

## **МЕТОДЫ И МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

---

Рассматриваются модели и методы, которые используются для интеллектуальных решений при ликвидации последствий чрезвычайных природных ситуаций. Предлагаемые решения учитывают многокритериальность и неопределенность исходной информации. В динамической модели поиска рациональных решений для ликвидации последствий чрезвычайной природной ситуации используется сеть Петри.

### **1. Введение**

В настоящее время для жизнедеятельности человека в природной сфере постоянно возникают опасности и угрозы. В первую очередь это так называемые чрезвычайные природные ситуации (ЧПС). Под ЧПС принято понимать нарушение устойчивого состояния окружающей природной среды, которое под воздействием метеорологических и других внешних факторов, включая деятельность человека, приобретает катастрофическое развитие, каскадное возникновение чрезвычайных ситуаций или непрекращающийся рост (превышение скорости изменения состояния вышедшего допустимого значения), что приводит к экономическим, социальным и людским потерям.

Обычно ЧПС возникает спонтанно (с большой скоростью распространения катастрофических событий и непрогнозируемыми масштабами их развития, при этом характерна многокритериальность, нечеткость и неполнота знаний об источниках и сценариях развития ЧПС). Кроме того, ЧПС характеризуется стохастичностью (в первую очередь это связано с синергетикой окружающей среды, в которой возникает ЧПС, при этом появляется множество противоречивых или неточных данных и сведений). Также надо учитывать восприятие человеком ЧПС и поведение лица, принимающего решение (ЛПР) в чрезвычайной ситуации (зачастую сказывается неразбериха в межведомственных и административных связях, человеческий фактор при взятии на себя ответственности за принятые решения, паника и неадекватное поведение людей, внимательность при совершении действий и многое другое).

Результатом ЧПС является вред, который наносится природе, человеку, объектам экономики, социальной сфере, окружающей природной среде. В этой связи актуальным есть мониторинг и прогнозирование ЧПС - наблюдение, контроль, предвидение опасных процессов и явлений природы и являющихся источниками чрезвычайных ситуаций. Кроме этого, необходимо исследовать динамику развития чрезвычайных ситуаций, определить ее масштаб в целях решения оценки сценариев развития ЧПС.

*Цель исследования* - при организации ликвидации последствий ЧПС предоставить в распоряжение ЛПР методы поиска рациональных решений в условиях неопределенности и многокритериальности, разработать динамические модели оценки последствий ЧПС для интеллектуальной системы принятия решений (ИСПР).

*Задачи для достижения цели.* При разработке ИСПР для организации ликвидации последствий ЧПС широко используются разнообразные математические модели и методы системного анализа и синтеза сложных систем: нечеткая логика, нейронные сети, когнитивное моделирование, вывод по прецедентам, ситуационный анализ и многое другое [1]. Проводимое исследование связано с анализом функциональных задач и выбором информационных, организационных и материальных ресурсов для ликвидации последствий ЧПС. В работе в первую очередь решается задача выбора таких методов и моделей, которые были бы адаптивными к практическим условиям последствий ЧПС и учитывали особенности неопределенности и многокритериальности рассматриваемой проблемы.

Требования к методам и моделям ИСПР определяются противоречиями между полнотой, своевременностью и оптимальностью решений для принятия наилучшего решения при ликвидации последствий ЧПС. Противоречивость требований вызывает необходимость более полного учета внутренних и внешних факторов. В условиях неполноты знаний о взаимовлиянии факторов, неточности их измерения, случайных внешних и внутренних воздействиях необходимо, кроме многокритериальности рассматриваемой проблемы, учитывать неопределенность внутренних и внешних факторов ЧПС.

Большинство исследователей пришли к выводу, что необходимо использовать гибридные методы анализа и синтеза ИСПР. При этом для решения комбинируют не только математические модельные представления проблемы, но и различные интеллектуальные методы искусственного интеллекта [1]. Приводимые в этой работе результаты посвящены обоснованию и выбору некоторых методов и моделей для решения задач принятия интеллектуальных решений при ликвидации последствий ЧПС.

В качестве исходных данных для исследования берутся нормативные акты МЧС по действиям персонала в условиях предотвращения и ликвидации ЧПС [1], документы, стандартизирующие вывод и представление информации для ЛПР, объективные количественные и качественные данные о контролируемой в заданном районе проблемной ситуации. Кроме этого, используется база данных и знаний о прецедентах, квантах знаний и микроситуаций [1].

