис. 3. Пример дерева отказов, модель ситуации возникновения пожара жидкости [7]

Изображение сети на рис. 4 построено в нотации, принятой в программе PIPE2 [8] и с применением этой программы; круги соответствуют условиям, черные прямоугольники — мгновенным переходам, а красные прямоугольники — переходам, которые возбуждены и могут быть выполнены в текущей конфигурации сети (маркировке).

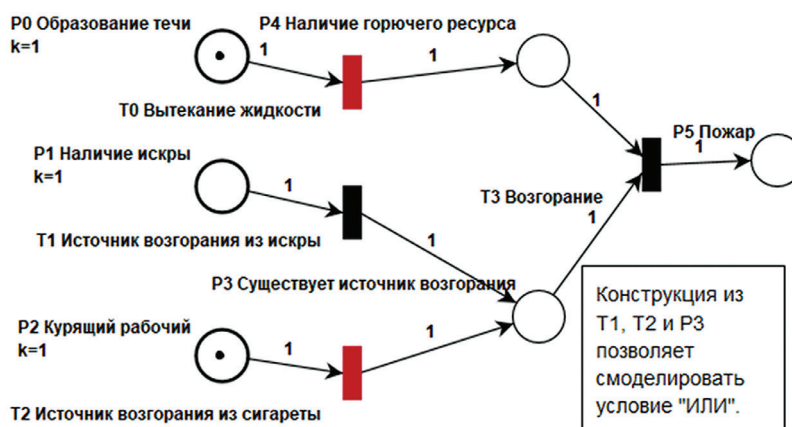


Рис. 4. Пример представления дерева отказов для ситуации пожара

Сеть даже для этого простого случая может быть и сложнее:

если, например, речь идет не об утечке жидкости, а об утечке газа, мы можем учесть, что для формирования концентрации газа, достаточной для воспламенения, требуется определенное время (установив время срабатывания перехода T_0 в виде параметров случайной величины);

мы также можем учесть время актуальности угрозы источника воспламенения в виде сигареты или искры, которые могут потухнуть задолго до того, как концентрация газа способна будет обеспечить воспламенение (сделать это можно с помощью «ингибиторной» дуги, которая запрещает срабатывание перехода, если в соответствующем предусловии имеется метка);

различные расширения минимального аппарата сетей Петри позволяют представлять системы различной сложности.

И, что немаловажно, принятый подход к построению сетей Петри предполагает возможность построения более сложных сетей из менее сложных компонентов.

Разумеется, наиболее важным вопросом при переходе от одной нотации и даже больше, методологии моделирования к другой является вопрос о том, что это дает для возможностей анализа и/или достижения практических целей. Сети Петри — это аппарат и инструмент для исследования систем, математическим аппаратом которого является теория комплектов, то есть сети Петри полностью описываются языком математики, что открывает широкое пространство для анализа (в частности, матричного). Добавляя к этому функции, уже реализованные в программном обеспечении, мы можем получить ответы на различные вопросы:

какие начальные маркировки приводят к возникновению негативного события, а какие нет;

сколько времени в среднем требуется для возникновения негативного события при разных начальных условиях (симуляция, метод Монте-Карло);

как часто (в среднем) оказываются выполнены те или иные промежуточные условия возникновения негативного события;

вопросы более сложные, например :«Верно ли, что проход из состояний группы “начальных” в состояния

группы “итоговых” занимает меньше 5 единиц времени с вероятностью как минимум 0.98?» [9] Кроме того, для моделирования на основе сетей Петри существует специализированное программное обеспечение, позволяющее как создавать и хранить модель в виде графа и параметров его элементов, так и производить расчеты на графе, и демонстрировать динамику модели в виде анимации. Некоторые программы будут рассмотрены далее в этой работе.

Программное обеспечение для работы с сетями Петри

PIPE2

Полное название программы — Platform Independent PetriNet Editor 2 (независимый от платформы редактор сетей Петри) [8]. Разработку редактора с открытым исходным кодом аспиранты отделения компьютерных наук Имперского колледжа Лондона начали в 2002 году. На сегодняшний день разработка и совершенствование программы, к сожалению, полностью остановлены (последнее обновление было в 2013 году), но она все еще доступна для скачивания и может оказаться полезной.

