

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.9:519.2

DOI: 10.17223/19988605/41/1

Н.В. Акинина, В.Г. Псоянц, А.Н. Колесенков, А.И. Таганов

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

Представлены результаты системного анализа нечетких продукционных систем поддержки принятия решений в контексте геоинформационного мониторинга экологических рисков. Рассмотрен способ представления правил нечетких продукций в нечеткой системе анализа и сокращения экологических рисков, основанный на применении нечетких сетей Петри. Предложен способ представления правил нечетких продукций при решении прикладных задач нечеткого моделирования по экологическим рискам. В результате программной реализации алгоритма получился эффективный и удобный в применении программный продукт.

Ключевые слова: геоинформационная система; ГИС; правила нечетких продукций; нечеткие сети Петри; нечеткий логический вывод; мониторинг; экологический риск.

Наряду с классическими подходами к структурному и функциональному построению ГИС анализа и мониторинга экологических рисков [1–3] в настоящей работе рассматривается новый подход к организации процесса анализа и мониторинга экологических рисков в условиях нечеткости, основанный на применении современной теории и практики анализа и мониторинга рисков в сложных программных проектах. В предлагаемом подходе процесс анализа и мониторинга экологических рисков в составе ГИС включает в себя алгоритм, состоящий из следующих шагов:

1. Идентификация экологических рисков – определение того, какие риски могут повлиять на экологию региона, и документальное оформление их характеристик.
2. Качественный анализ экологических рисков – расположение рисков по степени их приоритета для дальнейшего анализа или обработки путем оценки и суммирования вероятностей их возникновения и воздействия на экологию региона.
3. Количественный анализ экологических рисков – количественный анализ потенциального влияния идентифицированных рисков на общие цели сохранения экологии региона.
4. Планирование реагирования на экологические риски – разработка возможных вариантов действий, способствующих повышению благоприятных возможностей и снижению угроз экологии региона.
5. Мониторинг и управление рисками – отслеживание идентифицированных и остаточных рисков, идентификация новых рисков, исполнение планов реагирования на риски и оценка их эффективности на протяжении жизненного цикла региона.

Важным шагом этого алгоритма является качественный анализ экологических рисков, выполняемый экспертными методами [4]. В результате такого анализа экспертами формируется ранжированный реестр экологических рисков, которые сгруппированы по категориям:

- список рисков, требующих немедленного реагирования;
- список рисков для дополнительного анализа и реагирования;
- список рисков с низким приоритетом, нуждающихся в наблюдении.

Сформированный реестр экологических рисков является основой для выполнения следующих этапов алгоритма для системного анализа и мониторинга экологических рисков [5]. При этом процесс качественного анализа экологических рисков является весьма трудоемким. Для формализации этого процесса предлагается использовать современные методы поддержки принятия экспертных решений в условиях нечеткости. В связи с этим в статье рассматривается подход к представлению правил нечетких продукций в нечеткой продукционной ГИС, предназначенной для анализа и мониторинга экологических рисков.

1. Описание математического аппарата

Существующие нечеткие продукционные системы поддержки принятия решений по определению предназначены для реализации процесса нечеткого вывода и служат концептуальным базисом современной нечеткой логики. Достигнутые успехи в применении этих систем для решения широкого класса задач управления и послужили базой при выборе математического аппарата для формализации процесса анализа и сокращения экологических рисков на основе использования моделей, методов и алгоритмов теории нечетких множеств и нечетких сетей Петри (НСП) [6].

Сети Петри (СП) и их многочисленные модификации являются одним из классов моделей, неоспоримым достоинством которых является возможность адекватного представления не только структуры сложных организационно-технических систем и комплексов, но также и логико-временных особенностей процессов их функционирования. Сети Петри представляют собой математическую модель для представления структуры и анализа динамики функционирования систем в терминах «условие – событие». Они могут быть использованы при анализе рисков событий и выявлении потенциальных рисков экологического профиля.