## 2. Основное содержание

Направление исследования для анализа ЧПС и синтеза систем управления ИСПР включает этапы: формирование цели и задач анализа, методика информационного, функционального и структурного анализа, выработка обоснованных предложений по совершенствованию структуры системы управления ИСПР и алгоритма её функционирования.

В этой работе для исследования выделяются задачи поиска решений  $\{Zps\}$  для интеллектуальной системы принятия решений при ликвидации последствий ЧПС. При этом необходимо определить соответствующие требования к структуре ИСПР  $\{Str\}$  в рамках использования GRID-технологии. ИСПР должна применять сервисы GRID-системы, ее внутреннюю систему моделирования, прогнозирования и безопасности объектов контроля, получать сигналы и извещения; а также иметь возможность передавать управляющие воздействия. Необходимо предусмотреть не только автоматическое оповещение о возможности возникновения или инициализации ЧПС ЛПР, но и передать информацию о возможном сценарии развития ЧПС на основе оценки факторов риска, моделей распространения ЧПС, вхождение в модели новых опасных сценариев.

Кроме этого, необходимо выделить оптимальные процедуры разработки ИСПР  $\{Pr\}$  (в смысле удовлетворения соответствующим показателям качества  $\{Pk\}$ ), которые должны привести к реализации наиболее эффективной структуры обеспечивающего комплекса ИСПР  $\{Str\}$  в рамках GRID – системы. При этом комплектующие элементы и подсистемы  $Str_i$  ( $i = \overline{1, K}$ ) обеспечивающего комплекса ИСПР должны наилучшим образом реализовывать требования и характеристики статистической и лингвистической моделей ЧПС  $\{Mod\}$ , методов разработки  $\{Met\}$ , алгоритмов поиска решений  $\{Alg\}$  как для проектирования ИСПР, так и для анализа ситуации и обеспечивать принятие наилучших решений для ликвидации последствий ЧПС. В этом случае справедливо для решения комплекса всех задач  $Z$  и поиска наиболее рациональных вариантов для принятия решений  $\{Zps\}$  при ликвидации последствий ЧПС и разработки структуры ИСПР  $\{Str\}$  представить в следующем виде:

$$\{Met, Alg, Prog, Mod, Zps, Pk\} \xrightarrow{\{Pr\}} \{Str\}, \{Str_i \in Str\}, i = \overline{1, K},$$

$$Pk^e = \underset{Met^e \in Met}{extr} \underset{Alg_j^e \in Alg}{extr} \underset{Prog_\varphi^e \in Prog}{extr} \underset{Mod_t^e \in Mod}{extr} \underset{Zps_t^e}{extr} Pk(Met^e, Alg_j^e, Prog_j^e, Mod_t^e, Zps_t^e), \quad (1)$$

где  $Met^e$  -  $e$ -й метод разработки ИСПР,  $e = \overline{1, E}$ ;  $Alg_j^e$  -  $j$ -й алгоритм алгоритмического, обеспечивающего комплекса ИСПР для  $e$ -го метода разработки ИСПР,  $j = \overline{1, J}$ ; среди методов и алгоритмов можно выделить: методы максимального правдоподобия, минимизации байесовского риска и группового учета аргументов (МГУА), обычный и взвешенный метод наименьшей квадратичной ошибки (МНК), гребневые, робастные и рекуррентные процедуры, нейронные сети, генетические алгоритмы, адаптивные и другие процедуры [1];  $Prog_{\varphi_j}^e$  -  $\varphi$  - я программа программного, обеспечивающего комплекса ИСПР для реализации  $j$ -того алгоритма в  $e$ -м методе разработки ИСПР,  $\varphi = \overline{1, P}$ ;  $Mod_t^e$  -  $t$  - я модель природной среды в  $e$ -м методе разработки ИСПР,  $t = \overline{1, T}$ ;  $Zad_{\eta}^e$  -  $\eta$  - я задача контроля и прогнозирования природной среды для  $e$ -го метода разработки ИСПР,  $\eta = \overline{1, Z}$ ;  $Pk^e$  - показатель качества обеспечивающего комплекса ИСПР для  $e$ -го метода разработки ИСПР.