PIPE2 позволяет редактировать и моделировать стохастические сети Петри с запрещающими дугами в графическом редакторе. Существует возможность анимации срабатывания переходов и прохождения меток по сети. Основная особенность программы — это концепция модулей, которые могут подключаться к программе, действовать в качестве ее составляющих, получать доступ к внутреннему представлению сети и выполнять любые расчеты. PIPE2 уже содержит несколько модулей, анализирующих сети, однако специализированные модули, необходимые для решения конкретных задач, пользователю придется реализовывать самостоятельно, для чего необходима компетенция программиста. [9]

WOLFGANG

Легковесная бесплатная программа для построения и ручной симуляции работы сети (в том числе «цветных» сетей, где метки могут иметь разные цвета или разные типы) позволяет анализировать сеть на соответствие ряду критериев (рис. 5) [10].

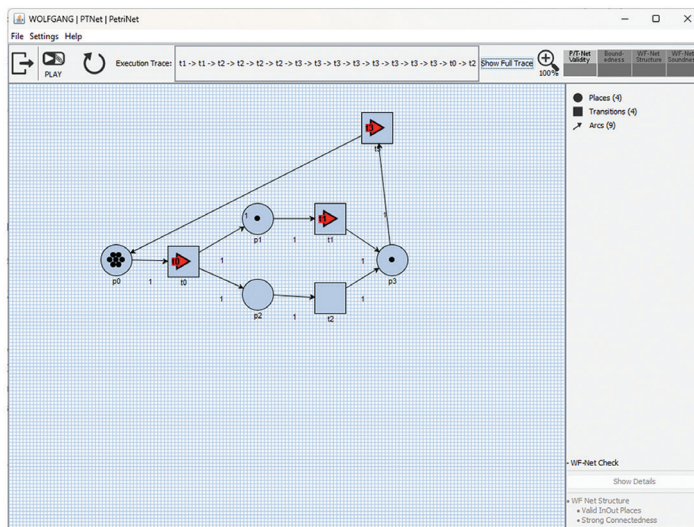


Рис. 5. Редактор программы WOLFGANG

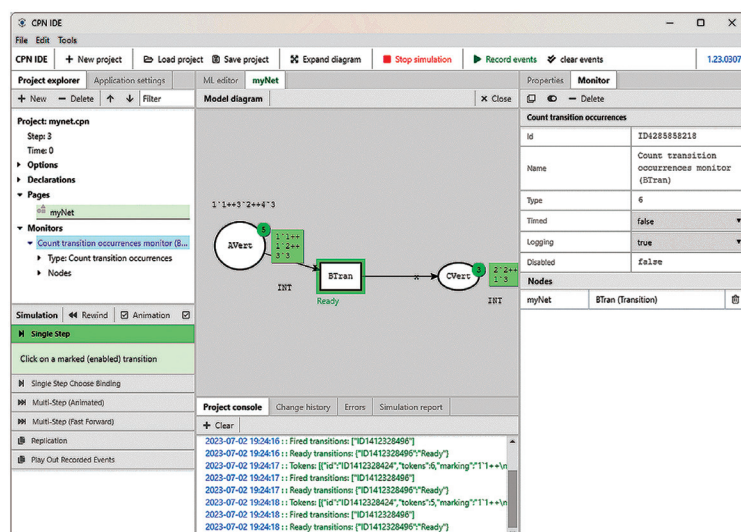


Рис. 6. Редактор программы CPN IDE

CPN IDE

Также свободная программа, позволяющая графически создавать и редактировать сети Петри (в том числе «цветные»), запускать на них интерактивную симуляцию (рис. 6). Представляет собой полноценный IDE (интерактивное окружение разработчика), не выходя из которого, можно подключать модули мониторинга для сбора и анализа данных о работе сети. Модули мониторинга могут быть представлены, в том числе, пользовательским кодом [11].