Важной разновидностью СП являются нечеткие сети Петри, позволяющие конструктивно решать задачи нечеткого моделирования и нечеткого управления, в которых неопределенность имеет нестохастический или субъективный характер. В связи с этим открываются определенные перспективы в исследовании возможностей применения НСП для описания и формализации процессов управления рисками, в том числе для анализа рисков в условиях нечеткости геоданных [7, 8].

В рамках предлагаемого формализованного подхода к анализу рисков рассматриваются НСП, получаемые в результате введения нечеткости в начальную маркировку и правила срабатывания переходов базового формализма ординарных СП. Здесь нечеткая сеть Петри типа C_f определяется как $C_f = (N, f, \lambda, m_0)$, где $N = (P, T, I, O)$ – структура НСП C_f , которая аналогична структуре ординарных СП и для которой $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ и $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ – входная и выходная функции переходов соответственно; $f = (f_1, f_2, \dots, f_u)$ – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов, при этом $f_j \in [0, 1]$ ($\forall j \in \{1, 2, \dots, u\}$); $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_u)$ – вектор значений порога срабатывания переходов, при этом $\lambda_j \in [0, 1]$ ($\forall j \in \{1, 2, \dots, u\}$); $m = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$ – вектор начальной маркировки, каждая компонента которого определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующей позиции данной НСП C_f , при этом $m_i^0 \in [0, 1]$ ($\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$).

Структура N введенного в рассмотрение подкласса НСП C_f также имеет обычный (нечеткий) вид, определяемый матрицами входных I и выходных O позиций. Поэтому графически НСП C_f изображаются ориентированным двудольным графом аналогично ординарным СП.

Динамика изменения начальной и последующих маркировок НСП C_f после момента ее запуска подчиняется следующим правилам $P(C_f)$.

(P_1) *Правило определения текущей маркировки.* Любое текущее состояние НСП C_f определяется вектором $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)$, компоненты которого ($m_i \in [0, 1]$) интерпретируются как значения функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующих позициях $p_i \in P$ НСП C_f . Начальное состояние НСП определяется вектором начальной маркировки m_0 .

(P_2) *Правило (условие) активности перехода.* Переход $t_k \in T$ НСП C_f называется активным (разрешенным, возбужденным) при некоторой текущей маркировке m , если выполнено следующее условие:

$$\min_{(j \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge (I(p_j, t_k) > 0)} \{m_j\} \geq \lambda_k, \quad (1)$$

где λ_k – значения порога срабатывания перехода $t_k \in T$. Другими словами, переход $t_k \in T$ НСП C_f является активным, если во всех его входных позициях имеются ненулевые значения компонентов вектора текущей маркировки, а минимальное из них – не меньше порога срабатывания рассматриваемого перехода.

(P_3) *Правило нечеткого срабатывания перехода.* Если переход $t_k \in T$ НСП C_f является активным при некоторой текущей маркировке m (т.е. для него выполнено условие (1)), то нечеткое срабатывание данного перехода, осуществляемое мгновенным образом, приводит к новой маркировке $m_v = (m_1^v, m_2^v, \dots, m_n^v)$, компоненты вектора которой определяются по следующим формулам:

– для каждой из входных позиций $p_i \in P$, для которых $I(p_i, t_k) > 0$:

$$m_i^v = 0, \quad (\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0); \quad (2)$$

– для каждой из выходных позиций $p_j \in P$, для которых $O(t_k, p_j) > 0$:

$$m_j^v = \max \{ m_j, \min \{ m_i, f_k \} \}, \quad (\forall p_j \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0), \quad (3)$$

$(i \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge (I(p_i, t_k) > 0)$

где f_k – значение функции принадлежности или мера возможности нечеткого срабатывания (запуска) перехода $t_k \in T$, которое задается при определении конкретной НСП C_f .