При *информационном анализе ЧПС* необходимо выполнить идентификацию и прогнозирование опасностей контролируемой территории, оценить степени уязвимости населения, территории и экономики от их воздействия. Кроме того, оценить количество и качество информации мониторинга, которая отображает состояние опасностей исследуемой территории.

Использование разработанного подхода позволяет количественно оценить существующие риски возникновения и развития ЧПС, выбрать наиболее эффективные направления по их минимизации и предотвращению ущерба, а также получить прогнозные (модельные) оценки в ситуации на контролируемых объектах с возможностью формирования сценариев развития ЧПС.

Для реализации требований и характеристик статистических и лингвистических моделей ЧПС  $\{Mod\}$ , методов разработки  $\{Met\}$ , алгоритмов поиска решений  $\{Alg\}$  как для проектирования ИСПР, так и для анализа ситуации и обеспечения принятия наилучших решений для ликвидации последствий ЧПС необходимо использовать вероятностную оценку причинно-следственных связей и событий.

Для динамического моделирования ситуаций в ИСПР при выборе рациональных решений ЛПР в условиях ликвидации последствий ЧПС можно исследовать возможность использования диаграммы влияния. Диаграмма влияния относится к классу семантических функциональных сетей. Такие сети являются графами, но отличаются дополнительной информацией, содержащейся в их узлах и дугах (ребрах), которые представляют так называемые сети стохастической структуры типа Петри. Практическое применение сетей Петри основывается на следующих преимуществах:

а) возможность объединения логических и графических способов представления исследуемых событий;

б) учет стохастичности информации, выраженной узлами и дугами;

в) доступность для моделирования параллельно протекающих, циклических и многократно наблюдаемых процессов;

г) наибольшие (по сравнению с другими типами диаграмм) логические возможности – в смысле строгости, компактности и простоты корректировки условий наблюдения моделируемых событий и явлений [2].

Для решения поставленной задачи стохастическая функциональная сеть имеет четыре типа символов – источник, сток, метка или планка и статистика. Раскраска, т.е. использование разноцветных маркеров, позволяет учесть разнородность состояний окружающей среды и объектов контроля при возникновении ЧПС. Кроме того, в сети учитывается множество признаков моделируемых ситуаций в зоне действия ЧПС.

Отдельные элементы стохастических дискретных динамических сред ЧПС при моделировании могут не иметь физического смысла и использоваться лишь для указания

логической последовательности реализации моделируемого процесса. В сетевой модели применяется возможность моделирования причинно-следственных связей между событиями параллельных и конфликтных ситуаций. В результате применения такой сети можно провести оценку временных и случайных характеристик протекающих процессов.

Для осуществления функций управления при ликвидации последствий чрезвычайной ситуации и анализа развития ЧПС предлагается использовать метод принятия управленческих решений, основанный на применении языка модифицированных сетей Петри, в дальнейшем именуемых обобщенными сетями Петри [2].

Объектом моделирования ЧПС является некоторая территория (область, промышленный район) с ее инфраструктурой. В качестве элементов модели выделим опасные объекты, которые в результате возникновения ЧПС могут привести к каскадному развитию чрезвычайной ситуации. Необходимо выделить те объекты, которые нужно защищать в первую очередь. В распоряжении ЛПР находятся объекты или ресурсы для ликвидации последствий ЧПС. Перечисленные выше объекты в зависимости от необходимой детализации могут представляться множеством элементов, из которых состоит объект. Элементы объекта в модели связаны между собой информационными и транспортными магистралями (сеть дорог), причем каждая связь имеет свои характеристики и геоинформационную привязку. В предлагаемой модели учитываются также последствия тех или иных разрушительных или вредных причин, вызванных возникновением ЧПС.

Динамические свойства предлагаемой модели позволяют учитывать изменения окружающей среды и выделенных выше объектов в зависимости от времени. Таким образом, в ИСПР исследуются различные сценарии развития ЧПС и возможности ликвидации ее последствия необходимыми ресурсами.

Важной составляющей в ИСПР является база знаний прецедентов с микроситуационным представлением квантов знаний о подобных чрезвычайных ситуациях и набором удачных или рациональных средств ликвидации последствий, возникшей в контролируемой зоне ЧПС [1,3].