В области анализа сетей Петри распространен подход, позволяющий создавать сети с помощью пользовательского интерфейса, извлекать данные о структуре и свойствах сети и маркировках в виде файла и анализировать их в какой-либо среде для математических расчетов. Такая интероперабельность возможна благодаря стандартизированным форматам файлов, например PNML (Petri Net Markup Language — язык разметки для сетей Петри [12]). Популярные математические и аналитические IDE, такие как Ri Matlab, содержат собственные графические средства и/или модули для работы с сетями Петри.

Заключение

На основании всего, изложенного выше, можно сделать ряд выводов:

Во многих случаях деревья отказов вместо стандартной характерной для них нотации можно легко представить (переформулировать) в нотации сетей Петри. В виде сети Петри, вообще говоря, можно представить любой готовый алгоритм, который построен на ветвлениях и следованиях [3].

Переформулировка деревьев отказов в указанном виде снимает ряд ограничений, присущих классическим деревьям отказов. В частности, в дереве (согласно его определению) каждое начальное и промежуточное событие может иметь только один выход/результат (финальное результирующее событие, вершина дерева, выходов не имеет), в то время как события в сетях Петри таких ограничений не имеют. Это, в свою очередь,

позволяет визуально упростить (редуцировать) графическое представление модели, избежать дублирования символов событий, что упрощает восприятие модели и реализацию ее в программных средствах. Одновременно открываются возможности описания более сложных систем и ситуаций.

Модели на основе сетей Петри не обладают всей мощностью других более развитых и сложных имитационных моделей (таких, как модели Actor Pilgrim или Any Logic), но имеют преимущество простоты нотации (три вида элементов в классической формулировке: позиции/условия, переходы/события и дуги, плюс динамический элемент — маркеры/фишки) [13] даже по сравнению с классической нотацией деревьев отказов (где имеются как минимум базовые события, промежуточные события, неразвивающиеся события, условия «и», условия «или», ребра и т.д.) [14].

В отличие от дерева отказов сеть Петри является все же имитационной динамической моделью, поскольку переходы/события внутри сети могут обладать задержкой срабатывания, определяемой в зависимости от принятых правил и расширений (стохастически, на основе некоторых аргументов, в зависимости от наличия ингибиторных дуг, запрещающих срабатывание перехода и т.д.).

Особенности аппарата сетей Петри и возможности программного обеспечения по работе с ними открывают дополнительные возможности в части постановки и решения задач для моделирования на основе уже имеющихся деревьев отказов и (при необходимости) дополнительных данных.

В заключение хочется отметить, что использование возможностей аппарата сетей Петри в дополнение к методам анализа деревьев отказов, может существенно расширить круг задач, где применяются последние, а также является промежуточным (и довольно просто совершаемым) шагом на пути перехода от деревьев отказов к полноценным динамическим имитационным моделям.

В более общем контексте можно заметить, что в отношении многих видов моделей отказов (а также

аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий, несчастных случаев и т. д.), имеющих в своей основе граф (деревья отказов, сети Петри, марковский процесс, имитационная модель), возможно преобразование из одного вида в другой при условии внесения в новую модель дополнительной необходимой информации, но с сохранением информации, уже

присутствовавшей в исходной модели. При наличии программного обеспечения с нужными функциями такие преобразования могут быть выполнены не только в ручном, но и в полуавтоматическом или даже в автоматическом режимах, а подобный «мультимодельный» подход может стать еще одним ценным инструментом управления рисками [15].