Если некоторые из позиций $p_i \in P$ являются одновременно входными и выходными для разрешенного перехода $t_k \in T$, то для них компоненты вектора новой маркировки рассчитываются последовательно, вначале по формуле (2), а затем – по формуле (3). При этом строгое определение диаграммы достижимых маркировок НСП C_f базируется на отношениях непосредственного следования и достижимости маркировок, что позволяет построить необходимые правила нечетких продукций для нечеткой продукционной системы анализа и мониторинга экологических рисков [9].

2. Способ представления правил нечетких продукций

Рассмотренный выше системный анализ НСП C_f позволяет конкретизировать предлагаемый способ представления правил нечетких продукций при решении прикладных задач нечеткого моделирования и выполнения процесса приближенных рассуждений по экологическим рискам. Для этого будем использовать модифицированные нечеткие сети Петри $C'_f = (N, f, \lambda, m_0)$, для которых правила P_1, P_2 такие же, как и теоретически рассмотренные выше для $P(C_f)$, а правило P_3 модифицировано и принимает следующий вид:

(P_3') При расчете компонентов вектора новой маркировки m как для входных, так и для выходных позиций здесь используется единая формула (3).

Это правило обусловлено тем обстоятельством, что НСП C'_f используют для интерпретации маркеров в позициях понятие нечеткой истинности высказывания. Значение последнего не становится равным нулю для высказываний в левой части правил продукций после их выполнения при данной интерпретации [10].

В предлагаемом способе используется следующая интерпретация позиций и переходов НСП. Правило нечеткой продукции вида "ПРАВИЛО i : ЕСЛИ A , ТО B " представляется как некоторый переход $t_i \in T$ НСП (N, f, λ, m_0) , при этом условию " A " этого правила соответствует входная позиция $p_i \in P$ этого перехода, а заключению – выходная позиция $p_k \in P$ этого перехода t_i .

Если условие правила нечеткой продукции состоит из нескольких подусловий, соединенных операцией нечеткой конъюнкции $A = A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_l$, то все эти подусловия представляются как входные позиции соответствующего перехода.

Если заключение правила нечеткой продукции состоит из нескольких подзаключений, соединенных операцией нечеткой конъюнкции $B = B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_l$, то все эти подзаключения также представляются как выходные позиции соответствующего перехода.

Более сложный случай соответствует дизъюнкции подусловий и подзаключений. Так, если условие правила нечеткой продукции состоит из нескольких подусловий, соединенных операцией нечеткой дизъюнкции: $A = A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_l$, то все эти подусловия представляются как входные позиции отдельных переходов t_i для $i \in \{1, 2, \dots, l\}$. Если же заключение правила нечеткой продукции состоит из нескольких подзаключений, соединенных операцией нечеткой дизъюнкции $B = B_1 \vee B_2 \vee \dots \vee B_l$, то все эти подзаключения представляются как выходные позиции отдельных переходов t_i для $i \in \{1, 2, \dots, l\}$.

Веса или коэффициенты определенности F_i правил нечетких продукций преобразуются в вектор $f = (f_1, f_2, \dots, f_u)$ значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов, а степеням истинности подусловий правил соответствуют значения компонентов начальной маркировки $m_0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$, которая в этом случае описывает текущую ситуацию моделируемой проблемной области. Следует заметить, что в дополнение к базовому формализму правил нечетких продукций в НСП можно учесть возможность активизации каждого из правил заданием вектора $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_u)$, компоненты которого определяют значения порога срабатывания переходов [11, 12].

3. Реализация нечеткой продукционной системы анализа экологических рисков

На основе использования модифицированных НСП может быть разработана экспериментальная версия автоматизированной системы поддержки принятия решений по экологическим рискам [13]. Эта система, по существу, является экспертной системой, отражающей нечеткую логику взаимосвязи входных величин – экспертных оценок состояния экологии региона и выходных величин – степеней истинности возможных экологических рисков (рис. 1).