Формально модель контролируемой территории, на которой может произойти ЧПС, с точки зрения рациональных методов и средств ликвидации последствий ЧПС будет иметь множество потенциально опасных участков  $Zon^0 = \{Zon_1^0, Zon_2^0, \dots, Zon_i^0, \dots, Zon_n^0\}$  (ущелий, стоков воды, участков, подвергаемых затоплению при наводнении, сейсмически опасных участков территории).

Каждый объект  $Zon_i^0$  (в контролируемой зоне) из множества  $Zon^0 = \{Zon_1^0, Zon_2^0, \dots, Zon_i^0, \dots, Zon_n^0\}$  может быть описан вектором контекстных характеристик, которые содержат данные о типе объекта, его местоположении, занимаемой им площади, количестве людей, типе потенциальной опасности и масштабе последствий возможных ЧС и т. п. В модели представлено множество объектов, защищаемых от возможных каскадных проявлений ЧПС -  $Zon^z = \{Zon_1^z, Zon_2^z, \dots, Zon_j^z, \dots, Zon_m^z\}$ , которые описываются векторами, содержащими данные о типе объекта, его геоинформационном контексте площади, находящихся на нем людях.

Для ликвидации последствий ЧПС в модели учтены объекты, входящие в силы и средства, используемые для ликвидации последствий ЧПС  $Res^c = \{Res_1^c, Res_2^c, \dots, Res_y^c, \dots, Res_r^c\}$ . Объекту  $Res_y^c$  соответствует вектор характеристик, описывающий тип объекта, его местоположение, наличные ресурсы, специфику. Как уже было отмечено выше, в ИСПР при моделировании сценариев ликвидации последствий ЧПС учитывается прецедентная база микроситуационных квантов знаний, которые в подобных ЧПС приводили к наиболее рациональным и удачным решениям –  $Tex_{Rez}$ . Множество  $Tex_{Rez^c}$  отражает технические средства, которые размещены на контролируемом объекте и предназначены для использования в случае наступления ЧПС. Кроме указанных множеств, в модели может быть представлена вся технотреструктура, которая обеспечивает ликвидацию последствий возникших ЧПС. К таким объектам могут быть отнесены объек-

ты обслуживания  $Res^{Ob}$ , места дислокации транспортных средств, спасательной и строительной техники  $Res^{Tr}$ , ситуационные центры управления  $Res^{Sinc}$ . Каждый из выделенных объектов характеризуются определенными параметрами и характеристиками. Для моделирования информационной сети можно задать граф  $N$ , вершинами которого являются элементы множества

$$Ob = Zon^0 \subset Zon^z \subset Res^c \subset Res^{Ob} \subset Res^{Tr} \subset Res^{Sinc} \subset Tex_{Rez} \subset Tex_{Rez^c},$$

две вершины соединены дугой, если между объектами существует прямой канал связи. Дуги графа помеченные, метка определяет тип связи между объектами.

Так как база микроситуационных квантов знаний ИСПР имеет вид графа  $N$ , то для определения вероятности наступления причинно-следственного события нам нужна сумма вероятностей всех его предикатов. Предикатами в графе выступают узлы, из которых мы можем попасть в данный узел. При этом данный узел также может выступать в роли предиката, если из него есть путь в любой другой узел. Таким образом, нам необходимо найти все возможные пути из одного узла в другой, определить вероятность каждого маршрута и затем сложить эти вероятности. Так мы получим вероятность наступления одного события при условии выполнения события-предиката. Чтобы получить общую вероятность наступления события, нам необходимо сложить вероятности наступления этого события, взяв в качестве предиката каждый из узлов графа, из которого можно попасть в наш результирующий узел.

Таким образом, мы можем выделить основную задачу в данной ситуации – поиск всех возможных маршрутов из одного узла в другой. Для этого воспользуемся рекурсивным поиском в глубину.