Литература

- Акимов В.А. Надежность технических систем и техногенный риск. М.: Деловой экспресс, 2002.
- Дерево отказов, как метод структурного анализа ФТА. Примеры внедрения // URL: <https://www.itexpert.ru/rus/biblio/detail.php?ID=16266> (дата обращения: 19.07.2023).
- Кудж С.А., Логинова А.С. Моделирование с использованием сетей Петри // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. № 1. С. 10–22.
- Сети Петри // URL: https://matematem.ru/wp-content/uploads/2012/12/Сети-Петри_МЛ_водзнаки.pdf (дата обращения: 30.06.2023).
- Булавский П.Е., Ваисов О.К., Быстров И.Н. Моделирование и оценка времени поиска и устранения отказов систем железнодорожной автоматики и телемеханики с помощью сетей Петри // Автоматика на транспорте. 2019. № 4. С. 478–489.
- Ханова А.А., Мунтянова А.А., Аверьянова К.И. Моделирование конфигурации сложных систем на основе сетей Петри // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2018. № 2. С. 39–58.
- Агеева В.Н. Методические указания по проведению практических занятий и самостоятельной работе по дисциплине «Надежность нефтегазового оборудования» // URL: https://www.gubkin.ru/faculty/mechanical_engineering/chairs_and_departments/quality_management_standardization_and_certification/files/4_ssilka/25.pdf (дата обращения: 01.07.2023).
- Platform Independent Petri net Editor 2 // URL: <https://pipe2.sourceforge.net/index.html> (дата обращения: 01.07.2023).
- Dingle Nicholas J., Knottenbelt William J., SutoTamas. PIPE2: A Tool for the Performance Evaluation of Generalised Stochastic Petri Nets // URL: <http://www.doc.ic.ac.uk/~wjk/publications/dingle-knottenbelt-suto-per-2009.pdf> (дата обращения: 01.07.2023).
- WOLFGANG — Petri Net Editor // URL: <https://github.com/iig-unifreiburg/WOLFGANG> (дата обращения: 02.07.2023).
- Westergaard, Michael и Verbeek, Eric. CPN Tools // URL: <https://cpntools.org/> (дата обращения: 02.07.2023).
- ISO/IEC 15909-1:2004. Systems and software engineering — High-level Petri nets — Part 1: Concepts, definitions and graphical notation // URL: <https://www.iso.org/en/standard/38225.html> (дата обращения: 02.07.2023).
- Котов В.В., Котова Н.А., Ларкин, Е.В. Метод имитационного моделирования систем с использованием сетей Петри-Маркова // Известия ТулГУ. Технические науки. 2015. № 9. С. 164–169.
- Берман А.Ф., Павлов Н.Ю., Николайчук О.А. Метод синтеза и анализа деревьев отказов на основе понятий механизма и кинетики событий // Проблемы анализа риска. 2018. № 3. С. 62–77.
- Артюхин В.В. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций с помощью дискретной оптимизации и современных программных средств / В.В. Артюхин // Технологии гражданской безопасности. 2014. Т. 11. № 1(39). С. 86–91. EDN: SBDQYR.

Сведения об авторах

Артюхин Валерий Викторович: к.э.н., доц., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), в. н. с. науч.-исслед. отдела. Москва, Россия. SPIN-код: 7954-1764.

Егоров Владимир Михайлович: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), н. с. науч.-исслед. отдела. Москва, Россия. SPIN-код: 2138-4127.

Information about authors

Artyukhin Valerii V.: PhD (Economy Sc.), Associate Professor, VNIИ GOChS (FC), Leading Researcher, Research Department. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 7954-1764.

Egorov Vladimir M.: VNIИ GOChS (FC), Researcher, Research Department. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 2138-4127.

Издания ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)

Авторы, название	URL
Справочное пособие по организации выполнения мероприятий по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и проведению аварийно-спасательных работ силами и средствами органов государственной власти, органов местного самоуправления в мирное и военное время.	http://elibrary.ru/item.asp?id=26212676
Дурнев Р.А. и др. Технологии подготовки диссертационных работ в области защиты от чрезвычайных ситуаций. Научно-методическое издание.	http://elibrary.ru/item.asp?id=26340114
Фалеев М.И. и др. Основы стратегического планирования в области гражданской обороны и защиты населения. Научно-методический труд.	http://elibrary.ru/item.asp?id=26571679
Акимов В.А. и др. Наземно-космический мониторинг чрезвычайных ситуаций.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27268186
Качанов С.А. и др. Стратегия развития системы-112 в Российской Федерации. Монография. 2-е изд., перераб. и доп.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27408544