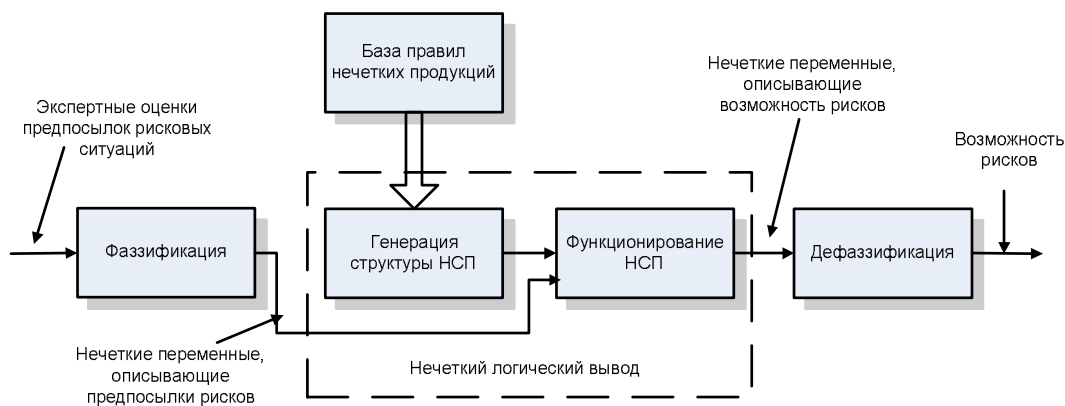


Рис. 1. Схема процесса анализа рисков с применением НСП

Основными функциональными модулями такой автоматизированной системы следует считать: базу правил нечетких продукций, блок нечеткого логического вывода, интерфейсный модуль, модуль модификации базы правил, модули фаззификации и дефаззификации [14, 15].

Интерфейс пользователя автоматизированной системы должен основываться на представлении всех доступных пользователю системных объектов и функций в виде графических компонентов экрана. Все элементы интерфейса пользователя разбиваются на группы исходя из их функционального назначения:

- интерфейс для работы с базой правил и ее возможного редактирования;
- интерфейс ввода исходных данных, характеризующих текущую рисковую ситуацию региона;
- интерфейс для просмотра и анализа сгенерированных НСП по текущей рисковому ситуации региона;

- интерфейс для настройки и редактирования функций принадлежности;
- интерфейс представления результатов нечеткого вывода по экологическим рискам проекта.

В раскрывающемся списке следует выбрать нечеткую переменную, для которой необходимо отредактировать функцию принадлежности. Далее нужно изменить параметры функции принадлежности. Все изменения сразу отображаются на графике, расположенном в нижней части окна (рис. 2).

Просмотр нечеткой сети Петри выполняется с использованием интерфейса, представленного на рис. 3. Позиции НСП, соответствующие входным и выходным данным, выделены цветом.