Поиском в глубину называется способ обхода вершин графа, который, начавшись от какой-либо вершины, рекурсивно применяется ко всем вершинам, в какие можно попасть из текущей. Пусть граф с  $N$  вершинами задан матрицей смежности  $A[N][N]$ . Создадим одномерный массив `int visited[N]` и заполним его нулями, считая, что ни одна вершина до начала выполнения алгоритма не была посещена. Функция обхода записывается следующим образом:

```
void go(int curr) {
    visited[curr] = 1; /* помечаем текущую вершину как пройденную */
    for (int i = 0; i < N; i++)
        if (!visited[i] && A[curr][i])
            go(i);
}
...
/* в тексте программы */
go(start);
```

Распишем подробно, как будет работать алгоритм на графе, изображенном на рис. 1. Пусть `start = 1`, т.е. начинаем с первой вершины.

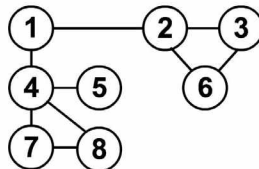


Рис. 1. Исходный граф для демонстрации алгоритма поиска в глубину

При вызове `go(1)` первая вершина помечается как пройденная (`visited[1] = 1`), и в цикле по  $i$  перебираются все вершины, куда можно попасть из текущей (т.е. из первой). При  $i = 2$  видим, что во второй вершине мы не были (`visited[2] == 0`) и что в графе есть ребро, соединяющее первую вершину и вторую, следовательно, рекурсивно вызываем ту же функцию `go(int curr)` с параметром `curr`, равным 2. Аналогично, `go(2)` вызывает `go(3)`, а последняя вызывает `go(6)`. Здесь мы обнаруживаем, что из шестой вершины некуда идти:

и во второй, и в третьей мы уже побывали. Следовательно,  $go(6)$  дорабатывает до конца, а за ней заканчиваются  $go(3)$  и  $go(2)$ . Таким образом, мы оказываемся в функции  $go(1)$  в конце цикла for при  $i = 2$  (рис. 2).

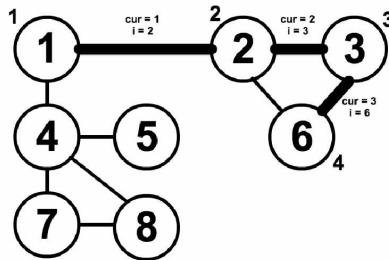


Рис. 2. Порядок обхода вершин в демонстрации алгоритма поиска в глубину

Цикл for в  $go(1)$  продолжает работу, и при  $i = 4$  мы уходим в рекурсию  $go(4)$  и т.д., пока управление снова не вернется в  $go(1)$  (и произойдет выход из функции, т.к. больше нет непосещенных вершин, связанных ребром с первой). Окончательная картина показана на рис.3.

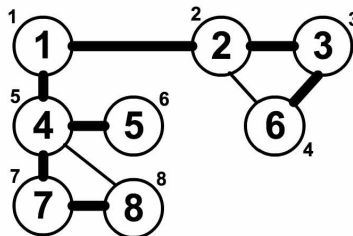


Рис. 3. Окончательный порядок обхода вершин в демонстрации алгоритма поиска в глубину

В результате работы алгоритма все вершины графа оказались пройденными (при условии, что граф связный). Необходимо отметить, что ребра, по которым мы «ходили» — так называемые прямые ребра (они выделены жирным) — образуют один из возможных каркасов исходного графа.

Кроме того, для решения той же задачи можно воспользоваться и поиском в ширину.

При поиске в ширину вместо стека рекурсивных вызовов хранится очередь, в которую записываются вершины в порядке удаления от начальной. Введем массив  $int\ visited[N]$ , а также создадим очередь для хранения вершин (реализуем ее в виде простого массива; естественно, возможны другие варианты). В начало очереди запишем начальную вершину:

```
int queue[N];
queue[0] = start;
visited[start] = 1;
int r = 0, w = 1;
```

Переменная  $r$  будет указывать позицию очереди, из которой мы читаем данные, переменная  $w$  — позицию, куда данные будем писать. Тогда обход может быть написан следующим образом:

```
while (r < w) {
    int curr = queue[r++];
    for (int i = 0; i < N; i++) {
        if (!visited[i] && A[curr][i]) {
            visited[i] = 1; queue[w++] = i;
        }
    }
}
```

Находясь в первой вершине, в очередь добавляются вторая и четвертая (они удалены от первой на расстояние  $d = 1$ ). Затем из очереди читается очередной элемент (только что добавленная вторая вершина) и добавляются вершины, в которые можно попасть из второй: третья и шестая. То же самое делается для следующей в очереди вершины (четвертой): в очередь добавляются вершины 5, 7 и 8. Так как все вершины графа уже оказались пройденными, больше в очередь ничего добавлено не будет, и алгоритм завершится после чтения из очереди последней вершины (8).