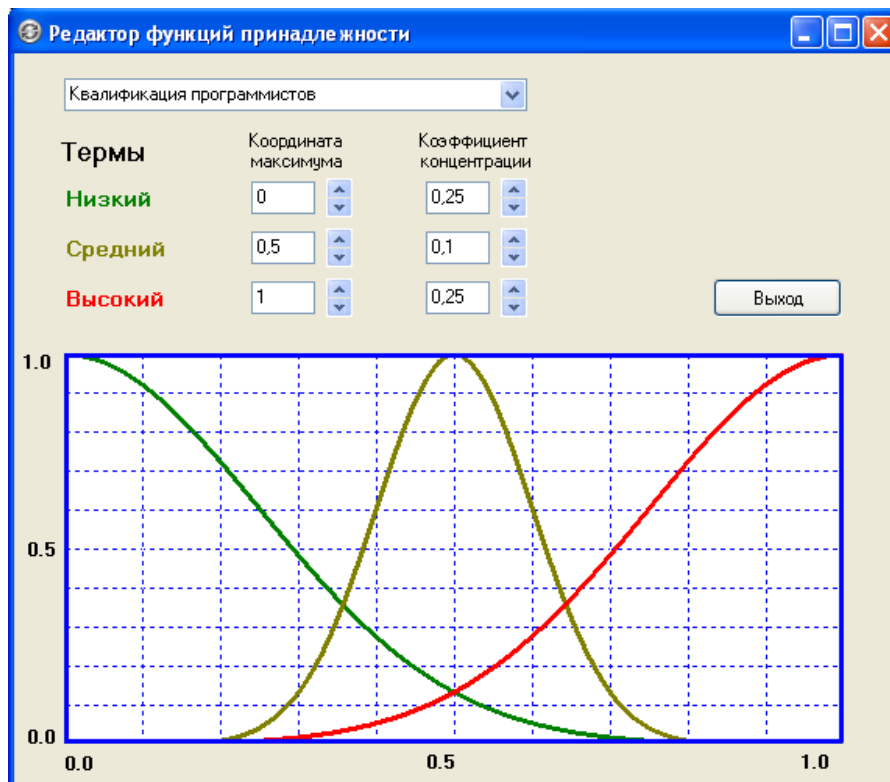


Рис. 2. Окно редактора функций принадлежности

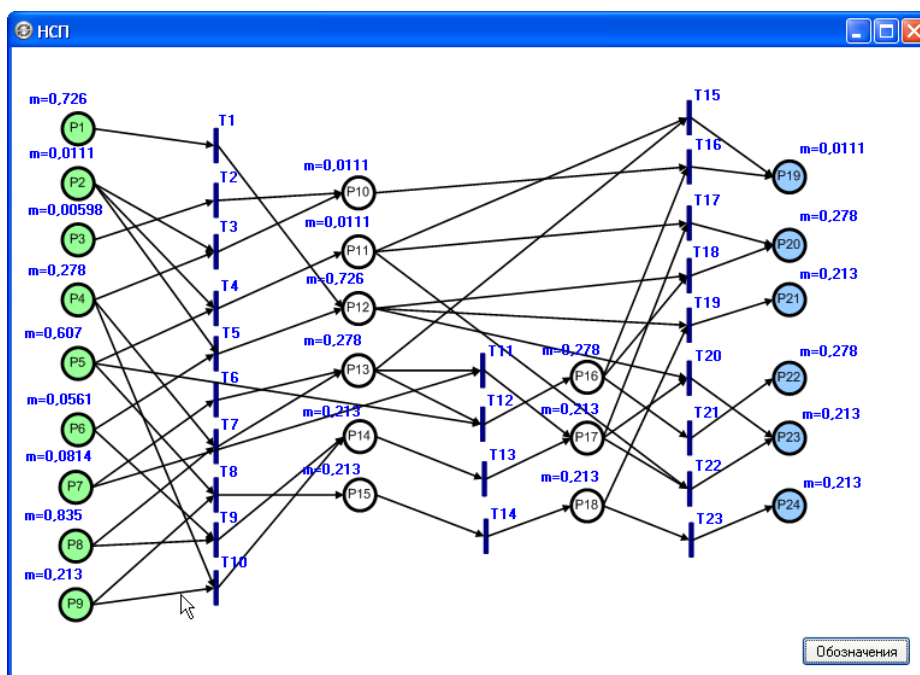


Рис. 3. Форма просмотра нечеткой сети Петри

В результате программной реализации алгоритма анализа экологических рисков с использованием математического аппарата НСП получился эффективный и удобный программный продукт, который предназначен для применения на практике как самостоятельно, так и в составе промышленных ГИС.

Заключение

Для формализации процесса анализа экологических рисков в работе предложен способ представления правил нечетких продукций в нечеткой системе анализа экологических рисков, основанный на применении нечетких сетей Петри [4]. Выполнена программная реализация нечеткой продукционной системы анализа экологических рисков на основе использования модифицированных нечетких сетей Петри [16]. Программный продукт достаточно эффективен для решения задач в составе ГИС экологического мониторинга [17].