Цифрами на рис. 4 помечен порядок обхода вершин при поиске в ширину. Так как вершины перебираются в порядке удаления от начальной, работу алгоритма можно представить в виде набегающей волны, что и дает ему второе название: «метод волны».

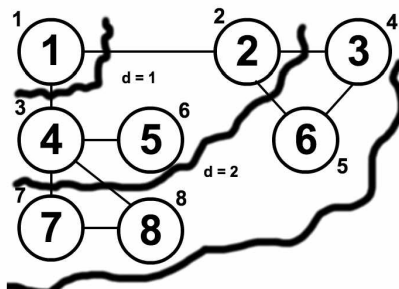


Рис. 4. Порядок обхода вершин в демонстрации алгоритма поиска в ширину

Для каждого из маршрутов, имея оценку вероятности маршрута, мы можем получить вероятность нескольких маршрутов одновременно. Таким образом, можем оценить общую вероятность для нескольких маршрутов из одного предиката или даже общую вероятность из нескольких предикатов. Для этого нам нужно найти сумму вероятностей событий.

**Определение 1.** Суммой событий  $A$  и  $B$  называется событие  $A + B$ , которое наступает тогда и только тогда, когда наступает хотя бы одно из событий:  $A$  или  $B$ .

**Определение 2.** Вероятность появления одного из двух несовместных событий равна сумме вероятностей этих событий.

$$P(A + B) = P(A) + P(B).$$

Заметим, что это справедливо для любого числа несовместных событий:

$$P\left(\sum_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n P(A_i).$$

**Определение 3.** Если случайные события  $A_1, A_2, \dots, A_n$  образуют полную группу несовместных событий, то имеет место равенство

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = 1.$$

**Определение 4.** Если задать в качестве результирующего узла не один узел, а несколько, то можно не только определить вероятность наступления того или иного события, а и найти наиболее оптимальные действия по ликвидации последствий ЧПС, которые стоит предпринять основываясь на выборе событий, имеющих самую большую вероятность. Значит, если мы определили, что наступление некоего события наиболее вероятно, чем всех остальных, то мы можем предложить действия, которые следует предпринять для ликвидации последствий этого события еще до его наступления. Таким образом, возможно выполнить некоторые подготовительные меры для предотвращения последствий ЧПС и снизить всевозможные риски потерь от его действия.

**Утверждение.** Наиболее оптимальным при ликвидации последствий ЧПС есть решение, которое определяется для события с наибольшей вероятностью, или же несколько решений, близких к высокой вероятности. Близость определяется из расчета заданного экспертом уровня близости.

В целом в предлагаемой модели в терминах сетей Петри каждому объекту, представленному в виде контролируемой зоны –  $Zon_i^0$  на множестве  $Zon^0$ , можно поставить в соответствие фрагмент тривиальной сети, состоящий из составного перехода  $t_{Zon_i^0}$  и его входной и выходной позиций  $P_{Zon_i^0}^{BX}$  и  $P_{Zon_i^0}^{BЫX}$ , причем

$$F\left(P_{Zon_i^0}^{BX}, t_{Zon_i^0}\right) = 1, F\left(P_{Zon_i^0}^{BЫX}, t_{Zon_i^0}\right) = 1 \text{ и } H\left(t_{Zon_i^0}, P_{Zon_i^0}^{BЫX}\right) = 1.$$

Такая сеть  $N$  моделирует технологические взаимосвязи между элементами объекта  $Zon^0$  либо функциональные взаимосвязи между различными влияющими на возникновение ЧПС факторами и их последствиями, которые возможны при возникновении в заданной контролируемой зоне ЧПС. Для  $Zon_i^0$  сеть  $N_{Zon_i^0}$  состоит из одной позиции  $P_{Zon_i^0}$  и

входного и выходного переходов. Каждому типу фактора, влияющего на возникновение ЧПС, соответствует множество цветов маркеров  $\Omega^{vf} = \{\omega_k^{vf(I)}\}$ , где  $k$  – индекс типа влияющего на возникновение ЧПС фактора, а  $I$  – его интенсивность. До возникновения ЧПС объект  $Zon_i^0$  в позиции  $P_{Zon_i^0}$  сети  $N_{Zon_i^0}$  находится маркер цвета  $\omega_0^{vf} \in \Omega^{vf}$ , который не пропускается выходным переходом сети  $N_{Zon_i^0}$ . Наступление ЧПС моделируется заменой маркера цвета  $\omega_0^n$  на маркер цвета  $\omega_k^{nf(I)}$ , соответствующий типу и категории сложности наступившей ЧПС. Если для моделируемого объекта заданы функциональные взаимосвязи между влияющими на возникновение ЧПС факторами и их последствиями, т. е. сеть  $N_{Zon_i^0}$  не тривиальна, работа сети в общем случае порождает набор маркеров цветов  $\{\omega_{k_1}^{nf(I_1)}, \dots, \omega_{I_1}^{nf(I_1)}\}$ , которые через выходной переход сети  $N_{Zon_i^0}$  будут пропущены в выходную позицию  $P_{Zon_i^0}^{BXX}$ . Появление маркера  $\omega_k^{nf(I)}$  в данной позиции определяет потребность в ресурсах, необходимых для ликвидации последствий действия  $k$ -го влияющего на возникновение ЧПС фактора интенсивности  $I$ . Ресурсы, используемые для ликвидации последствий ЧПС типа  $\omega_k^{nf(I)}$ , моделируются маркерами  $\omega_k^{cc(f)}$ , где  $f$  – потенциальная возможность ликвидации. Защищаемые объекты из множества  $Zon^z = \{Zon_1^z, Zon_2^z, \dots, Zon_j^z, \dots, Zon_m^z\}$  представим составным переходом  $t_{Zon_j^z}$  (состоит из входного и выходного переходов  $t_{Zon_j^z}$ ,  $\bar{t}_{Zon_j^z}$  и позиции  $P_{Zon_j^z}$ ), его входной и выходной позициями  $P_{Zon_i^0}^{BX}$  и  $P_{Zon_i^0}^{BXX}$  с функциями инцидентности позиций и переходов  $F(P_{Zon_i^0}^{BX}, t_{Zon_i^0}) = 1$ ,  $F(P_{Zon_i^0}^{BXX}, \bar{t}_{Zon_i^0}) = 1$  и  $H(t_{Zon_i^0}, P_{Zon_i^0}^{BXX}) = 1$ . Объекты  $Zon^0$ ,  $Res^{Ob}$ ,  $Res^{Tr}$ , содержащие силы и средства, которые могут быть использованы для ликвидации последствий ЧПС, в модели представлены составными переходами  $t_{Zon_j^{zz}}(\bar{t}_{Zon_j^{zz}}, \bar{t}_{Zon_j^{zz}}, P_{Zon_j^{zz}})$ , содержащими в позиции  $P_{Zon_j^{zz}}$  некоторый набор маркеров, соответствующий находящимся на объекте средствам ликвидации последствий ЧПС (множество  $V_{Zon_j^{zz}}$ ). Пункты управления ( $Pt^Y$ ) моделируются составным переходом  $t_{Pt_j^Y}(\bar{t}_{Pt_j^Y}, \bar{t}_{Pt_j^Y}, P_{Pt_j^Y})$ . Входной переход  $\bar{t}_{Pt_j^Y}$  связан со всеми объектами модели, а выходной переход  $\bar{t}_{Pt_j^Y}$  – с объектами, входящими в состав сил и средств по ликвидации последствий ЧПС. Данные связи представлены посредством дуг, моделирующих информационные связи между объектами. Выходной переход  $\bar{t}_{Pt_j^Y}$  моделирует принятие решений о привлечении тех или иных средств для ликвидации последствий ЧПС, и в общем случае его функция срабатывания может иметь сложный вид в зависимости от стратегии принятия решений. Если объект попадает в зону действия факторов, которые приводят к ЧПС, то в позицию  $P_{Zon_o}$  заносятся маркеры цвета  $\omega_{k_j}^{nf(I_j)}$ , соответствующие тяжести последствий действия различных разрушающих факторов ЧПС и определяемые по интенсивности действия разрушающих факторов в зоне нахождения объекта.