Современные теория и практика развития геоинформационных систем (ГИС) для анализа и мониторинга экологических рисков в условиях разнородных исходных геоданных указывают на необходимость разработки новых эффективных подходов и алгоритмов поддержки принятия решений по экологическим рискам в условиях нечеткости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таганов А.И. Применение нечетких множеств для формализации процессов анализа и идентификации важности рисков программного проекта // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 4 (30). С. 46–51.
2. Гинко В.И. Экологический риск в системе управления риском // В мире научных открытий. 2013. № 7.2 (43). С. 301–312.
3. Попов С.Ю. Геоинформационные системы и пространственный анализ данных в науках о лесе. СПб. : Интермедия, 2013. 400 с.
4. Wheeler M.W., Bailer A.J. Benchmark dose estimation incorporating multiple data sources // Risk Analysis. 2009. V. 29, No. 2. P. 249–256.
5. Саркисян С.А. Теория прогнозирования и принятия решений. М. : Высшая школа, 1977. 351 с.
6. Ecological Risk Assessment for Contaminated Sites / G.W. Suter II. New York : Taylor & Francis, 2000. 438 p.
7. Kolesenkov A.N., Kostrov B.V., Ruchkin V.N., Ruchkina E.V. Anthropogenic Situation Express Monitoring on the Base of the Fuzzy Neural Networks // Proceedings – 2014 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2014 – Including ECyPS 2014, Budva, Montenegro. P. 166–168.
8. Костров Б.В., Баранчиков А.И. Теория и методы исследования моделей и алгоритмов представления данных для предметных областей с ранжируемыми атрибутами // Вестник РГРТУ. 2013. № 5 (вып. 47). С. 59–64.
9. Encyclopedia of Environmental Science and Engineering / ed. by J.R. Pfafflina, E.N. Zieglera. 5th ed. New York : Taylor & Francis, 2006. V. 2: M–Z. 1383 p.
10. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. СПб. : Питер, 2009. 624 с.
11. Акинина Н.В., Акинин М.В., Соколова А.В., Колесенков А.Н., Никифоров М.Б. Методы и алгоритмы фильтрации разнородных помех с применением систем искусственного интеллекта в задачах обработки данных дистанционного зондирования земли // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 9. С. 12–19.
12. Барсегян А., Куприянов М., Холод И., Тесс М., Елизаров С. Анализ данных и процессов. СПб. : БХВ-Петербург, 2009. 544 с.
13. Балабанов И.Т. Риск-менеджмент. М. : ФиС, 1996. 192 с.
14. Govaerts B., Beck B., Lecoutre E., le Bailly C., Vanden Eeckhaut P. From monitoring data to regional distributions: a practical methodology applied to water risk assessment // Institut de statistique, Universite catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2001.
15. Gusev S.I., Spirikina O.V. A research of an adaptation algorithm convergence using spatial signal pre-processing // 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO. Montenegro, Bar, 2016. P. 301–303.
16. Михаль О.Ф., Руденко О.Г., Халайбех З. Принципы алгоритмической реализации нечетких сетей Петри // Вестник национального технического университета «ХПИ». 2003. № 5. С. 75–84.
17. Таганов А.И., Колесенков А.Н., Псоянц В.Г., Акинина Н.В. Автоматизированный синтез карты экологических рисков в ГИС // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 2. С. 188–198.

Акинина Наталья Викторовна. E-mail: natalya.akinina@gmail.com

Псоянц Владимир Григорьевич. E-mail: psioians@mail.ru

Колесенков Александр Николаевич, канд. техн. наук, доцент. E-mail: sk62@mail.ru

Таганов Александр Иванович, д-р техн. наук, профессор. E-mail: alxtag@yandex.ru

Рязанский государственный радиотехнический университет

Поступила в редакцию 28 апреля 2017 г.

Theory and practice of using fuzzy Petri nets for monitoring environmental risks.