Рассмотрим динамику функционирования предлагаемой модели.

В стационарном режиме (в отсутствие воздействия ЧПС) ни один из переходов модели не может быть активизирован, во всех выходных позициях переходов, моделирующих объекты множества  $Ob = Zon^0 \cup Zon^z \cup Res^c \cup Res^{Ob} \cup Res^{Tr} \cup Pt^Y$ , содержатся маркеры цвета  $\omega_0^{vf} \in \Omega^{vf}$ . Данную маркировку сети назовем стационарной и обозначим через  $M_z$ . Возникновение в зоне действия ЧПС моделируется формированием начальной марки-

ровки  $M_0$ , содержащей маркеры  $\omega_k^{nf(I)}$  в позиции объекта – источника вызывающего ЧПС и в позициях  $P_{Zon_j}$  всех объектов, попавших в зону действия разрушающих факторов. Ликвидация последствий аварии соответствует переходу сети в стационарное состояние, т. е. достижению маркировки  $M_z$ . Если терминальный язык  $L^{T(M_z)}(N, M_0) = \{I_W\}$  рассматриваемой сети  $N$  с начальным состоянием  $M_0$  и финальной маркировкой  $M_z$  не пуст, то существует возможность ликвидации последствий ЧПС силами и средствами, имеющимися в распоряжении ЛПР. Слова данного терминального языка представляют возможные варианты ликвидации последствий ЧПС. На множестве слов возможны постановка и решение задач повышения эффективности принятия управленческих решений ЛПР по ликвидации последствий ЧПС. Критерием принятия решений может служить минимальное время на ликвидацию ее последствий (либо последствий некоторого типа, например минимальное время для вывоза пострадавших из зоны поражения, минимальные материальные потери).

В общем виде типовую задачу оптимизации в терминах обобщенных сетей Петри можно записать в виде  $I = \min F(I_W)$ , где  $I_W \in L^{T(M_z)}(N, M_0)$  – значение выбранного критерия при реализации плана ликвидации последствий ЧПС  $I_W$ . При принятии решений данного типа в условиях наступления ЧПС выделим следующие основные этапы:

- формирование информационной модели региона (выделение множеств объектов модели и их взаимосвязей);
- построение модели региона в терминах обобщенных сетей Петри (формирование сети Петри  $N$ );
- определение начальной маркировки  $M_0$  сети  $N$  в условиях наступления аварии;
- выполнение сети и формирование терминального языка  $L^{T(M_z)}(N, M_0) = \{I_W\}$ , переводящего сеть в стационарное состояние с маркировкой  $M_z$  (на данном этапе используется математический аппарат обобщенных сетей Петри).

### 3. Заключение

*Предложено* использование моделей и методов с применением сетей Петри для анализа и контроля чрезвычайных природных ситуаций, которые обеспечивают *причинно-следственный вывод* эффективных *многокритериальных* решений в различных условиях *неопределенности* и *риска*, что позволило за счёт использования *вероятностной оценки* причинно-следственных связей в модели оценивания альтернатив учесть любые предпочтения ЛПР. При этом в отличие от существующих подходов в данном исследовании не применяется *обобщённый* критерий с взвешиванием *локальных* критериев.

*Практическая значимость* – получил дальнейшее развитие метод решения проблемы *знаниеориентированного* принятия решений с *комплексным* учётом *многокритериальности* на основе использования средств *инженерии микроситуационных квантов знаний* и *интеллектуальных* информационных технологий принятия решений, который в отличие от существующих позволяет повысить качество принимаемых решений с минимальными затратами времени и средств.

**Список литературы:** 1. Сироджа И. Б. Многокритериальная оптимизация в интеллектуальных системах поддержки принятия решений / И. Б. Сироджа, А. Я. Кузмин, М. В. Штукин. К.: Реєстрація, зберігання і обробка даних, ІПРІ НАН України. 2012, Т. 14, № 2. С. 106 – 115. 2. Колесников Д.А. Системная динамическая модель управления процессом ликвидации кризисных ситуаций с использованием сетей Петри / В.С. Симанков, Д.А. Колесников. Тверь.:Новые технологии. Научный журнал “Программные продукты и системы”. 2010. №1. С. 16-25.