Key words: geoinformation system; fuzzy product rules; fuzzy Petri nets; monitoring; environmental risk.

DOI: 10.17223/19988605/41/1

The results of theoretical analysis of fuzzy production systems for decision support in the context of geoinformation monitoring of environmental risks are presented. Along with classical approaches to structural and functional construction of geoinformation systems of GIS analysis and monitoring of environmental risks, a new approach to the organization of the process of analysis and monitoring of environmental risks in conditions of fuzziness is considered. The approach is based on applying modern theory and practice of risk analysis and monitoring in complex software projects. In the proposed approach, the process of analyzing and monitoring environmental risks in the GIS includes an algorithm consisting of the following steps: identification of environmental risks; a qualitative analysis of environmental risks; quantitative analysis of environmental risks; planning of response to environmental risks; monitoring and risk management. An important step of this algorithm is a qualitative analysis of environmental risks, performed by expert methods. As a result of this analysis, experts form a ranked register of environmental risks, which are grouped by category. The established register of environmental risks is the basis for the following stages of the algorithm for system analysis and monitoring of environmental risks. At the same time, the process of qualitative analysis of environmental risks is a very laborious process. To formalize this process, it is proposed to use modern methods to support the adoption of expert decisions in conditions of fuzziness. In this connection, the article considers the approach to presenting fuzzy product rules in a fuzzy production GIS designed for the analysis and monitoring of environmental risks.

Existing fuzzy decision-making decision support systems by definition are designed to implement the process of fuzzy inference and serve as a conceptual basis for modern fuzzy logic. The achieved successes in the application of these systems for solving a wide class of control tasks and served as the basis for choosing a mathematical apparatus for formalizing the process of analysis and reducing environmental risks based on the use of models, methods and algorithms of fuzzy sets theory and fuzzy Petri nets. Within the framework of the proposed formalized approach to risk analysis, NSPs obtained as a result of the introduction of fuzziness in the initial marking and in the rules for triggering the transitions of the basic formalism of ordinary JVs are considered.

The considered system analysis of the NSP allows us to concretize the proposed way of presenting the rules of fuzzy products in solving applied problems of fuzzy modeling and performing the process of approximate reasoning on environmental risks. Based on the use of modified NSPs, a pilot version of an automated decision support system for environmental risks can be developed. This system is essentially an expert system that reflects the fuzzy logic of the interrelation of input values - expert assessments of the state of the region's ecology and output values - the degrees of truth of possible environmental risks. The main functional modules of such an automated system should be considered: a base of rules for fuzzy products, a block of fuzzy logic inference, an interface module, a rule base modification module, modules for fuzzification and defuzzification. The user interface of the automated system should be based on the representation of all system objects and functions available to the user in the form of graphic components of the screen.

To formalize the process of environmental risk analysis, the paper proposes a way to present fuzzy product rules in a fuzzy environmental risk analysis system based on the use of fuzzy Petri nets. A program implementation of a fuzzy production system for the analysis of environmental risks based on the use of modified fuzzy Petri nets was implemented. The software product has a sufficiently effective application for solving problems in the GIS of environmental monitoring. The modern theory and practice of GIS development for the analysis and monitoring of environmental risks in conditions of diverse initial geodata indicates the need to develop new effective approaches and algorithms for supporting decision-making on environmental risks in conditions of fuzziness. As a result of the software implementation of the algorithm for analyzing environmental risks using the mathematical apparatus of the NRS, an effective and easy-to-use software product has been developed that is intended for application in practice both independently and as part of industrial GIS.

REFERENCES

1. Taganov, A.I. (2007) *Primenenie nechetkikh mnozhestv dlya formalizatsii protsessov analiza i identifikatsii vazhnosti riskov programnogo proekta* [Application of fuzzy sets for formalization of processes of analysis and identification of the importance of program project risks]. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 4(30). pp. 46–51.
2. Ginko, V.I. (2013) Environmental risk in the control system of risk. *V mire nauchnykh otkrytiy – In the World of Scientific Discoveries*. 7.2(43). pp. 301–312.
3. Popov, S.Yu. (2013) *Geoinformatsionnye sistemy i prostranstvennyy analiz dannykh v naukakh o lese* [Geoinformation systems and spatial data analysis in forest sciences]. St. Petersburg: Intermediya.
4. Wheeler, M.W. & Bailer, A.J. (2009) Benchmark dose estimation incorporating multiple data sources. *Risk Analysis*. 29(2). pp. 249–256. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2008.01144.x.
5. Sarkisyan, S.A. (1977) *Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya resheniy* [The theory of forecasting and decision making]. Moscow: Vysshaya shkola.
6. Suter II, G.W. (2000) *Ecological Risk Assessment for Contaminated Sites*. New York: Taylor & Francis.
7. Kolesenkov, A.N., Kostrov, B.V., Ruchkin, V.N. & Ruchkina, E.V. (2014) Anthropogenic Situation Express Monitoring on the Base of the Fuzzy Neural Networks. *MECO 2014 – Including ECyPS 2014*. Proceedings of the 3rd Mediterranean Conference on Embedded Computing. Budva, Montenegro. pp. 166–168.
8. Kostrov, B.V. & Baranchikov, A.I. (2013) Teoriya i metody issledovaniya modeley i algoritmov predstavleniya dannykh dlya predmetnykh oblastey s ranzhiruemyimi atributami [Theory and methods of research of models and algorithms of data representation for subject domains with ranked attributes]. *Vestnik RGRTU – Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 5(47). pp. 59–64.

- 9 Pfafflina, J.R. & Zieglera, E.N. (eds) (2006) *Encyclopedia of Environmental Science and Engineering*. 5th ed. Vol. 2. New York: Taylor & Francis.
10. Paklin, N.B. & Oreshkov, V.I. (2009) *Biznes-analitika: ot dannykh k znaniyam* [Business analysis: from data to knowledge]. St. Petersburg: Piter.
11. Akinina, N.V., Akinin, M.V., Sokolova, A.V., Kolesenkov, A.N. & Nikiforov, M.B. (2015) Metody i algoritmy fil'tratsii raznorodnykh pomekh s primeneniem sistem iskusstvennogo intellekta v zadachakh obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli [Methods and algorithms for filtering heterogeneous jamming using artificial intelligence systems in problems of processing remote sensing data]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki - News of Tula State University. Technical Sciences*. 9. pp. 12–19.
12. Barsegyan, A., Kupriyanov, M., Kholod, I., Tess, M. & Elizarov, S. (2009) *Analiz dannykh i protsessov* [Analysis of data and processes]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg.
13. Balabanov, I.T. (1996) *Risk-menedzhment* [Risk management]. Moscow: FiS.
14. Govaerts, B., Beck, B., Lecoutre, E., le Bailly, C. & Vanden Eeckhaut, P. (2001) *From monitoring data to regional distributions: a practical methodology applied to water risk assessment*. Louvain-la-Neuve: Institut de statistique, Universite catholique de Louvain.
15. Gusev, S.I. & Spirikina, O.V. (2016) A research of an adaptation algorithm convergence using spatial signal pre-processing. *The 5th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO*. Montenegro, Bar. pp. 301–303.
16. Mikhal, O.F., Rudenko, O.G. & Khalaybekh, Z. (2003) Printsipy algoritmicheskoy realizatsii nechetkikh setey Petri [Principles of algorithmic realization of fuzzy Petri nets]. *Vestnik natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta KhPI*. 5. pp. 75–84.
17. Taganov, A.I., Kolesenkov, A.N., Psoyants, V.G. & Akinina, N.V. (2017) Avtomatizirovanny sintez karty ekologicheskikh riskov v GIS [Automated synthesis of ecological risk map in GIS]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – News of Tula State University. Technical Sciences*. 2. pp. 188–198.